

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação do desempenho aerodinâmico de turbina eólica de eixo horizontal através
de modelagem e simulação computacionais

Oswaldo Donatelli Neto

São Paulo

2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação do desempenho aerodinâmico de turbina eólica de eixo horizontal através
de modelagem e simulação computacionais

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Oswaldo Donatelli Neto

Orientador: Prof. Dr. Bruno Souza Carmo

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2017

Catalogação-na-publicação

Neto, Oswaldo

Avaliação do desempenho aerodinâmico de turbina eólica de eixo horizontal através de modelagem e simulação computacionais / O. Neto -- São Paulo, 2017.

67 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Dinâmica dos fluidos computacional 2. Interação fluido-estrutural
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

RESUMO

A necessidade de mudança da matriz energética mundial, concentrada nas fontes de energia não renováveis, tornou-se uma prioridade para muitas nações. A queima de combustíveis fósseis, fonte de energia mais utilizada nos dias de hoje, passou a gerar graves problemas para a sociedade, como os males à saúde humana gerados pela poluição do ar e a degradação ambiental. O desenvolvimento das fontes de energia sustentáveis e limpas, como a energia eólica, tornou-se uma solução alternativa de tais problemas. Nesse contexto o uso das turbinas eólicas tem demonstrado importante papel como fonte de geração de energia limpa e renovável. Contudo para aprimorar o desenvolvimento da geração de energia através das turbinas eólicas, ferramentas de projeto mais avançadas tiveram de ser elaboradas. O uso da simulação computacional do escoamento através das turbinas disseminou-se como um meio de se analisar os efeitos aerodinâmicos e a performance da turbina eólica. No presente estudo usando o software comercial ANSYS FLUENT, será realizada a simulação computacional do escoamento através de uma turbina eólica de eixo horizontal de três pás, baseando-se na geometria completa da turbina do ensaio em escala de túnel de vento NREL Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI (HAND, 2001). Inicialmente a turbina eólica será modelada como rígida, sendo considerados seus elementos principais na simulação; hub, nacelle, pás e torre. Após a simulação e análise de performance desse modelo, as pás da turbina serão consideradas flexíveis, necessitando-se de simulações com interação fluido estrutural.

Palavras-chave: CFD, turbina eólica, energia elétrica

ABSTRACT

The need to change the world energy matrix, focusing on non-renewable energy sources, has become a priority for many nations. The burning of fossil fuels, the most widely used energy source today, has generated serious problems for society, such as the human health problems caused by air pollution and environmental degradation. The development of clean and sustainable energy sources, such as wind energy, has become an alternative solution to such problems. In this context, the use of wind turbines has demonstrated an important role as a source of clean and renewable energy generation, although with low share in the Brazilian energy matrix, but with growth potential. In order to optimize the development of power generation through wind turbines, more advanced design tools have been developed. Thus, the use of the computational simulation of the flow through the turbines was disseminated as a means of analyzing the aerodynamic effects and the performance of the wind turbine. In the present study, using computational modeling and simulation tools (CFD), the flow through a three-bladed horizontal axis wind turbine will be computed and the results will be compared with NREL Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI (HAND, 2001), experimental data. Initially, the wind turbine will be modeled as a rigid structure, composed of its main structural components, such as hub, nacelle, blades and tower. After the aerodynamic performance analysis of the simulation of this model, the wind turbine blades will be considered flexible, requiring simulations with fluid-structure interaction.

Keywords: CFD, wind turbine, fluid-structure interaction

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta mundial de energia por fonte (EPE, 2016).....	1
Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica por fonte (EPE, 2016)	2
Figura 3 - Variação da oferta interna de energia elétrica por setor (EPE, 2016)	2
Figura 4 - Evolução da geração eólica no Brasil (EPE, 2016).....	3
Figura 5 - Estudos na área de energia eólica.....	5
Figura 6 – Turbina eólica de eixo horizontal (MALATESTA, 2012).	8
Figura 7 - Geometria da turbina de três pás (NETO, 2015).....	9
Figura 8 - Vista em corte da composição estrutural da pá da turbina eólica (SCHAFFARCZYK, 2012).....	17
Figura 9 - Domínio para a simulação bidimensional	20
Figura 10 - Malha de volumes finitos	21
Figura 11 - Gráfico Coeficiente de Sustentação versus Ângulo de Ataque	24
Figura 12 - Gráfico Coeficiente de Arrasto versus Coeficiente de Sustentação	24
Figura 13 - Distribuição de C_p ao longo da superfície do aerofólio NACA0012 ($\alpha=6^\circ$, $Re=500$)	25
Figura 14 - Gráfico Coeficiente de Sustentação versus ângulo de Ataque ($Re =$ 100.000)	26
Figura 15 - Gráfico Coeficiente de Arrasto versus Coeficiente de Sustentação ($Re =$ 100.000)	27
Figura 16 - Contornos de pressão estática sobre o aerofólio NACA0012 ($\alpha = 10^\circ$, $Re = 105$, K- ω SST).....	27
Figura 17 - Contornos de velocidade sobre o aerofólio NACA0012 ($\alpha = 10^\circ$, $Re =$ 105, K- ω SST).....	28
Figura 18 - Geometria Completa da Turbina eólica.....	30
Figura 19 - Domínio de Simulação	30
Figura 20 - Elementos prismáticos sobre a superfície da pá	31
Figura 21 - Contornos de Velocidade $U_\infty = 7 \text{ m/s}$	32
Figura 22 - Contornos de Velocidade em Seções Radiais da Pá	32
Figura 23 - Linhas de Corrente no Plano $x=0$	33
Figura 24 - Comparação entre o torque gerado pela turbina via experimento e CFD	33
Figura 25 - Contornos de Velocidade $U_\infty = 7 \text{ m/s}$ no plano $y = 0$	34

Figura 26 - Contornos de Velocidade $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ no plano $y = 0$	34
Figura 27 - Contornos de Velocidade $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$ no plano $y = 0$	35
Figura 28 - Contornos de Velocidade $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$ no plano $x = 0$	35
Figura 29 – Contornos de pressão na superfície da pá $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$. a) Face de pressão e b) Face de sucção	36
Figura 30 - Tensão de Von Misses.....	37
Figura 31 - Deslocamento dos nós na direção do escoamento.....	37
Figura 32 - 1º Modo de vibração	38
Figura 33 - 3º Modo de vibração	38
Figura 34 - 7º Modo de vibração	38
Figura 35 - Representação esquemática da interação fluido-estrutural	40
Figura 36 - Malha de elementos finitos da placa	40
Figura 37 - Condições de contorno da simulação estrutural	41
Figura 38 - Variação temporal da pressão incidente	41
Figura 39 - Malha de volumes finitos	42
Figura 40 - Deslocamento total no instante $t=0,5\text{s}$	43
Figura 41 - Contornos de velocidade no instante $t = 0,5\text{s}$	43
Figura 42 - Deslocamento temporal da ponta da placa plana	44
Figura 43 - Convergência da simulação fluido-estrutural para $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$	45
Figura 44 - Deformação total da estrutura para $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$	45
Figura 45 - Deformação total da estrutura para $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$	46
Figura 46 - Contornos de velocidade no plano $y=0$ para $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$	46
Figura 47 – Contornos de velocidade e linhas de corrente $z=0,3R$ $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$	46
Figura 48 - Deformação total da estrutura para $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$	47
Figura 49 - Contornos de velocidade no plano $y=0$ para $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$	47
Figura 50 - Contornos de velocidade e linhas de corrente $z=0,3R$ $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$...	48
Figura 51 - Deformação total da estrutura para $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$	48
Figura 52 - Contornos de velocidade no plano $y=0$ para $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$	49
Figura 53 - Contornos de velocidade e linhas de corrente $z=0,3R$ $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$...	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação do número de elementos da malha (teste 1)	22
Tabela 2 - Variação da dimensão Lw do domínio (teste 2)	22
Tabela 3 - Variação da dimensão Lm do domínio (teste 3)	23
Tabela 4 - Variação da dimensão Lj do domínio (teste 4)	23
Tabela 5 - Comparaçao entre performance das turbinas eólicas $U_{\infty}=7$ m/s	36
Tabela 6 - Frequências naturais dos modos de vibração da turbina eólica	38
Tabela 7- Deslocamento máximo da pá	49
Tabela 8 - Resultados comparativos de performance aerodinâmica	50
Tabela 9 - Detalhes das seções radiais da pá da turbina eólica	56
Tabela 10 - Coordenadas do Aerofólio S809	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3. OBJETIVOS	11
4. METODOLOGIA	12
4.1. EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DE NAVIER-STOKES E MODELOS DE TURBULÊNCIA	12
4.2. CONDIÇÕES DE CONTORNO DO ESCOAMENTO	15
4.3. COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL DA PÁ	16
4.4. MODELAGEM ESTRUTURAL – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	17
5. RESULTADOS	19
5.1. ESTUDOS COM PERFIS BIDIMENSIONAIS	19
5.1.1. GEOMETRIA E DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL ..	20
5.1.2. MALHA DE VOLUMES FINITOS	20
5.1.3. SIMULAÇÕES BIDIMENSIONAIS	22
5.1.3.1. Estudo de variação de performance aerodinâmica com a variação nas dimensões do domínio	22
5.1.3.2. Curvas de coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque	23
5.1.3.3. Estudo da utilização de modelos de turbulência para escoamentos com valores de Reynolds elevados	25
5.2. MODELO TRIDIMENSIONAL RÍGIDO DA TURBINA EÓLICA	28
5.2.1. GEOMETRIA DA TURBINA E DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO	29
5.2.2. MALHA DE VOLUMES FINITOS	31
5.2.3. PERFORMANCE AERODINÂMICA – 2 PÁS	32

5.2.4. PERFORMANCE AERODINÂMICA – 3 PÁS	34
5.3. SIMULAÇÃO ESTÁTICA ESTRUTURAL.....	36
5.4. SIMULAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURAL	39
5.4.1. <i>TWO-WAY FLUID-STRUCTURE INTERACTION</i>	39
5.4.2. PLACA PLANA.....	40
5.4.3. SIMULAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURAL DA TURBINA EÓLICA DE DUAS PÁS COM MODELO SIMPLIFICADO	44
5.4.3.1. Velocidade da corrente livre igual a 7 m/s.....	44
5.4.3.2. Velocidade da corrente livre igual a 10 m/s.....	47
5.4.3.3. Velocidade da corrente livre igual a 15 m/s.....	48
6. CONCLUSÃO	51
7. REFERÊNCIAS.....	54

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial nos dias de hoje é fundamentada nas fontes de energia não renováveis, sobretudo no carvão e petróleo. A queima do carvão e de combustíveis derivados do petróleo para geração de energia tem gerado grandes preocupações à sociedade mundial, na medida em que essa combustão agride severamente o meio ambiente. Dentre os problemas mais graves apresentados pela queima de combustíveis fósseis, destaca-se a alteração do equilíbrio termodinâmico da biosfera, a qual provoca grandes alterações climáticas no planeta, os males à saúde humana gerados pela poluição do ar e a degradação ambiental.

Além dos problemas ambientais provocados pela predominância do uso de fontes de energia não renováveis, a demanda energética mundial cresce cada vez mais. Isto indica que os recursos naturais mais utilizados atualmente (combustíveis fósseis) para geração de energia não renovável se esgotarão em algum ponto do futuro.

Para se evidenciar o uso predominante dessas fontes de energia não renováveis, conforme dados do BP Energy Statistical (BP REVIEW, 2016) atualmente mais de 80% da produção mundial de energia provém dos combustíveis fósseis, enquanto apenas 10% dessa produção provém de fontes de energia renováveis. Esse instituto ainda aponta que apenas 1% da produção mundial de energia provém da energia eólica, o que indica uma participação baixíssima dessa fonte energética de grande potencial.

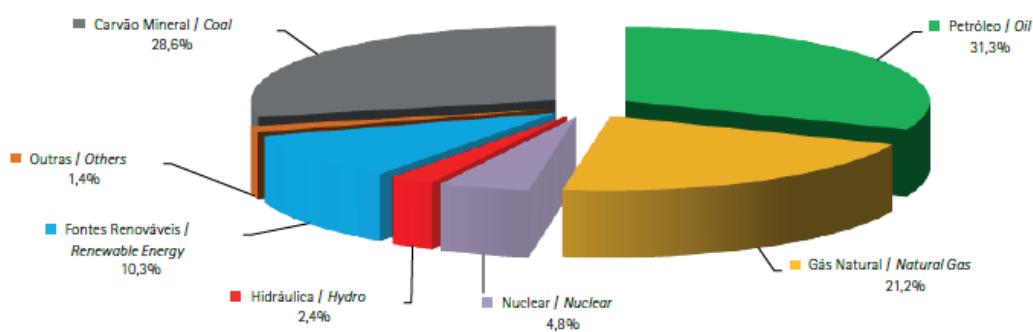


Figura 1 - Oferta mundial de energia por fonte (EPE, 2016)

Tratando-se da matriz energética brasileira, conforme dados do balanço energético nacional de 2016 da EPE (EPE, 2016), em 2015 apenas 3,5% da oferta interna de energia elétrica era proveniente da energia eólica, enquanto que em 2014 a oferta de energia eólica atingia apenas 2% do total brasileiro, conforme apresentado na figura 2.

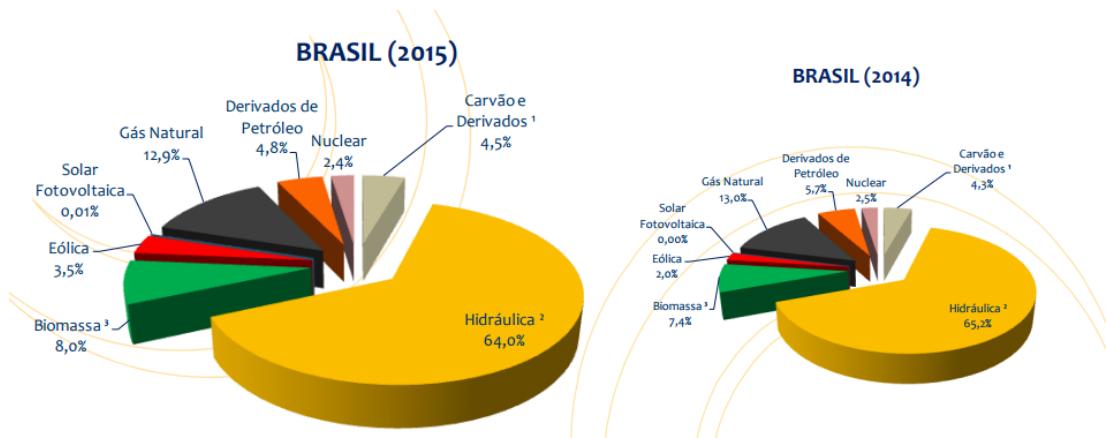


Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica por fonte (EPE, 2016)

O balanço energético nacional de 2016 ainda aponta a variação entre 2014 e 2015 da oferta interna de energia elétrica por fonte, esquematizado na figura 3. É possível verificar, um aumento significativo da participação da energia eólica na matriz energética brasileira.

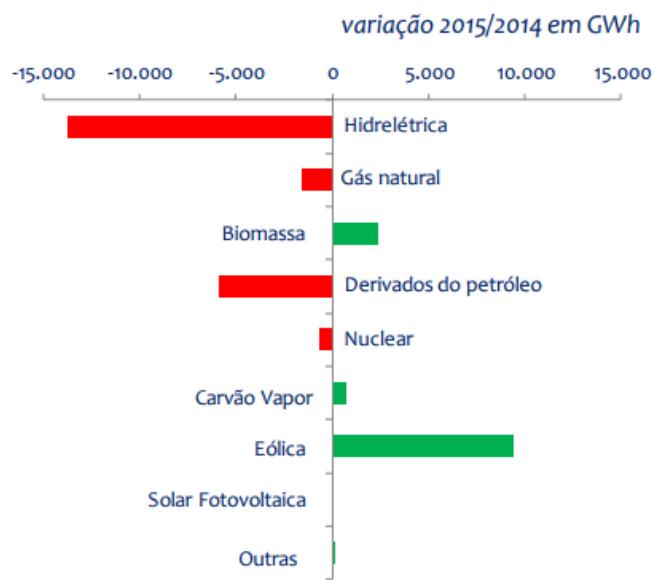


Figura 3 - Variação da oferta interna de energia elétrica por setor (EPE, 2016)

Por fim, conforme EPE (EPE, 2016), a geração eólica no Brasil está crescendo significativamente ao longo dos últimos anos, sendo que em 2015 a energia eólica gerada, em GWh ultrapassou a energia nuclear, como pode-se verificar na figura 4 abaixo.

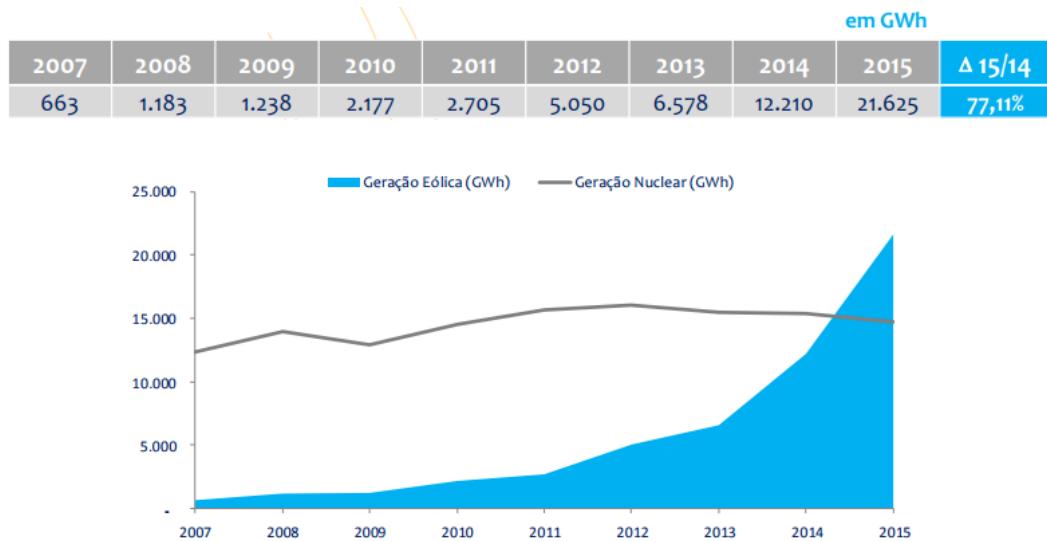


Figura 4 - Evolução da geração eólica no Brasil (EPE, 2016)

Devido aos impactos socioeconômicos apresentados recentemente do uso da matriz energética concentrada nas fontes não renováveis de energia, nos últimos anos pesquisas foram direcionadas com o intuito de diversificar e ampliar a produção de energia mundial, através de fontes renováveis de energia, principalmente a energia eólica e a energia solar. Consequentemente a necessidade do estudo dessas fontes de energia renováveis tornou-se uma prioridade com a finalidade de aumentar sua produtividade. É nesse contexto que se fundamenta o estudo de turbinas eólicas, principais máquinas geradoras de energia sustentável e limpa proveniente das correntes de ar.

O uso de turbinas eólicas para geração de energia elétrica intensificou-se desde a década de 70, quando houve, devido à crise do petróleo, a necessidade de diversificação nas fontes geradoras de energia elétrica, apesar de que máquinas precursoras das turbinas eólicas, como os moinhos, já eram utilizados antes mesmo da própria era industrial. Atualmente no Brasil, o uso de turbinas eólicas para geração de energia elétrica vem se expandindo nos últimos anos; novos parques eólicos vêm sendo

construídos, sobretudo na região nordeste, para complementar a geração de energia elétrica por usinas hidroelétricas nessa região. Porém a participação da energia eólica na produção nacional de energia ainda é baixíssima, dado que o potencial brasileiro de geração de energia eólica é gigantesco. Conforme dados estatísticos da CRESESB/CEPEL (CRESESB, 2003) o potencial eólico brasileiro foi estimado para cerca de 150 GW, valor de grandes proporções que poderia ajudar a diversificar e ampliar a produção nacional de energia.

Além da crise do petróleo citada acima, a revolução técnico-científica informacional que ocorreu nos últimos 30 anos possibilitou a solução de problemas complexos da engenharia por métodos computacionais. Desse modo, essa inovação científica proporcionou um aprofundamento no estudo das turbinas eólicas; modelos computacionais da interação fluido estrutural muito mais realistas e complexos dessas máquinas passaram a ser utilizados como fontes de dados mais confiáveis para a projeto e construção das turbinas pelas empresas. Assim, progressivamente reduzem-se os custos de produção das empresas, as quais utilizam softwares aperfeiçoados para projeto e fabricação de peças, gerando desse modo energia limpa, sustentável e de menor custo.

Vários estudos hoje são realizados com o intuito de promover a melhoria dos projetos de turbinas eólicas no mundo. Alguns já citados possuem justamente tal finalidade de ferramenta de projeto, porém poucos ainda hoje são realizados no Brasil. Por isso é importante para a comunidade técnico-científica brasileira que haja estudos sobre projetos de turbinas eólicas, que possibilitem a redução de custos de produção de energia eólica, bem como o uso das simulações como ferramenta de projeto, de modo a facilitar a expansão dessas turbinas no território brasileiro.

Dentro dos estudos realizados com turbinas eólicas, destaca-se os estudos com geração de energia eólica *offshore*, aeroacústica, uso de *winglets* nas pás da turbina eólica e mapeamento topográfico de áreas para instação de parques eólicos.

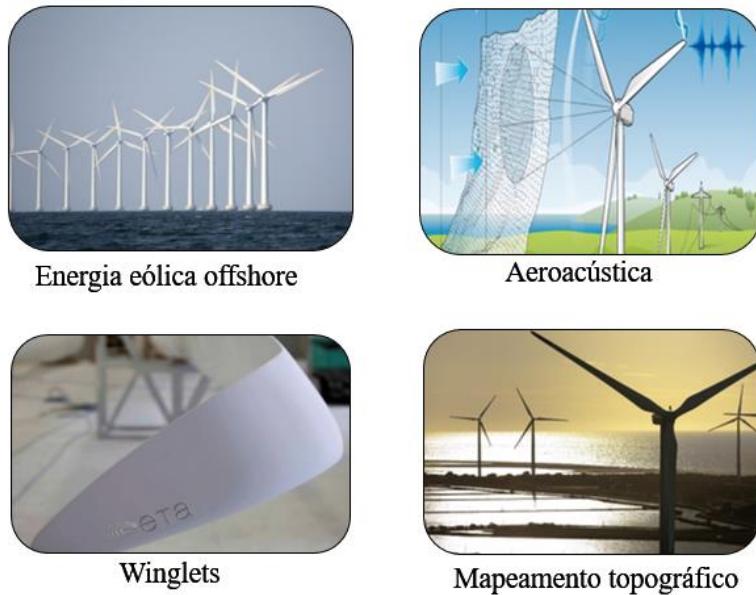


Figura 5 - Estudos na área de energia eólica

Por este motivo, deseja-se desenvolver neste projeto uma metodologia confiável e acurada para a simulação tridimensional da turbina eólica. Este projeto de pesquisa tem seus alicerces na modelagem e simulação computacional do escoamento através de uma turbina eólica de eixo horizontal de três pás. Inicialmente o presente estudo terá como base o experimento realizado em túnel de vento, NREL Unsteady Aerodynamics Phase VI (HAND, 2001), no qual são realizadas diversas medições de pressão ao longo da superfície da pá de uma turbina eólica de duas pás de eixo horizontal, as quais possibilitam a avaliação experimental da performance da turbina eólica.

Os resultados obtidos também serão comparados com outros estudos de simulação computacional do escoamento através da turbina eólica, modelada inicialmente apenas pelas pás e eixo, obtidos por (CHEN, 2012) e (MALATESTA, 2012).

Quanto à análise de resultados obtidos, no que se refere principalmente aos aspectos aerodinâmicos das pás utilizar-se-á como alicerce a abordagem apresentada por (HANSEN, 1993).

Partindo-se para a simulação computacional com domínio completo com estrutura rígida, ou seja, considerando-se a interferência do hub, nacelle, pás, torre e

solo nos aspectos aerodinâmicos da turbina eólica de três pás, os resultados serão comparados com (LI, 2011) e (WANG, 2012). Em seguida, serão feitas simulações computacionais com domínio completo e estrutura flexível, os resultados obtidos serão comparados com (CHEN, 2012) e (BAZILEVS, 2014).

Nas seções seguintes são apresentadas a revisão bibliográfica, em que são detalhados os estudos realizados em turbinas eólicas, os quais servem de base para o presente projeto de pesquisa, bem como as características gerais de uma turbina eólica de eixo horizontal; os objetivos desta tese de conclusão de curso, o planejamento temporal das atividades a serem realizadas e os resultados parciais obtidos até o presente momento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção apresentam-se características gerais das turbinas, como tipos de turbinas, componentes de uma turbina de eixo horizontal, características dos componentes ligados à aerodinâmica (pás e rotor), dimensões e condições ambientais típicas de operação das turbinas eólicas.

Há vários modelos de turbinas eólicas produzidos e comercializados atualmente. Pode-se classificar essencialmente as turbinas eólicas, conforme CBEE (CBEE, 2000), quanto ao tipo de eixo: horizontal (HAWT, do inglês *Horizontal Axis Wind Turbine*) ou vertical (VAWT, do inglês *Vertical Axis Wind Turbine*). Pode-se classificá-las também quanto ao número de pás, quanto ao gerador elétrico: gerador síncrono ou gerador de indução, e quanto à flexibilidade das pás: móveis, as quais permitem mudar a inclinação da pá em relação a direção da corrente do vento ou fixas. Apesar da grande variedade de modelos de turbinas eólicas, as mais utilizadas atualmente são as turbinas horizontais de duas pás e de três pás.

A turbina horizontal é composta essencialmente por sistema de controle de orientação do vento (Yaw Control, segundo (MALATESTA, 2012)) e de inclinação das pás (Pitch Control, segundo (MALATESTA, 2012)), torre de sustentação, nacelle, sistemas de freio, pás, rotor (Hub), gerador elétrico e caixa de redução. A Figura 6 apresenta o desenho esquemático de uma turbina de eixo horizontal de três pás, em que seus componentes estão indicados.

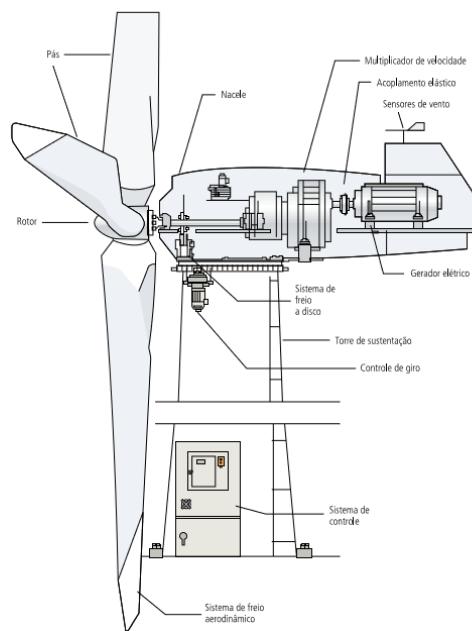


Figura 6 – Turbina eólica de eixo horizontal (MALATESTA, 2012).

As pás de uma turbina horizontal são feitas de materiais metálicos ou compósitos e projetadas com base no design de aerofólios, conforme discutido por (MASSOUE, 2007). Geralmente as pás de uma turbina são finas nas extremidades e espessas em seu núcleo, design este que gera um quociente entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto elevado e boa estabilidade. Essas características também contribuem para uma boa eficiência da turbina. Além disso o rotor ou Hub desempenha importante papel na aerodinâmica das pás, na medida em que se pode controlar tanto o direcionamento das pás com relação à corrente do vento (Yaw Control) quanto o ângulo de ataque das pás com relação ao escoamento (Pitch Control). Além disso, através do rotor controla-se a velocidade angular do movimento das pás, alterando desse modo também as características do escoamento do vento com relação às pás e, portanto a eficiência da turbina eólica.

As condições ambientais mais usuais de operação das turbinas eólicas levam em consideração correntes de ar com velocidades entre 5 m/s e 20 m/s, segundo (LEE, 2012). Para valores maiores de velocidade, fenômenos de estol ocorrem e reduzem bruscamente a eficiência da turbina. É importante ressaltar também que nessa faixa de velocidades o escoamento comporta-se como incompressível. Já com relação às dimensões de uma turbina eólica de eixo horizontal, o diâmetro das pás de projetos típicos é de 60 metros, contudo atualmente há projetos em que o diâmetro das pás

chega a mais de 120 metros, segundo (MASSOUH, 2007). Esta tese levará em consideração tais valores de referência de velocidade do vento e dimensão das pás para as simulações.

Deste modo, este projeto de pesquisa tem seus alicerces na modelagem e simulação computacional do escoamento através de turbinas eólicas de eixo horizontal de três pás, considerando-se o domínio completo, em que os efeitos da torre, solo, hub e nacelle são considerados, as pás são consideradas elásticas e por fim a escala passa a ser escala real, ao invés de escala de túnel de vento.

A validação dos resultados experimentais apresentados em NREL Unsteady Aerodynamics Phase VI (HAND, 2001), foram realizadas por (NETO, 2015), em que a turbina eólica horizontal de três pás foi modelada apenas pelas pás e eixo, conforme apresentado na figura 2 abaixo.

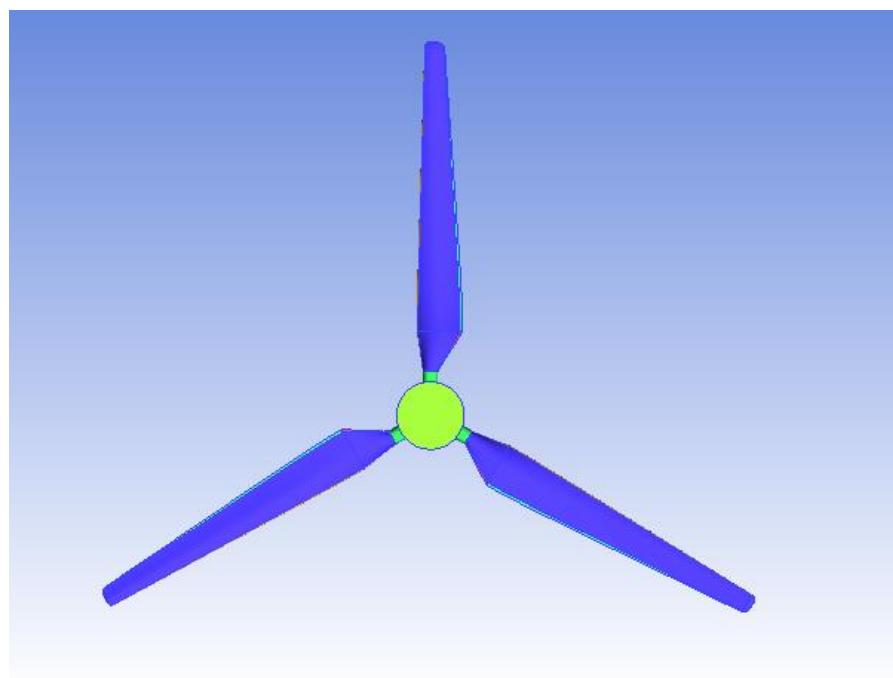


Figura 7 - Geometria da turbina de três pás (NETO, 2015)

O perfil das pás da turbina, do hub, nacelle e torre serão baseados no experimento NREL Phase VI (HAND, 2001).

As simulações com domínio completo serão baseadas nos resultados obtidos por (LI, 2011), em que foi simulado o escoamento através de uma turbina eólica de duas pás, com rotor rígido. Neste estudo utilizou-se o método da malha deslizante, em

que o domínio é particionado na malha fixa e na malha rotativa próxima às pás da turbina. Esse método de simulação será utilizado no presente estudo, utilizando-se o método dos volumes finitos com auxílio do software comercial de simulação numérica ANSYS Fluent (FLUENT, 2013).

Além disso (LI, 2011) analisa os efeitos de ângulo de arfagem na pá no desempenho aerodinâmico da turbina eólica horizontal de duas pás para o domínio completo e rotor rígido. Em complemento, (WANG, 2012) realiza estudos sobre geração de vórtices na torre induzidos pela presença da rotação das pás e analisa o efeito da torre na performance da turbina eólica.

Em continuidade às simulações computacionais do escoamento sobre a turbina eólica horizontal, modelada como estrutura rígida, o modelo da turbina eólica passa a considerar o efeito aerodinâmico da elasticidade das pás e consequentemente a mudança de performance devido à esse efeito. Estudos sobre a simulação do escoamento considerando a interação fluido-estrutural são apresentados por (CHEN, 2012) e (BAZILEVS, 2014), em que se analisa a deformação estrutural das pás influenciada pelo campo de pressões induzido pelo escoamento, bem como essa deformação altera a performance da turbina eólica.

3. OBJETIVOS

Os objetivos da tese de conclusão de curso são estabelecidos abaixo.

- Modelagem e simulação de uma turbina eólica de eixo horizontal de duas pás, considerando-se o modelo simplificado, o modelo completo com estrutura rígida e o modelo simplificado com estrutura flexível. Comparação dos resultados obtidos de performance da turbina entre os modelos e com outros resultados computacionais obtidos em publicações científicas, das referências mencionadas na seção anterior.
- Modelagem e simulação de uma turbina eólica de eixo horizontal de três pás, considerando-se o modelo simplificado e o modelo completo com estrutura rígida. Comparação dos resultados obtidos de performance da turbina entre os modelos e com os resultados obtidos de performance da turbina eólica de eixo horizontal de duas pás.
- Analisar resultados sobre distribuição de pressões sobre as pás, torque gerado sobre o rotor pela pá, condição operacional da turbina de máxima potência. Obter resultados da simulação computacional do escoamento que auxiliem o projeto de turbinas eólicas, gerando maior confiabilidade e redução de custos na geração de energia elétrica.

4. METODOLOGIA

4.1. EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DE NAVIER-STOKES E MODELOS DE TURBULÊNCIA

A modelagem computacional do escoamento do fluido foi feita através das equações diferenciais de Navier-Stokes e da equação da continuidade para escoamentos incompressíveis. Elas governam o movimento do fluido no escoamento externo através da turbina e podem ser expressas através da equação vetorial 1 e 2 respectivamente, em que p é a pressão estática, $\rho\vec{g}$ é o peso específico, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e \vec{v} o campo de velocidades do fluido.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\vec{v}) + \rho \nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

Como será discutido mais adiante essa formulação das equações diferenciais de Navier-Stokes provoca um grande encarecimento computacional para escoamentos turbulentos, com valores de Reynolds elevados, inviabilizando desse modo a simulação numérica.

Como, para o escoamento através da turbina horizontal os valores de Reynolds são elevadíssimos (da ordem de 10^6) há uma grande necessidade de reescrever as equações de Navier-Stokes através de uma nova formulação, utilizando para isso os modelos de turbulência.

O princípio do modelo de turbulência é de decompor as variáveis instantâneas (solução exata das equações de Navier-Stokes) em uma componente média e outra componente flutuante no tempo.

Para o campo de velocidades (notação matemática de Newton) u_i , decompõe-se a velocidade em seu valor médio, \bar{u}_i e sua componente flutuante \acute{u}_i , conforme expresso pela equação 3.

$$u_i = \bar{u}_i + \acute{u}_i \quad (\text{Equação 3})$$

Analogamente, para o campo de pressões e outros campos escalares, Φ :

$$\Phi = \bar{\Phi} + \hat{\Phi} \quad (\text{Equação 4})$$

Dessa forma, substituindo as equações 3 e 4 nas equações diferenciais de Navier-Stokes (Equação 1) e na equação da continuidade (Equação 2), obtém-se as equações 5 e 6 respectivamente, também conhecidas por *Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations*.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (\text{Equação 5})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (\text{Equação 6})$$

Essas equações diferenciais (Equações 5 e 6) possuem o mesmo formato das equações 1 e 2, contudo agora as variáveis do escoamento são expressas por seu valor médio. Além disso, a equação 5 evidencia um termo decorrente da turbulência, $(-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)$ denominado tensões de Reynolds.

Desse modo a função dos modelos de turbulência é quantificar o valor desse termo. Dentro os vários modelos de turbulência existentes, utilizaram-se três modelos disponíveis no software ANSYS Fluent: Spalart-Allmaras, k- ϵ e k- ω SST (ANSYS, 2013).

No modelo de turbulência Spalart-Allmaras apenas a Equação 7 é resolvida para modelar a equação de transporte para a viscosidade turbulenta. Esse modelo de turbulência tem apresentado bons resultados para escoamentos sobre perfis, cuja camada limite estão sujeitas a gradientes de pressão adversos (ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} \bar{u}_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{v}} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que G_v é a produção de viscosidade turbulenta, Y_v representa a destruição de viscosidade turbulenta, $\sigma_{\tilde{v}}$ e C_{b2} são constantes, $S_{\tilde{v}}$ é um termo definido na simulação.

No modelo de turbulência k- ϵ , duas equações são resolvidas para a energia cinética turbulenta (k) e para a taxa de dissipação (ϵ). Este é um modelo de turbulência amplamente utilizado em softwares comerciais (ANSYS, 2013). As equações de transporte são expressas pelas equações 8 e 9.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Equação 8})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C1_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C3_\varepsilon G_b) - C2_\varepsilon \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{Equação 9})$$

Em que G_k é a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média, G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido a forças de corpo, Y_M representa a contribuição da dilatação temporal na turbulência compressível na taxa de dissipação total, $C1_\varepsilon$, $C2_\varepsilon$ e $C3_\varepsilon$ são constantes, σ_k e σ_ε são os números de turbulência de Prandtl para k e ε respectivamente, S_k e S_ε são termos definido na simulação.

Por fim tem-se o modelo de turbulência $k-\omega SST$ ou *Shear-Stress Transport k- ω (SST)*. Este modelo de turbulência fornece bons resultados para escoamentos, em que as tensões de cisalhamento sobre o corpo não são significativas, escoamentos com gradientes de pressão adversos e em que ocorrem separação da camada limite (ANSYS, 2013). As equações 10 e 11 indicam as equações de transporte para esse modelo de turbulência.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{V}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (\text{Equação 10})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \bar{V}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (\text{Equação 11})$$

Em que G_k é a geração de energia cinética turbulenta, G_ω representa a geração da taxa de dissipação específica, Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω , respectivamente, Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω respectivamente devido a turbulência, D_ω representa um termo de difusão e S_k e S_ω são termos definido na simulação.

O enfoque do presente estudo será o modelo de turbulência $k-\omega SST$, o qual apresentou-se como o modelo de melhores resultados de performance aerodinâmica avaliados por Neto (NETO, 2015).

4.2. CONDIÇÕES DE CONTORNO DO ESCOAMENTO

Para realizar a solução numérica das equações diferenciais de Navier-Stokes devem ser especificadas as condições de contorno do escoamento.

A primeira condição de contorno especifica o campo de velocidades em parte da fronteira do domínio, região que por hipótese não sofre perturbações devido a rotação da turbina eólica. Essa condição pode ser expressa pela equação 12, em que U_∞ é a velocidade da corrente de vento ao longe da turbina eólica. No presente estudo serão avaliadas faixas de velocidade do vento compreendidas em $0 \leq U_\infty \leq 20$ [m/s].

$$\vec{v}(x, y) = -U_\infty \vec{j} \quad (\text{Equação 12})$$

Outra condição de contorno utilizada nas simulações computacionais é a condição de aderência do fluido às paredes das pás da turbina, Hub, Nacelle, Torre e Solo. Essa condição de parede indica que a velocidade do fluido nos pontos de contato com a superfície é nula.

Além disso outra condição de contorno utilizada nas simulações é uma condição de contorno aplicada na fronteira de saída do fluido do volume de controle, S. Ela pode ser expressa pela equação 13, em que \vec{n} é versor normal à superfície S, Φ propriedade do escoamento; e indica que o gradiente das propriedades do fluido (exceto da pressão) deve ser nulo nessa fronteira, o que indica que o escoamento ao longe do volume de controle não sofre perturbação devido à presença da turbina eólica.

$$\nabla \Phi \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{Equação 13})$$

Já a condição de contorno de simetria, garante que uma superfície seja tratada como uma parede, sem considerar a condição de não escorregamento, isto é, essa condição garante apenas que o fluido não atravessa esta superfície. Tal condição de contorno pode ser expressa pela equação 14.

$$\nabla \vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{Equação 14})$$

Por fim tem-se as condições de contorno de malha dinâmica, a qual será inserida das simulações com interação fluido estrutural e em particular a condição de malha deslizante, utilizada em todas simulações computacionais com domínio completo.

A malha dinâmica é utilizada na modelagem de escoamentos em que as formas do domínio se alteram com o tempo. No presente estudo as pás da turbina estão em movimento rotativo, enquanto a torre e Nacelle permanecem fixos em relação ao referencial inercial terrestre. Logo torna-se necessário criar uma interface que separe o domínio rotativo que contempla as pás do domínio fixo que contempla o restante do domínio de simulação. Haja vista que esta interface entre o domínio fixo e rotativo é rígida, ou seja, não sofre deformações ao longo do tempo, utiliza-se a formulação de malha deslizante, um caso particular da malha dinâmica.

Porém no modelo de turbina eólica, o qual abrange a interação fluido estrutural, a interface entre fluido e sólido (pás da turbina) é dinâmica, haja vista que o campo de pressões do fluido provoca deformações elásticas nas pás da turbina, deste modo alterando sua forma. Em ambos os casos a malha é computada a cada instante de tempo, respeitando o tempo de discretização temporal.

Deste modo a formulação da malha dinâmica é realizada através da equação 15, em que ϕ é um escalar genérico num volume arbitrário de controle V , ρ é a massa específica do fluido, \vec{u} é a velocidade do escoamento, \vec{u}_g é a velocidade de deslocamento da malha, Γ é o coeficiente de difusão e S_ϕ é a fonte de ϕ (ANSYS, 2013).

$$\frac{d}{dt} \int \rho \phi \, dV + \int \rho \phi (\vec{u} - \vec{u}_g) \cdot d\vec{A} = \int \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int S_\phi \, dV \quad (\text{Equação 15})$$

4.3. COMPOSIÇÃO ESTRUTURAL DA PÁ

Conforme apresentado nos estudos de interação fluido-estrutura (BAZILEVS, 2012), apenas é considerado a modelagem estrutural das pás da turbina eólica, haja vista que sua composição estrutural, a qual será discutida mais adiante, sofre restrições de projeto, tendo em vista a redução de peso da estrutura, provocando deste modo alterações significativas na deflexão das pás, a qual altera a performance aerodinâmica da turbina eólica. Deste modo, outros elementos que compõe a turbina eólica, como nacelle e torre serão modelados como rígidos, pois além dos carregamentos dinâmicos provocados pelo escoamento do fluido incidentes sobre estas estruturas serem de

menor magnitude, a composição estrutural de tais componentes não sofre restrições rígidas de projeto, da mesma forma que as pás da turbina eólica.

Conforme estudo sobre composição estrutural das pás da turbina eólica (SCHAFFARCZYK, 2014), essas são fabricadas com materiais compósitos de matriz polimérica, sobretudo fibras de vidro (GFRP) e fibras de carbono (CFRP), tendo sua estrutura interna apresentada na figura abaixo. Nela é possível identificar que as pás da turbina eólica podem ser modeladas como uma casca com reforçadores internos, os quais são responsáveis pelo aumento de resistência à torção e flambagem do perfil.

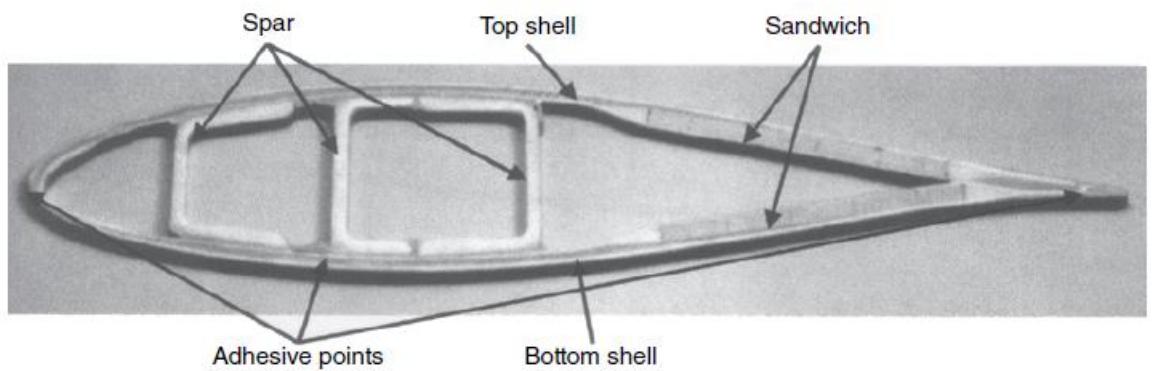


Figura 8 - Vista em corte da composição estrutural da pá da turbina eólica
(SCHAFFARCZYK, 2012)

4.4. MODELAGEM ESTRUTURAL – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Conforme exposto acima sobre as considerações estruturais, as deflexões causadas pelo campo de pressões do escoamento sobre a pá são de pequena magnitude, de modo que a pá pode ser modelada, considerando-se a hipótese de linearidade geométrica. Deste modo, conforme apontado no manual do software ANSYS Mechanical (ANSYS, 2013):

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1}\{\sigma\} \quad (\text{Equação 16})$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-v_{xy}}{E_x} & \frac{-v_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & \frac{-v_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{zx}}{E_z} & \frac{-v_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 17})$$

Em que:

$\varepsilon_{x,y,z}$: Alongamento das fibras nas direções x , y e z

$\gamma_{xy,yz,xz}$: Distorção das fibras nos planos xy , yz e xz

$E_{x,y,z}$: Módulo de elasticidade nas direções x , y e z

$G_{xy,yz,xz}$: Módulo de cisalhamento nos planos xy , yz e xz

Para integração do campo de tensões e deformações ao longo da estrutura da pá, através do método dos elementos finitos, tem-se que:

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1}\{\sigma\}$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que:

$[B]$: Matriz de deslocamento de tensão avaliado no ponto de integração

$\{u\}$: Vetor de deslocamento nodal

5. RESULTADOS

5.1. ESTUDOS COM PERFIS BIDIMENSIONAIS

Inicialmente, mostrou-se necessário fundamentar os conhecimentos sobre aspectos aerodinâmicos na teoria dos escoamentos ao redor de aerofólios. A consolidação desses conhecimentos sobre os escoamentos externos sobre perfis carenados é de extrema importância para a obtenção das premissas de simulação fluido computacional para o modelo tridimensional.

Deste modo, foram realizadas simulações bidimensionais através de aerofólios da família NACA (em especial NACA0012) com o objetivo de estudar a influência do número de Reynolds sobre o coeficiente de arrasto e de sustentação do perfil, bem como analisar a diminuição da espessura da camada limite com aumento do número de Reynolds. Haja vista esse fenômeno de afinamento da camada limite, os cuidados com a elaboração de uma malha refinada e acurada nas proximidades da parede do corpo mostraram-se de extrema importância na validação de resultados.

Em seguida dando continuidade ao estudo dos aspectos aerodinâmicos, avaliou-se em paralelo à variação do número de Reynolds a implementação de modelos de turbulência com a finalidade de se diminuir o número de elementos da malha de volumes finitos utilizada nas simulações computacionais. Como será analisado adiante verificou-se que uma malha acurada para as simulações exige cuidados em especial com o refinamento de volumes finitos nas regiões próximas ao perfil, sobretudo com a implementação de modelos de turbulência nas simulações (K- ω SST, S.A. e K- ε).

Além da variação do número de Reynolds outro aspecto importante avaliado foi a variação do coeficiente de arrasto e do coeficiente de sustentação com a variação do ângulo de ataque do escoamento, definido como o ângulo formado entre a corda do aerofólio e a direção do escoamento, bem como a ocorrência do fenômeno de estol para altos valores de ângulos de ataque. Este fenômeno ocorre quando há um descolamento antecipado da camada limite sobre o perfil, causando uma região de baixa pressão sobre o extradorso do perfil, provocando aumento da força de arrasto e

queda da força de sustentação do corpo. Deste modo obteve-se um ângulo de ataque para o qual tem-se o maior valor possível de sustentação aerodinâmica sobre o corpo e a partir do qual inicia-se o fenômeno de estol.

5.1.1. GEOMETRIA E DOMÍNIO DA SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL

O domínio para esse estudo é uma região parabólica, cujas dimensões características são denominadas Lj , Lm e Lw (veja figura 9 abaixo).

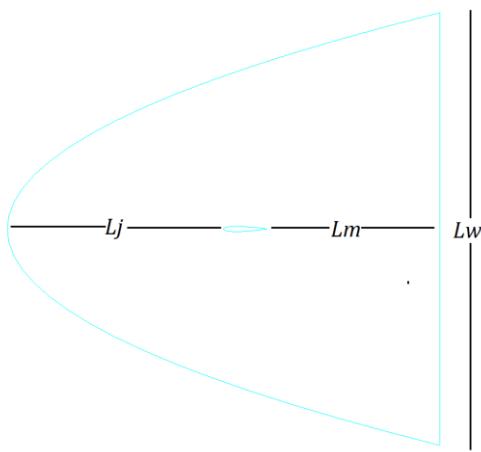


Figura 9 - Domínio para a simulação bidimensional

5.1.2. MALHA DE VOLUMES FINITOS

Para a simulação computacional do escoamento bidimensional sobre o aerofólio NACA0012 deve-se garantir um bom refinamento da malha na camada limite do aerofólio, a fim de se garantir uma boa convergência dos resultados, bem como valores mais reais de coeficiente de sustentação e do coeficiente de arrasto para o aerofólio. Tal refinamento da malha na região próxima à superfície do aerofólio torna-se necessária, haja vista que há um grande gradiente de velocidades nessa região.

Na região próxima da camada limite foi elaborada uma malha estruturada com elementos retangulares perpendiculares à superfície do aerofólio. Para estimar-se o tamanho do primeiro elemento, utilizou-se o conceito de $y+$, distância adimensional de parede, o qual fornece, dadas as condições do escoamento, o valor da espessura desse primeiro elemento da malha de volumes finitos.

A distância adimensional de parede, ou y^+ pode ser definida pela equação 19, em que u^* é a velocidade de atrito (componente na direção tangencial à parede) da parede mais próxima, y é a distância até a parede mais próxima e ν a viscosidade cinemática local do fluido.

$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \quad (\text{Equação 19})$$

Para estimar o número de elementos necessários, bem como a taxa de crescimento da espessura dos elementos na malha, tornou-se necessária a especificação do modelo de turbulência na simulação, haja vista que cada modelo de turbulência, para garantir bons resultados, exige uma boa estruturação da malha na região próxima à superfície do corpo.

Já nas regiões mais distantes do corpo a malha elaborada foi não estruturada, constituída de elementos triangulares, o que apesar de encarecer o custo computacional, na medida que aumenta o número de elementos finitos, facilita a construção dessa malha. A figura 10 mostra a malha de elementos gerada sobre o aerofólio NACA0012.

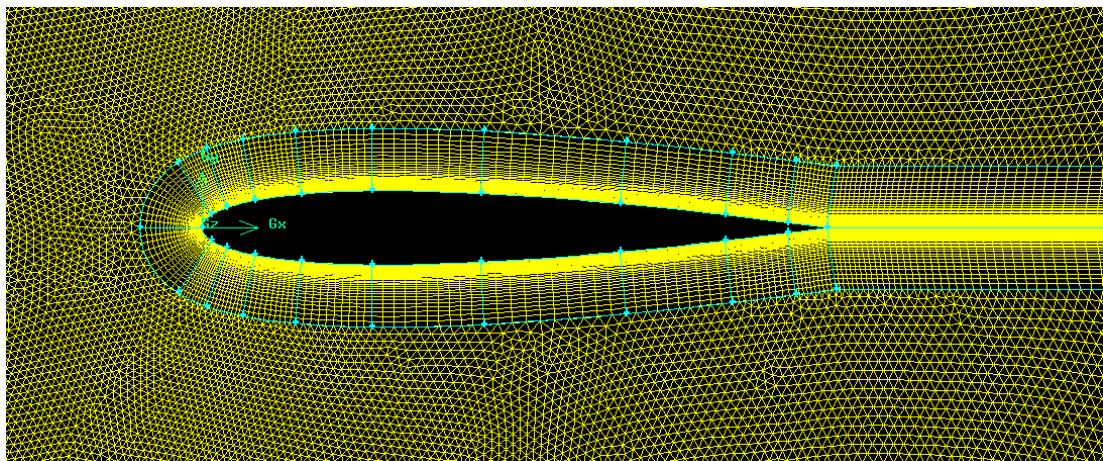


Figura 10 - Malha de volumes finitos

5.1.3. SIMULAÇÕES BIDIMENSIONAIS

5.1.3.1. Estudo de variação de performance aerodinâmica com a variação nas dimensões do domínio

Inicialmente foram realizadas simulações computacionais de escoamentos sobre o aerofólio NACA0012. Como teste inicial desejava-se avaliar a variação dos coeficientes de arrasto e sustentação a partir da variação das dimensões do domínio e consequentemente do número de elementos da malha.

Para essas simulações, o ângulo de ataque do escoamento sobre o aerofólio foi de 6° , e o número de Reynolds característico do escoamento externo foi de 500. Além disso, por tratar-se de um escoamento com baixo número de Reynolds, as simulações foram em regime permanente e laminar (ou seja, sem utilização de um modelo de turbulência).

Realizaram-se quatro testes para avaliar a variação dos coeficientes de arrasto e sustentação com a variação do número de elementos da malha. Primeiramente variou-se o número de elementos da malha e computou-se a variação percentual entre os coeficientes de arrasto e sustentação entre duas simulações consecutivas. Nos demais testes variou-se uma das dimensões características do domínio, mantendo-se as demais fixas e computou-se também a variação percentual dos coeficientes. Os resultados obtidos podem ser expressos na tabela 1 a 4, em que N corresponde ao número de elementos da malha, Cl ao coeficiente de sustentação, Cd ao coeficiente de arrasto, ΔCl à variação percentual do coeficiente de arrasto e ΔCd à variação percentual do coeficiente de arrasto.

Tabela 1 - Variação do número de elementos da malha (teste 1)

N	Cl	Cd	ΔCl	ΔCd
45546	0,36968	0,17190	-	-
66512	0,36434	0,17058	1,44%	0,77%
92300	0,36029	0,16971	1,11%	0,51%
100008	0,36007	0,16965	0,06%	0,03%

Tabela 2 - Variação da dimensão Lw do domínio (teste 2)

<i>Lw</i>	<i>Cl</i>	<i>Cd</i>	<i>ΔCl</i>	<i>ΔCd</i>
10	0,35725	0,16955	-	-
12	0,35698	0,16947	0,08%	0,05%
14	0,35610	0,16919	0,25%	0,17%

Tabela 3 - Variação da dimensão L_m do domínio (teste 3)

<i>Lm</i>	<i>Cl</i>	<i>Cd</i>	<i>ΔCl</i>	<i>ΔCd</i>
5	0,35591	0,16918	-	-
7	0,35729	0,16844	0,39%	0,44%
9	0,35577	0,16788	0,43%	0,33%

Tabela 4 - Variação da dimensão L_j do domínio (teste 4)

<i>Lj</i>	<i>Cl</i>	<i>Cd</i>	<i>ΔCl</i>	<i>ΔCd</i>
12	0,35596	0,16805	-	-
14	0,35515	0,16806	0,23%	0,01%
16	0,35640	0,16818	0,35%	0,07%

A partir desses resultados pode-se estimar as dimensões finais do domínio, utilizadas para as demais simulações realizadas: $L_m = 10$, $L_j = 15$, $L_w = 15$. O critério utilizado para a convergência do tamanho do domínio foi da variação percentual do coeficiente de arrasto e do coeficiente de sustentação entre duas simulações sucessivas menor ou igual a 1%.

5.1.3.2. Curvas de coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque

Além desses testes, utilizando a malha mais refinada resultante do estudo do efeito das dimensões do domínio na performance aerodinâmica do aerofólio, realizou-se o estudo da variação dos coeficientes de arrasto e sustentação em função da variação do ângulo de ataque no aerofólio. Realizaram-se simulações variando-se o ângulo de ataque entre 0° e 20° , em regime permanente, escoamento laminar e $Re=500$; obtendo-se os resultados apresentados nas figuras 11 e 12.

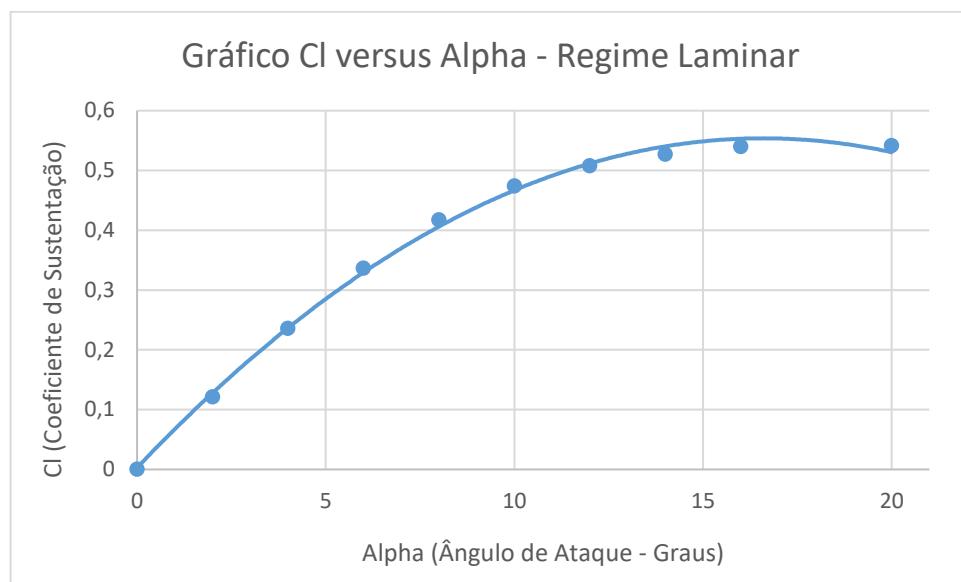


Figura 11 - Gráfico Coeficiente de Sustentação versus Ângulo de Ataque

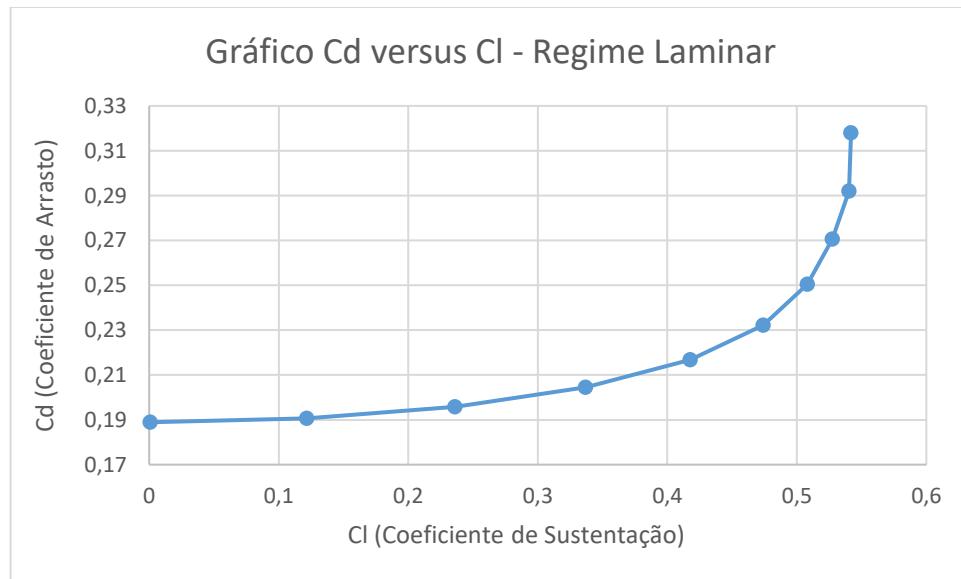


Figura 12 - Gráfico Coeficiente de Arrasto versus Coeficiente de Sustentação

Das figuras 11 e 12 conclui-se que há um aumento do coeficiente de sustentação com o aumento do ângulo de ataque, até o ângulo de 16° aproximadamente, em que começa a ocorrer o fenômeno de estol. Já o coeficiente de arrasto cresce continuamente com o ângulo de ataque. Esses dois efeitos em conjunto podem fornecer uma relação ótima de máximo valor da relação Cl/Cd, desejável em estruturas aeronáuticas; partindo-se dos valores obtidos nas simulações computacionais, obteve-se a máxima relação Cl/Cd igual a 2.04 com o ângulo de ataque igual a 6°.

Para valores elevados de ângulos de ataque do escoamento sobre o aerofólio, ocorre o fenômeno de estol, caracterizado pelo descolamento antecipado da camada limite do escoamento, devido ao gradiente de pressão adverso presente ao longo do extradorso da asa. Este descolamento provoca uma região de baixa pressão sobre todo extradorso do aerofólio gerando um grande aumento do arrasto de pressão sobre o corpo carenado, bem como a queda da sustentação sobre o perfil.

Plotou-se também o gráfico do coeficiente de pressão ao longo da superfície do aerofólio, para o ângulo de ataque $\alpha=6^\circ$ (Figura 13). De posse desse gráfico podemos inferir nitidamente as regiões de baixa pressão no extradorso e alta pressão no intradorso do aerofólio.

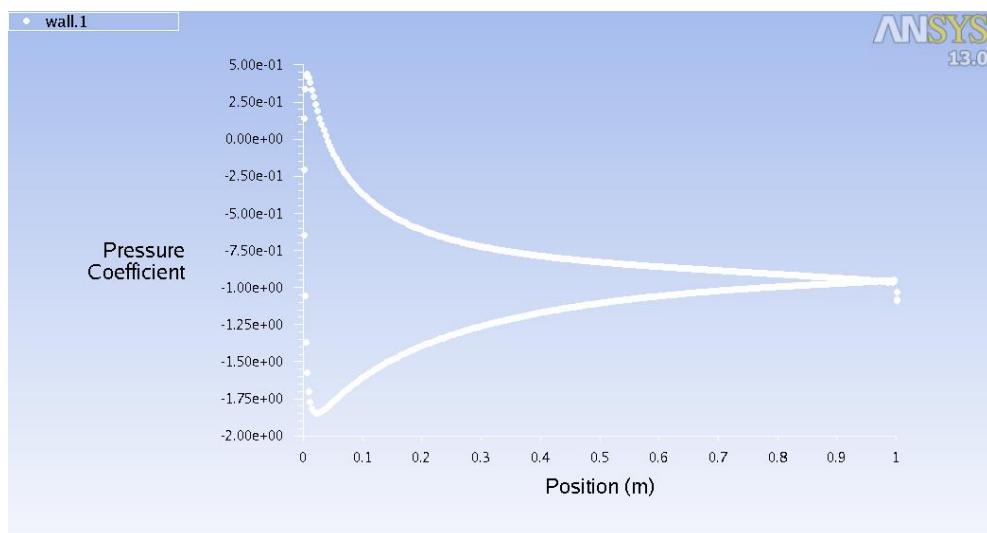


Figura 13 - Distribuição de C_p ao longo da superfície do aerofólio NACA0012 ($\alpha=6^\circ$, $Re=500$)

5.1.3.3. Estudo da utilização de modelos de turbulência para escoamentos com valores de Reynolds elevados

Conforme o valor do número de Reynolds do escoamento torna-se mais elevado, a utilização de modelos de turbulência torna-se necessário com o intuito de diminuir o refinamento da malha de volumes finitos.

Com os modelos de turbulência – viscosidade, obtém-se uma solução da média temporal do campo de velocidades e pressões. Dentre tais modelos de turbulência, três

usualmente utilizados foram comparados nas simulações através do aerofólio NACA0012: K- ϵ , K- ω SST e Spalart – Allmaras.

Inicialmente levantaram-se as curvas de coeficiente de sustentação versus ângulo de ataque (Figura 14) e de coeficiente de arrasto versus coeficiente de sustentação (Figura 15) para os três modelos de turbulência, utilizando o aerofólio NACA0012, escoamento em regime permanente e número de Reynolds característico do escoamento igual a 100.000. Partindo-se dos valores obtidos, fez-se uma análise comparativa entre os modelos de turbulência e os valores experimentalmente obtidos por Abbott [ABBOTT, 1959], para verificar qual modelo de turbulência apresentava melhores resultados de coeficiente de arrasto e de coeficiente de sustentação.

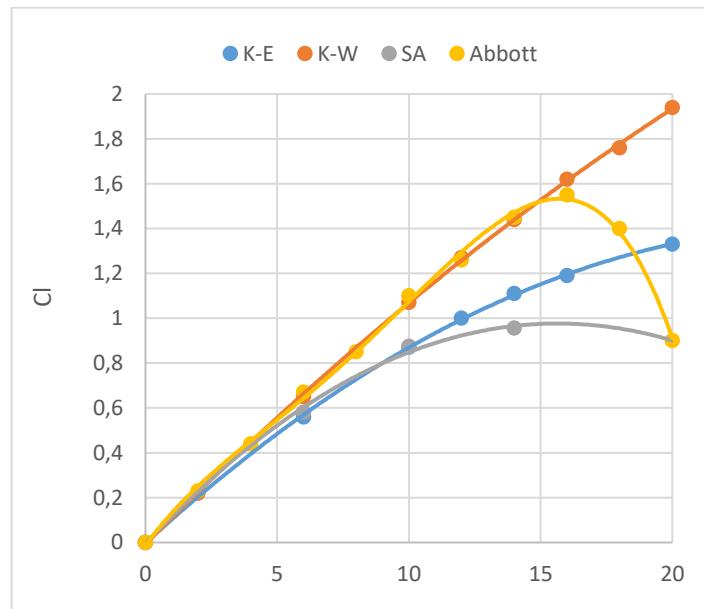


Figura 14 - Gráfico Coeficiente de Sustentação versus ângulo de Ataque (Re = 100.000)

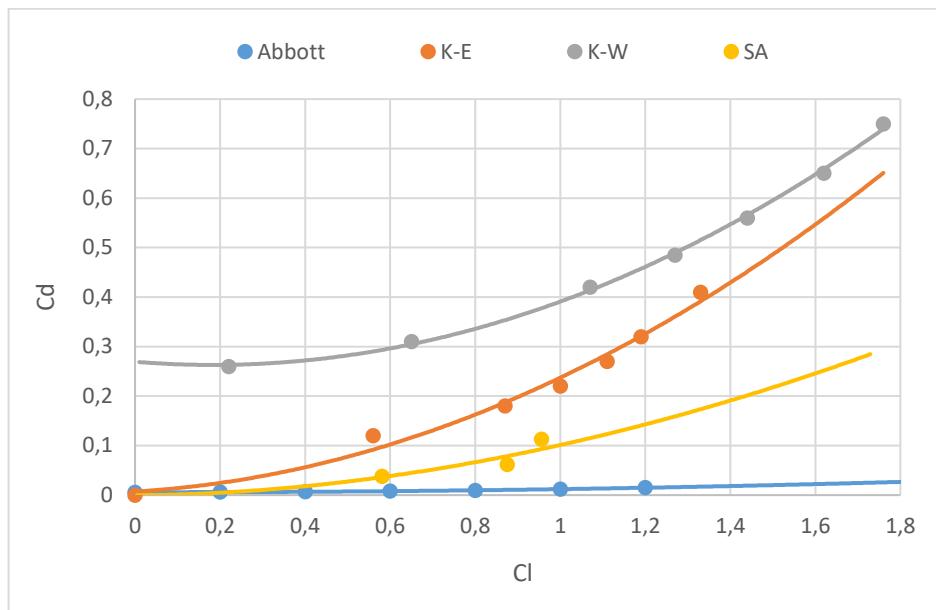


Figura 15 - Gráfico Coeficiente de Arrasto versus Coeficiente de Sustentação ($Re = 100.000$)

As figuras 16 e 17 apresentam, respectivamente os campos de velocidade e de pressão médios do escoamento para uma simulação em regime permanente, com ângulo de ataque igual a 10° , $Re = 100.000$ e modelo de turbulência $K-\omega$ SST.

Os valores de coeficiente de arrasto e de sustentação para essa simulação foram: $C_d = 0.15649$ e $C_l = 0.897$, indicando um valor abaixo do esperado segundo Abbott [ABBOTT, 1959]: variação de 15% para C_l e um valor cerca de 150 vezes maior para C_d .

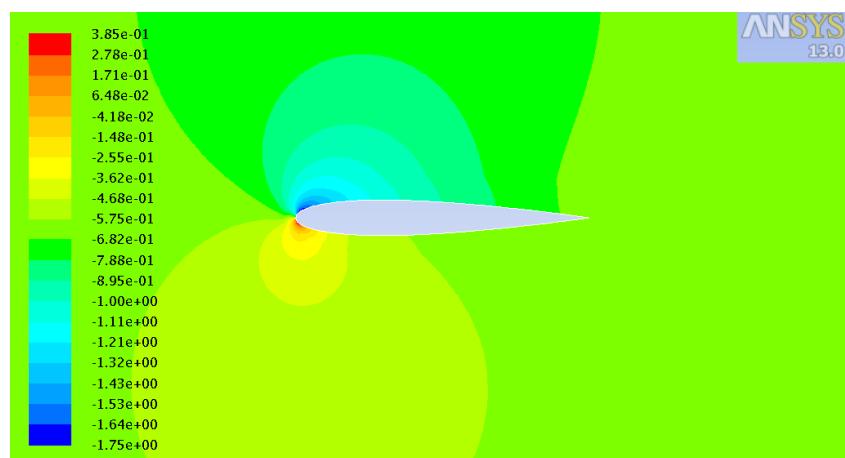


Figura 16 - Contornos de pressão estática sobre o aerofólio NACA0012 ($\alpha = 10^\circ$, $Re = 10^5$, $K-\omega$ SST)

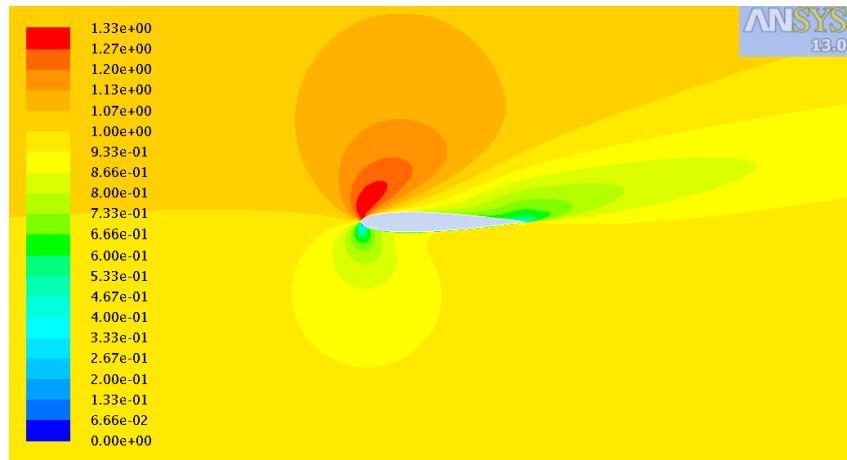


Figura 17 - Contornos de velocidade sobre o aerofólio NACA0012 ($\alpha = 10^\circ$, $Re = 10^5$, K- ω SST)

A partir dos resultados obtidos pelos respectivos modelos de turbulência, conclui-se que o modelo K- ω SST apresentou os melhores resultados para o coeficiente de sustentação, em torno de 10% menor que o esperado por Abbott.

Esses resultados do modelo K- ω se mostraram compatíveis com os resultados experimentais até o valor de ângulo de ataque de 16° , valor que confere máximo valor teórico do coeficiente de sustentação, para o qual para ângulos de ataque maiores, começa a ocorrer estol no aerofólio. Entretanto, conforme verifica-se na figura 15, a partir de 16° , os valores de coeficiente de sustentação continuam a crescer, o que indica que a não ocorrência de estol no aerofólio.

Deste modo, adotou-se o modelo de turbulência K- ω SST como modelo de referência para as simulações tridimensionais da turbina eólica.

5.2. MODELO TRIDIMENSIONAL RÍGIDO DA TURBINA EÓLICA

Um modelo tridimensional da turbina eólica foi gerado em CAD, baseando-se na geometria simulada em túnel de vento no experimento NREL Unsteady Aerodynamics Phase VI (HAND, 2001). A turbina eólica foi modelada através de seus principais componentes: Pás, Hub, Nacelle e Torre.

A partir do modelo tridimensional gerado em CAD, gerou-se o domínio em que o escoamento é computado. As dimensões desse domínio utilizaram como

referência os valores adotados por (MALATESTA, 2012), sendo de $2R$ na direção *upwind* e $4R$ na direção *downwind*.

A partir do domínio da simulação, gerou-se a malha de volumes finitos. A malha gerada é estruturada em toda a extensão próxima à superfície das pás, caracterizada por elementos prismáticos. Nas demais regiões do domínio, a malha de volumes finitos é não estruturada e composta por elementos tetraedrais. Devido às restrições computacionais, a malha de volumes finitos utilizada nas simulações possui cerca de 3.000.000 de elementos.

Partindo-se dos resultados obtidos do estudo com o aerofólio NACA0012, adotou-se para as simulações tridimensionais o modelo de turbulência $K-\omega$ SST, além de simulação em regime transiente, com passo de tempo inicial de 0,001 s, sendo o fluido ar.

Além disso, em todas as simulações tridimensionais foi adotado o algoritmo de simulação fluido computacional da família SIMPLE, com os coeficientes padrão de subrelaxação.

5.2.1. GEOMETRIA DA TURBINA E DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO

A geometria completa da turbina eólica de duas pás e de três pás foi gerada em CAD através do software Autodesk Inventor. As dimensões do Nacelle, Torre e Hub, além das pás foram retiradas do experimento NREL Phase VI (HAND, 2001). O hub foi modelado através de uma semiesfera, bem como o Nacelle através de um prisma de seção retangular. A geometria das pás da turbina é elaborada através de seções transversais, dado o perfil do aerofólio (S809), sua respectiva corda e por fim o ângulo e eixo de torção de cada um dos perfis. Detalhes sobre a geometria das pás são apresentadas pelas tabelas 6 e 7 no Anexo A.

A figura 18 abaixo representa o modelo de turbina eólica de três pás.



Figura 18 - Geometria Completa da Turbina eólica

Realizaram-se simulações computacionais considerando domínio completo para três condições de velocidade do vento, para a turbina eólica de duas pás. A figura 19 expressa o domínio do escoamento para estas simulações.

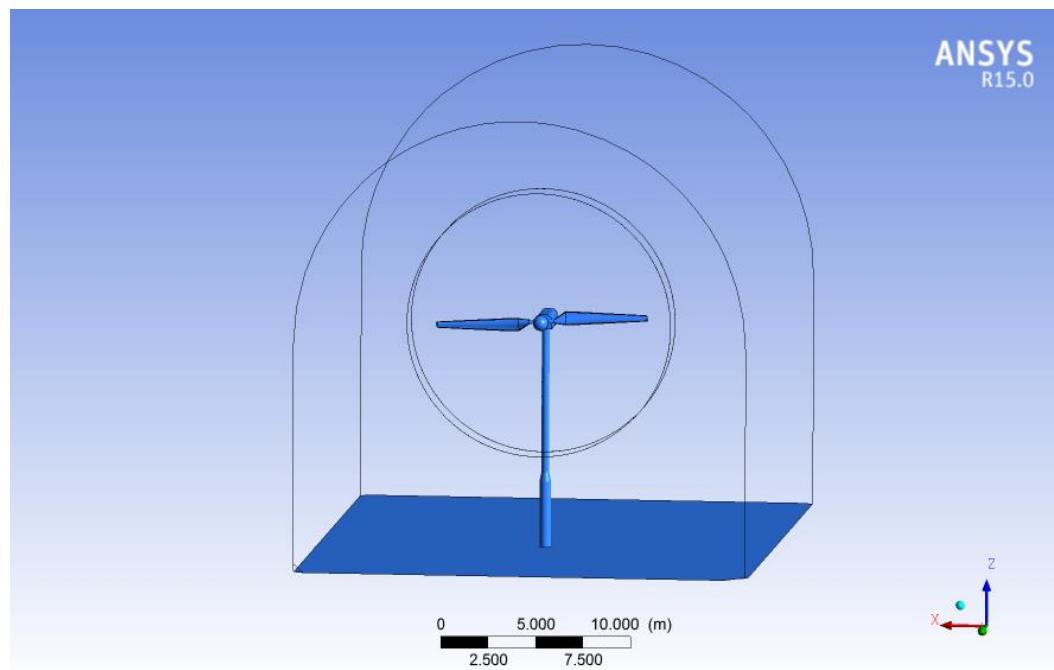


Figura 19 - Domínio de Simulação

As superfícies representadas pela cor azul possuem a condição de contorno de parede (Solo, Torre, Nacelle, Hub, Eixo e Pás), a face frontal possuí a velocidade da corrente livre do vento $\vec{v}(x, y) = -U_\infty \vec{j}$, a face lateral possuí a condição de simetria, a face posterior possuí a condição de saída do escoamento, ou gradiente nulo de pressões e, por fim, a região cilíndrica contempla a interface entre o domínio rotativo (malha deslizante) e o domínio fixo.

5.2.2. MALHA DE VOLUMES FINITOS

A malha de volumes finitos desestruturada foi gerada com o auxílio do software ANSYS IcemCfd. Nas regiões em que o gradiente do campo de pressões não é elevado, optou-se por elementos piramidais, bem como nas regiões de camada limite, para boa acurácia dos resultados de performance aerodinâmica, houve necessidade de refinamento local utilizando-se elementos prismáticos. A figura 20 indica os elementos prismáticos sobre a superfície da pás.

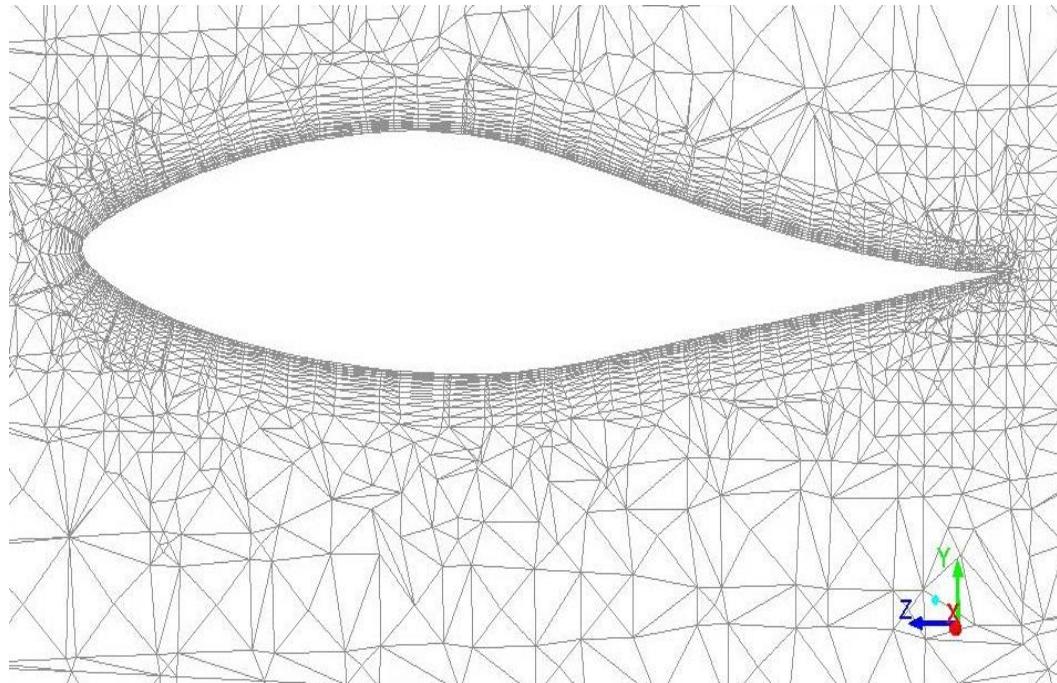


Figura 20 - Elementos prismáticos sobre a superfície da pás

5.2.3. PERFORMANCE AERODINÂMICA – 2 PÁS

Realizaram-se três simulações para a turbina eólica de duas pás, variando-se a velocidade da corrente livre do vento, utilizando escoamento em regime transiente e modelo de turbulência $k-\omega$ SST. Os resultados de visualização geral do escoamento são expressos nas figuras 21, 22 e 23.

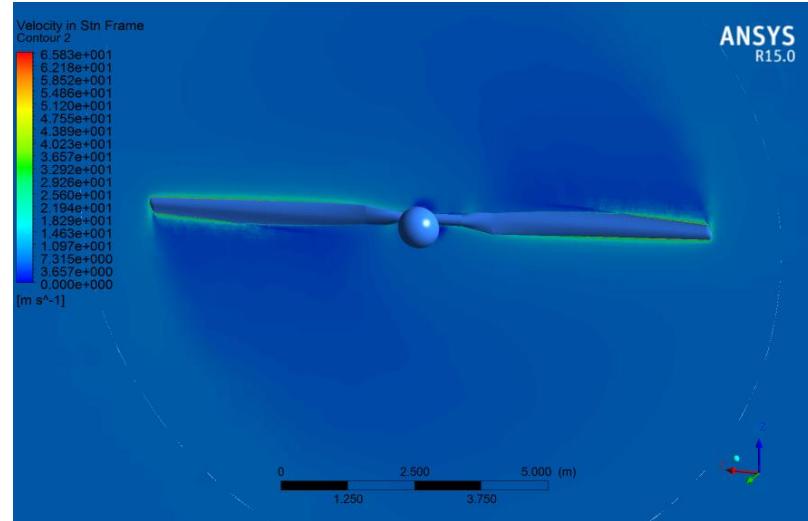


Figura 21 - Contornos de Velocidade $U_\infty = 7 \text{ m/s}$

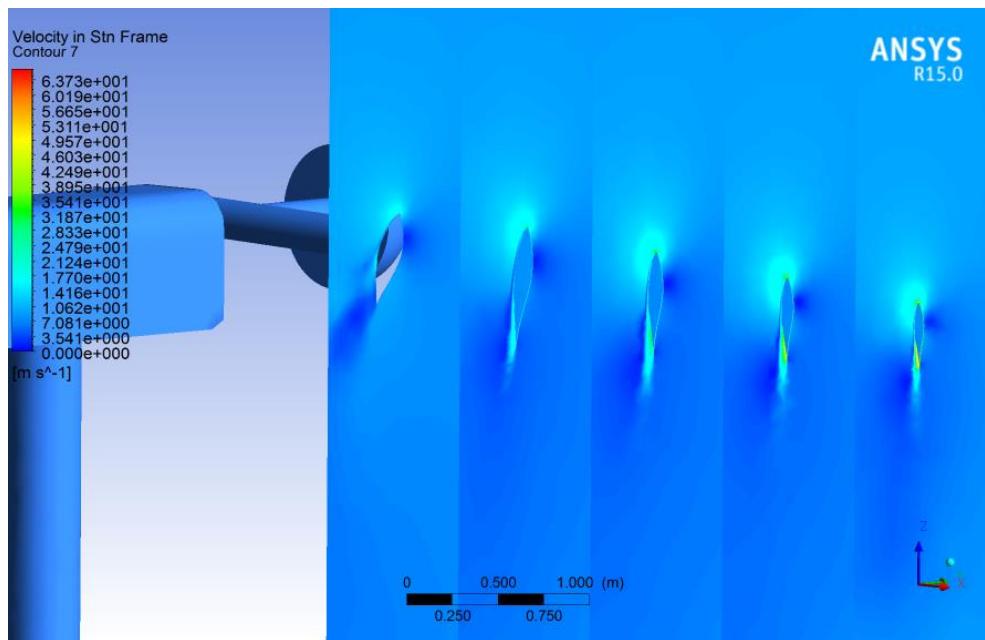


Figura 22 - Contornos de Velocidade em Seções Radiais da Pá

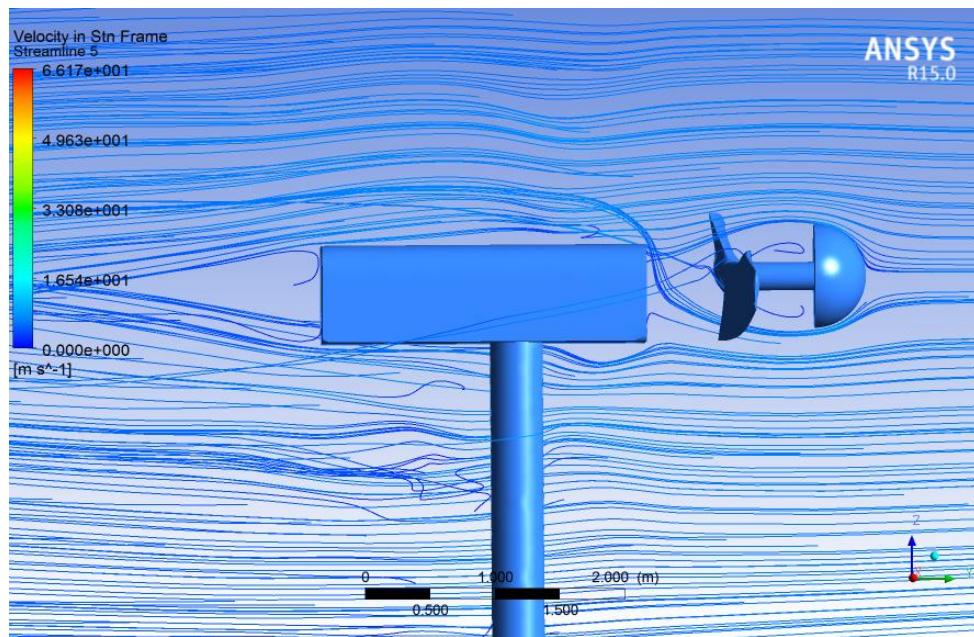


Figura 23 - Linhas de Corrente no Plano x=0

Computou-se momento das forças aerodinâmicas sobre a superfície das pás da turbina eólica, bem como a força de empuxo que a corrente de vento provoca sobre as pás da turbina eólica. Os resultados de performance aerodinâmica são expressos na figura 24, em que há uma comparação com os resultados experimentais.

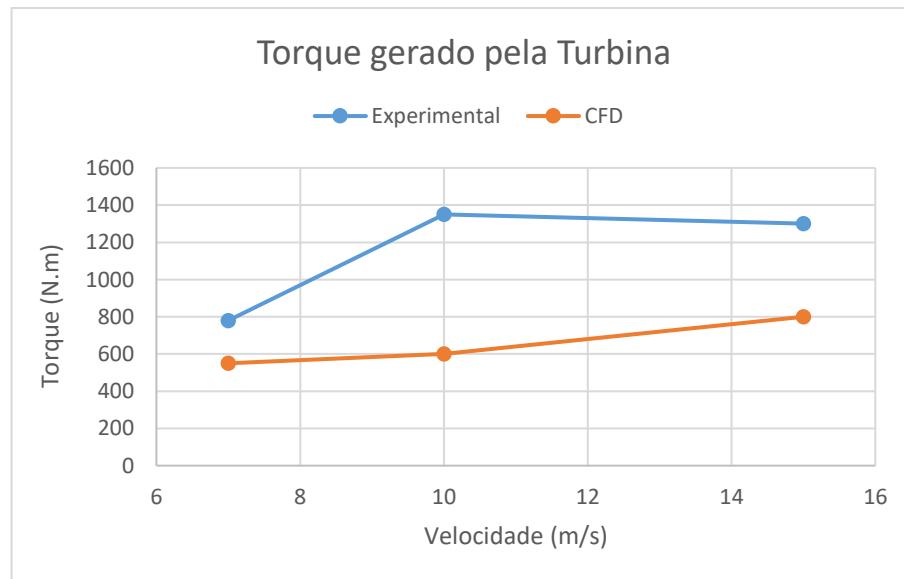


Figura 24 - Comparaçāo entre o torque gerado pela turbina via experimento e CFD

5.2.4. PERFORMANCE AERODINÂMICA – 3 PÁS

Realizaram-se simulações para a turbina eólica de três pás, utilizando escoamento em regime transitório e modelo de turbulência $k-\omega$ SST, para as velocidades da corrente do vento equivalentes a 7, 10 e 15 m/s. Os resultados de visualização geral do escoamento são expressos nas figuras 25, 26, 27 e 28. O campo de pressões sobre as faces de pressão e sucção da pá para a simulação com a velocidade da corrente livre do vento equivalente a 7 m/s é expresso na figura 29.

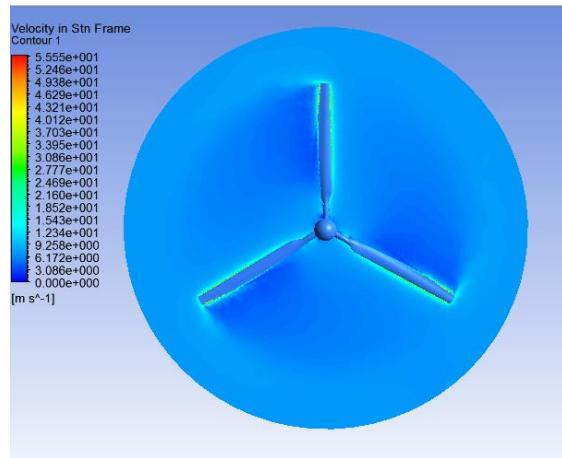


Figura 25 - Contornos de Velocidade $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$ no plano $y = 0$

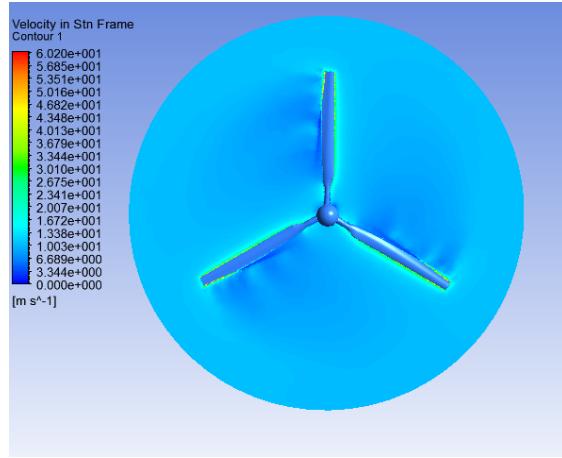


Figura 26 - Contornos de Velocidade $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ no plano $y = 0$

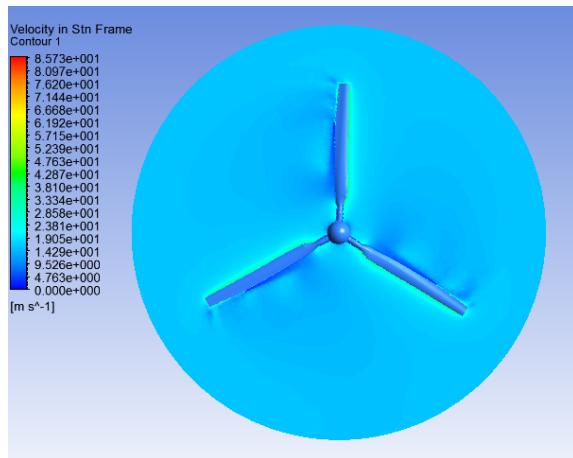


Figura 27 - Contornos de Velocidade $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$ no plano $y = 0$

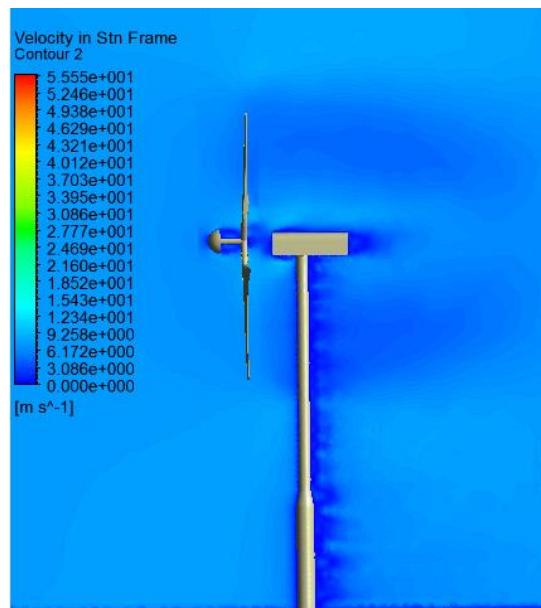
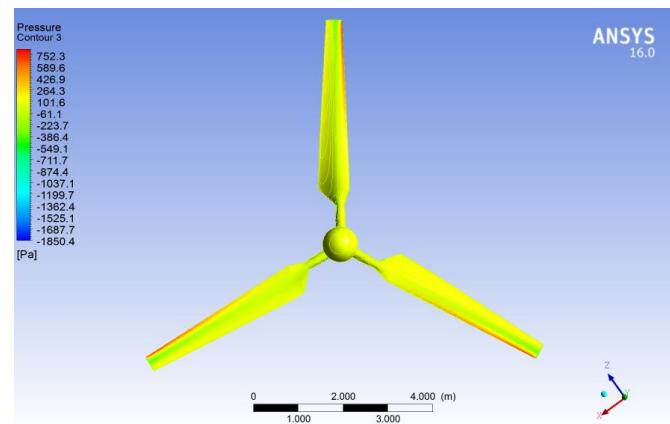


Figura 28 - Contornos de Velocidade $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$ no plano $x = 0$



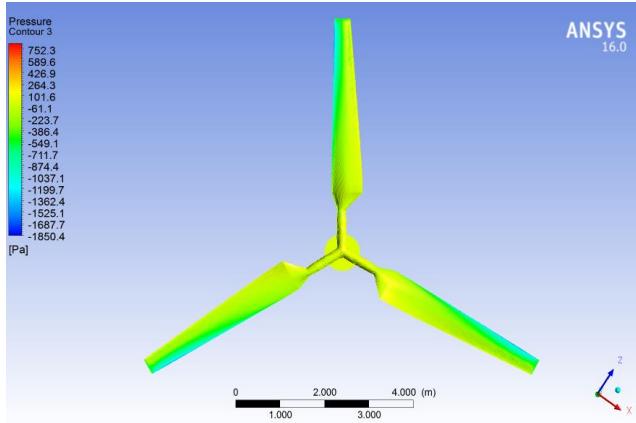


Figura 29 – Contornos de pressão na superfície da pá $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$. a) Face de pressão e
b) Face de sucção

Computou-se momento das forças aerodinâmicas sobre a superfície das pás da turbina eólica de três pás. Os resultados comparativos entre a simulação computacional das turbinas eólicas de duas e três pás é apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Comparaçao entre performance das turbinas eólicas $U_{\infty}=7 \text{ m/s}$

Resultados comparativos	Torque (N.m)	Potência (kW)	Empuxo (kN)
Turbina eólica – 2 pás	550	4,1	1,5
Turbina eólica – 3 pás	850	6,4	2,1

5.3. SIMULAÇÃO ESTÁTICA ESTRUTURAL

Com base nas premissas expressas na seção anterior, como primeira análise estrutural, considerou-se as pás da turbina eólica flexíveis e o carregamento estático, incidente sobre a face de pressão da pá dado pelo campo médio de pressões do escoamento resultantes da simulação sobre a turbina eólica de três pás para a velocidade da corrente livre equivalente a 7 m/s. Deste modo, considerou-se um carregamento de um campo de pressões na face de sucção de magnitude 2000 Pa. Além disso a estrutura da pá da turbina eólica foi inicialmente modelada como maciça, cujo material de composição é a fibra de vidro (GFRP). Como condições de contorno, considerou-se que a pá estava engastada no eixo da turbina eólica. Os resultados do campo de tensões de Von Misses é expresso abaixo:

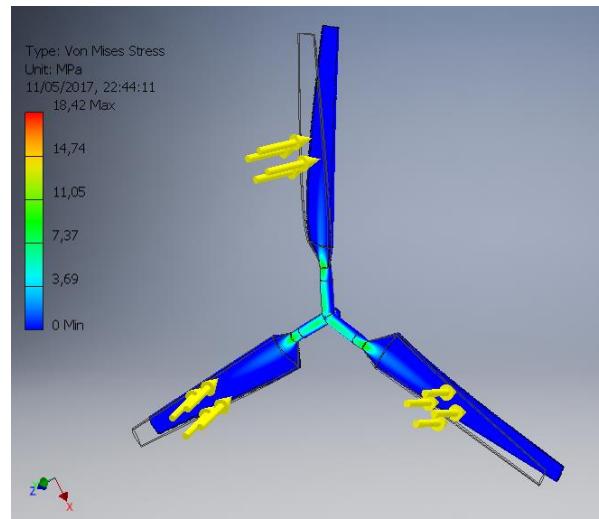


Figura 30 - Tensão de Von Misses

O campo de deslocamentos na direção y, pode ser apresentado na figura abaixo:

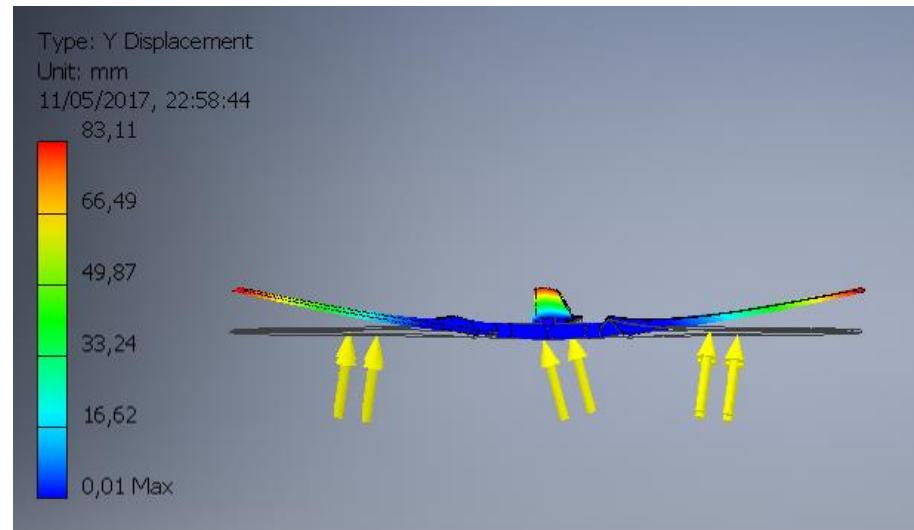


Figura 31 - Deslocamento dos nós na direção do escoamento

Além disso foi realizada a análise modal da turbina eólica, considerando-se as frequências naturais de vibração. Os resultados são apresentados nas figuras 32, 33 e 34 abaixo:

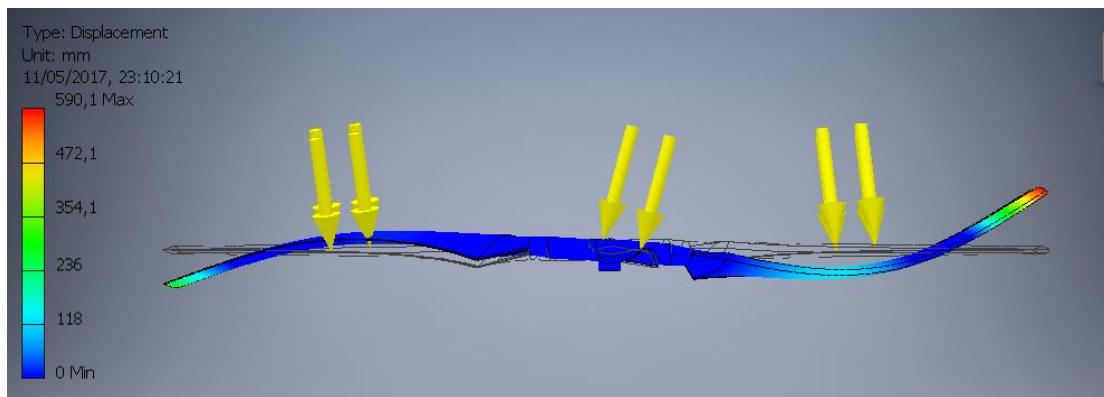


Figura 32 - 1^o Modo de vibração

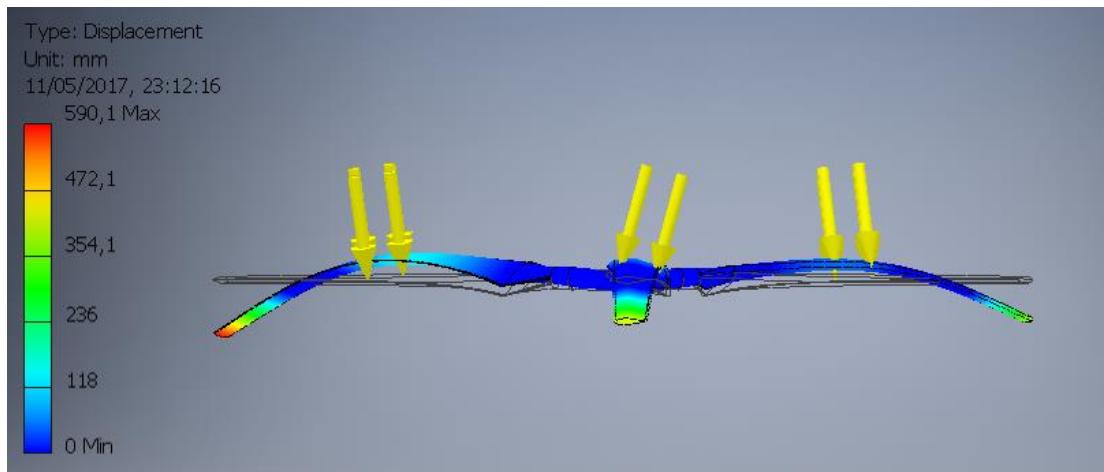


Figura 33 - 3^o Modo de vibração

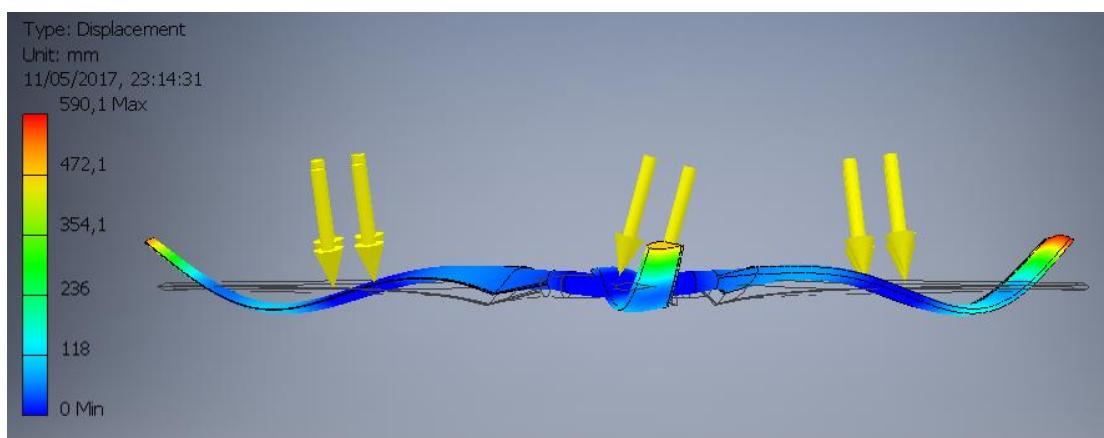


Figura 34 - 7^o Modo de vibração

Deste modo pode-se avaliar as frequências naturais de vibração da turbina eólica através da tabela 6 abaixo:

Tabela 6 - Frequências naturais dos modos de vibração da turbina eólica

Modo de vibração	Frequência natural (Hz)
1°	11,56
2°	11,58
3°	12,23
4°	28,08
5°	28,09
6°	28,11
7°	33,90
8°	37,71

5.4. SIMULAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURAL

5.4.1. TWO-WAY FLUID-STRUCTURE INTERACTION

A estratégia adotada para solução deste problema é o método *2-way fsi*, ou *Two-way fluid-structure interaction* (ANSYS, 2013). Neste método, soluciona-se concomitantemente o problema de deformação elástica mecânica da estrutura sólida e o problema da solução computacional do escoamento ao redor da estrutura sólida deformada.

Cria-se um acoplamento entre a solução desses problemas, de modo que a deformação da estrutura sólida, resolvida nesse caso com o auxílio do software de elementos finitos ANSYS Mechanical define a cada instante de tempo uma geometria, a qual é utilizada na solução computacional do escoamento ao redor da estrutura, nesse caso solucionada através do software de volumes finitos ANSYS Fluent. Por fim o campo de pressões do fluido ao longo da estrutura mecânica causa novas deformações na estrutura mecânica, reiniciando o processo iterativamente.

A figura 35 sintetiza esquematicamente o método *2-way fsi*: O bloco A é responsável pela solução do problema de deformação estrutural através do método dos elementos finitos, o bloco B é responsável pela solução do problema de solução computacional do escoamento através do método dos volumes finitos, por fim o bloco C é responsável pelo acoplamento entre as soluções obtidas nos blocos A e B.

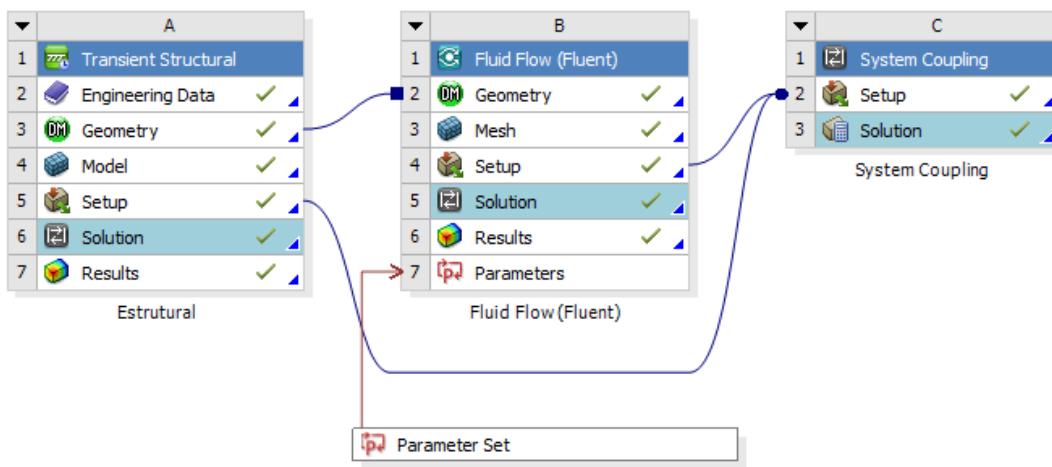


Figura 35 - Representação esquemática da interação fluido-estrutural

5.4.2. PLACA PLANA

Haja vista a complexidade presente na simulação fluido-estrutural do modelo tridimensional completo da turbina eólica, primeiramente estudou-se um problema simplificado do escoamento através de uma placa plana engastada, considerando a elasticidade no modelo.

Para a solução do problema da deformação mecânica da placa plana engastada, definiu-se o material da estrutura, a geometria e malha do sólido e por fim as condições de contorno da simulação estrutural.

Nesse caso o material da placa plana utilizado foi aço estrutural. A malha de elementos finitos gerada é mostrada na figura 36 abaixo:

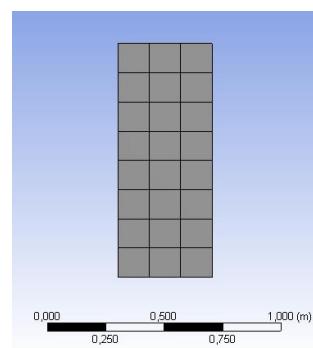


Figura 36 - Malha de elementos finitos da placa

Especificou-se as condições de contorno da simulação estrutural, conforme figura 37 abaixo. As faces x+, x- e y+ são interfaces da simulação fluido-estrutural. Nas faces z+ e z- há condição de simetria, pois o escoamento é tratado como bidimensional. A face y+ está engastada, ou seja possui deslocamentos e deformações nulas.

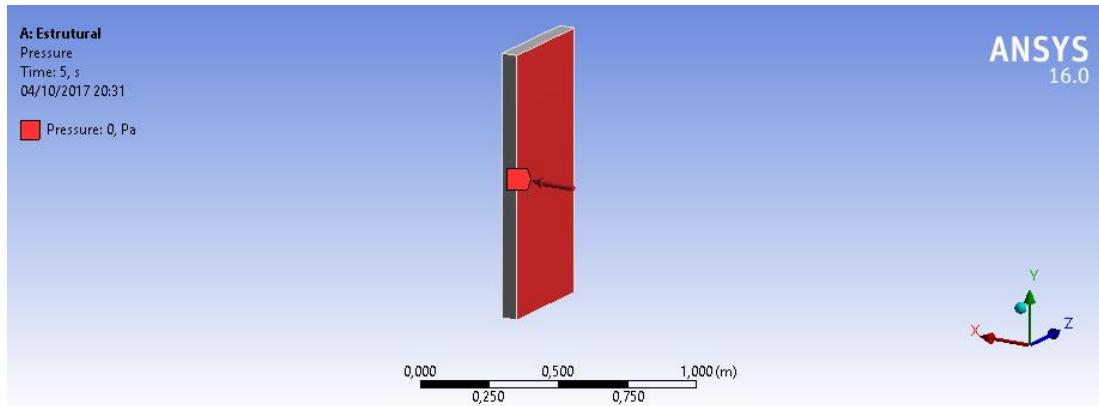


Figura 37 - Condições de contorno da simulação estrutural

Além disso na face x- atua uma pressão variante no tempo, conforme o gráfico expresso na figura 38.

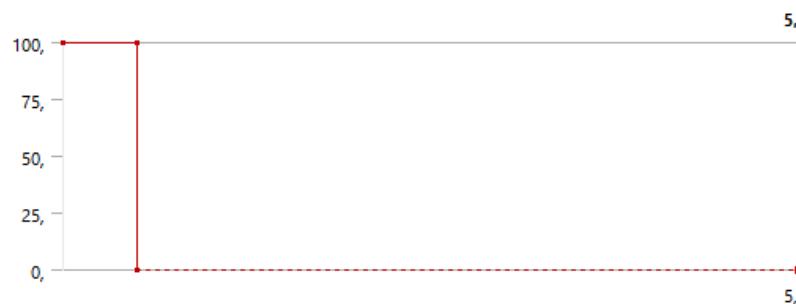


Figura 38 - Variação temporal da pressão incidente

Deste modo, têm-se os elementos necessários para a simulação estrutural. É importante destacar que a simulação fluido-estrutural ocorre em regime transiente, sendo que nas simulações o passo de tempo utilizado foi de 0,1 s e tempo total de simulação igual a 5s.

Para a solução do problema do escoamento através da placa plana engastada, definiu-se o fluido (água), a geometria e malha do domínio e por fim as condições de contorno da simulação fluido computacional.

A malha de volumes finitos gerada é mostrada na figura 39 abaixo:

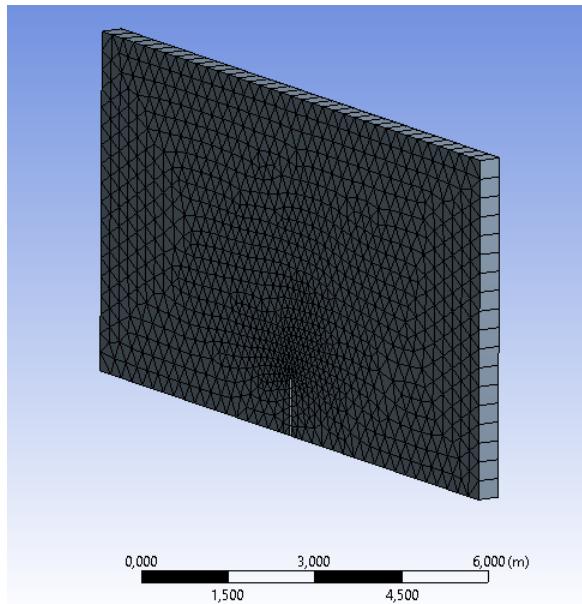


Figura 39 - Malha de volumes finitos

As condições de contorno da simulação fluido computacional foram as seguintes:

Nas faces $z+$ e $z-$ há condição de simetria, pois o escoamento é tratado como bidimensional. Nas faces $x+$, $x-$ e $y+$ possuem condição de parede. Por fim as três faces em contato com a superfície estrutural são interfaces.

A simulação utilizou como premissas: regime transiente, com passo de tempo equivalente a 0,1s, modelo de turbulência $k-\omega SST$ e algoritmos da família SIMPLE.

A figura 40 apresenta a deformação da estrutura para o instante 0,5s e a figura 41 apresenta os contornos e vetores de velocidade nesse instante de tempo.

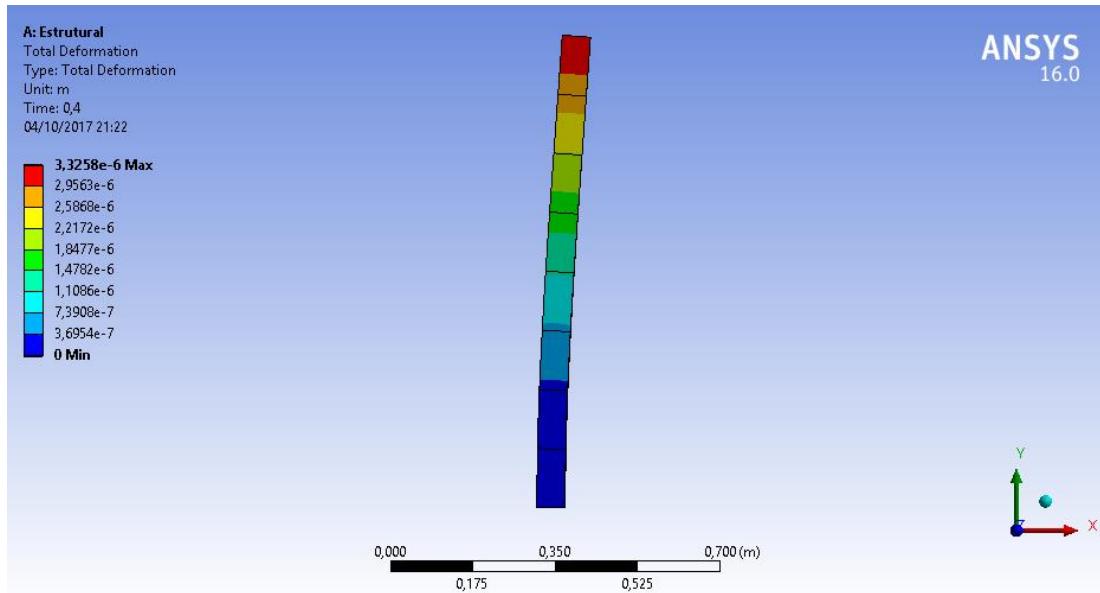


Figura 40 - Deslocamento total no instante $t=0,5s$

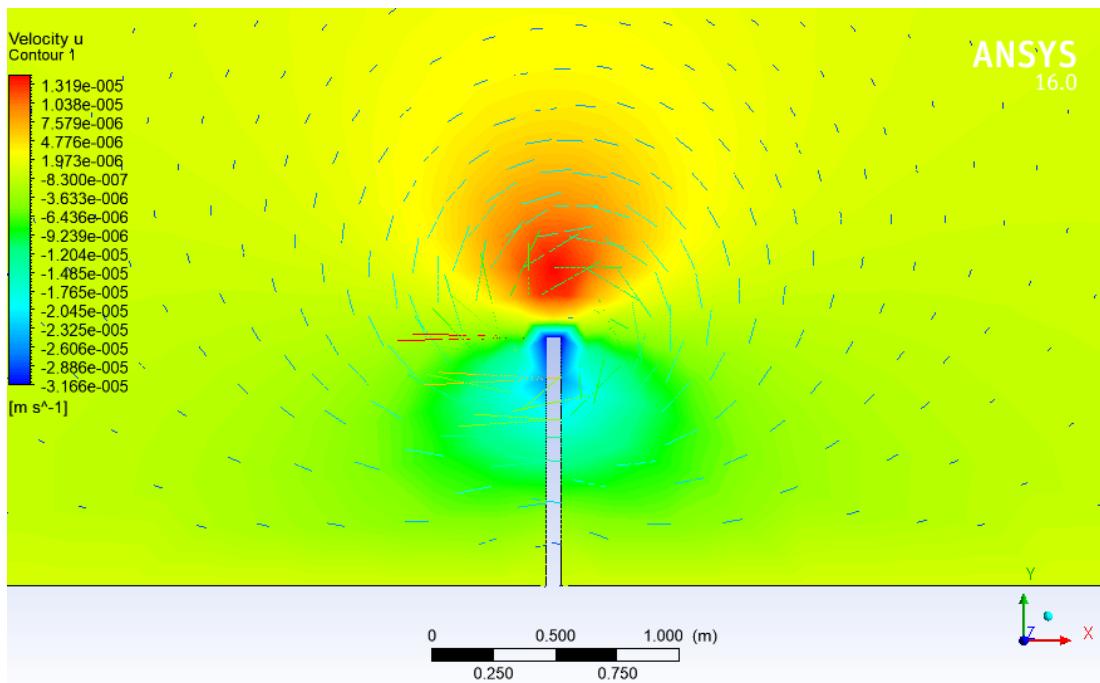


Figura 41 - Contornos de velocidade no instante $t = 0,5s$

A figura 42 apresenta o deslocamento total da ponta da placa ao longo do tempo. É possível verificar o amortecimento viscoso do fluido na oscilação da placa plana.

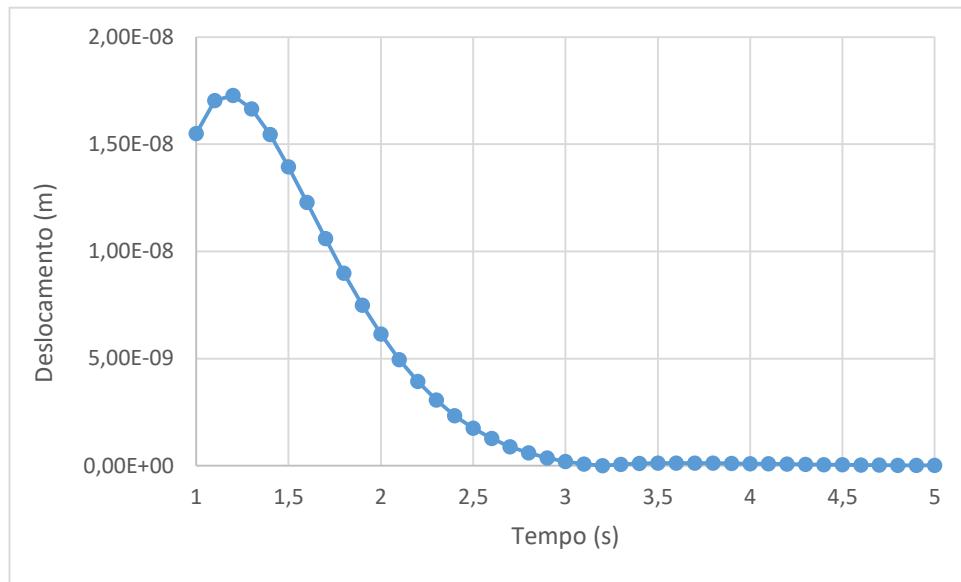


Figura 42 - Deslocamento temporal da ponta da placa plana

5.4.3. SIMULAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURAL DA TURBINA EÓLICA DE DUAS PÁS COM MODELO SIMPLIFICADO

Realizaram-se simulações fluido-estruturais para a turbina eólica de duas pás, considerando-se o modelo simplificado, utilizando escoamento em regime transiente e modelo de turbulência $k-\omega$ SST, para as velocidades da corrente do vento equivalentes a 7, 10 e 15 m/s.

O passo de tempo das simulações realizadas foi de 0,0001s e o tempo total da simulação foi de 0,05s, ou seja 500 passos de tempo. A complexidade de convergência do modelo fluido-estrutural sugeriu a escolha do solver de algoritmos da família SIMPLEC.

5.4.3.1. Velocidade da corrente livre igual a 7 m/s

A figura 43 apresenta a convergência da simulação fluido-estrutural para a velocidade da corrente livre igual a 7 m/s e os demais parâmetros da simulação explicitados acima. Neste caso há a convergência da transferência de dados do fluido

para a estrutura e da estrutura para o fluido. Verifica-se que após um certo tempo, cada passo de tempo requer apenas 1 interação.

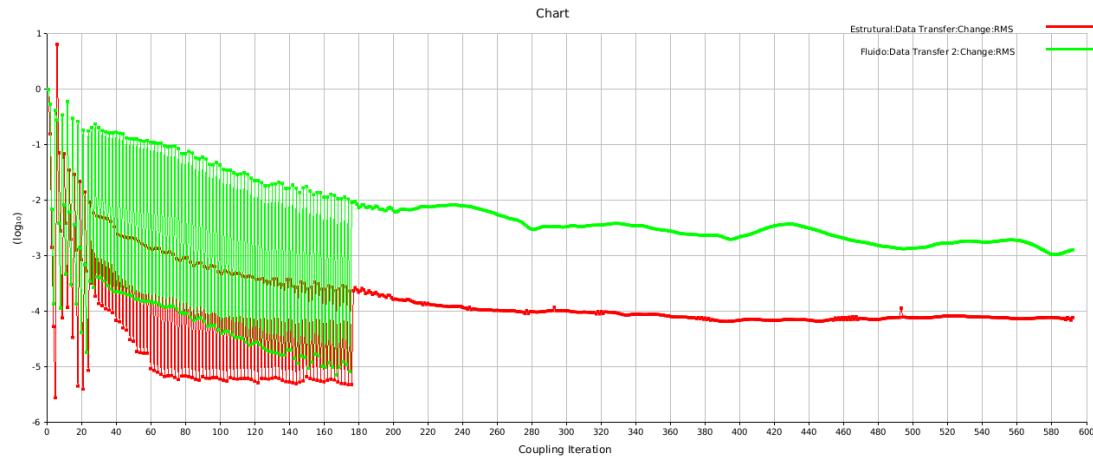


Figura 43 - Convergência da simulação fluido-estrutural para $U_\infty = 7 \text{ m/s}$

As figuras 44 e 45 apresentam a deformação da estrutura para o instante 0,05s. Como era esperado a simulação possui características de regime permanente, com a estrutura após certo tempo atingindo uma deformação constante.

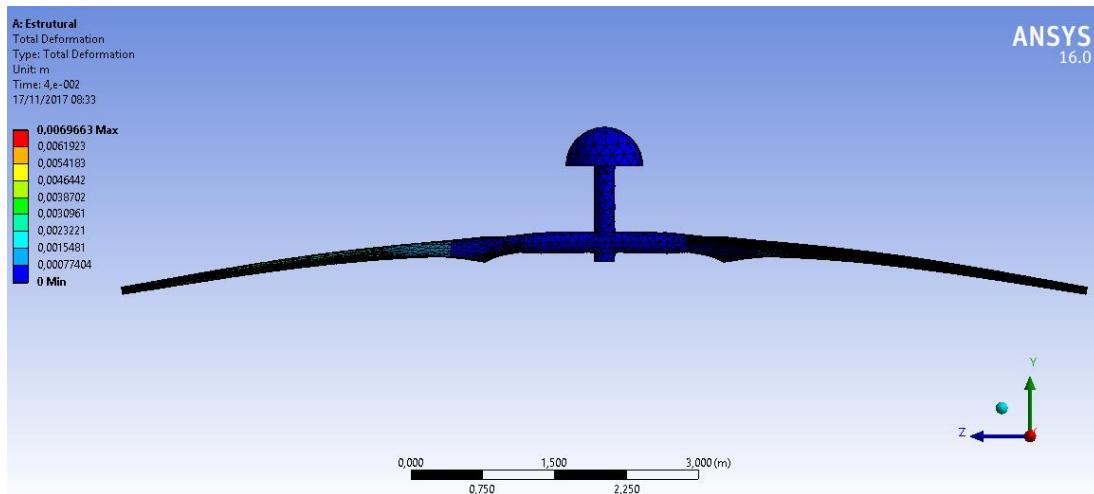


Figura 44 - Deformação total da estrutura para $U_\infty = 7 \text{ m/s}$

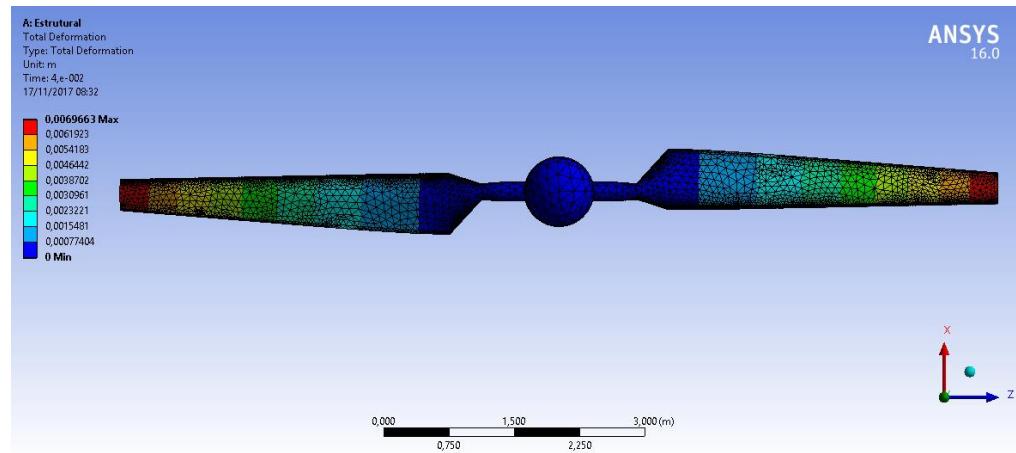


Figura 45 - Deformação total da estrutura para $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$

Os resultados de visualização geral do escoamento são expressos na figura 46. Na figura 47 é apresentado o campo de velocidades para a seção da pá localizada a uma distância radial de 3 m do eixo da turbina eólica.

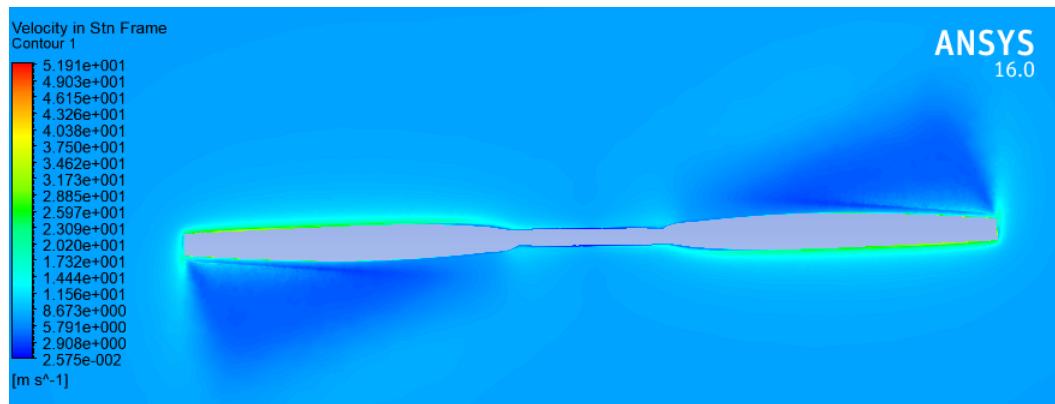


Figura 46 - Contornos de velocidade no plano $y=0$ para $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$

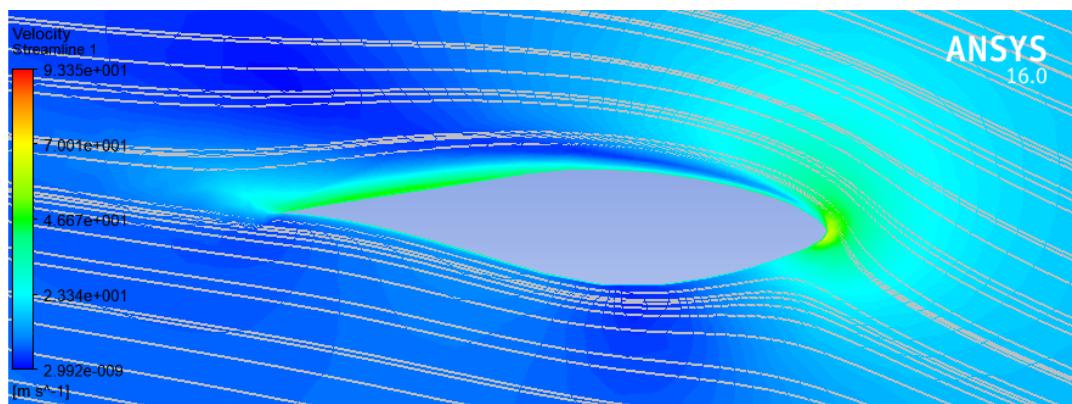


Figura 47 – Contornos de velocidade e linhas de corrente $z=0,3R$ para $U_{\infty} = 7 \text{ m/s}$

5.4.3.2. Velocidade da corrente livre igual a 10 m/s

A figura 48 apresenta a deformação da estrutura para o instante 0,05s.

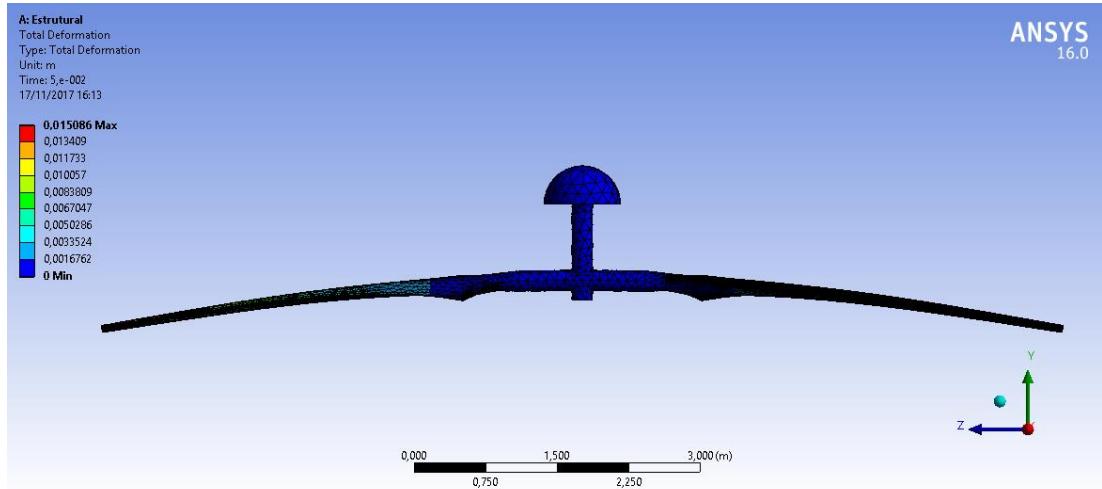


Figura 48 - Deformação total da estrutura para $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$

Os resultados de visualização geral do escoamento são expressos na figura 49. Na figura 50 é apresentado o campo de velocidades para a seção da pá localizada a uma distância radial de 3 m do eixo da turbina eólica.

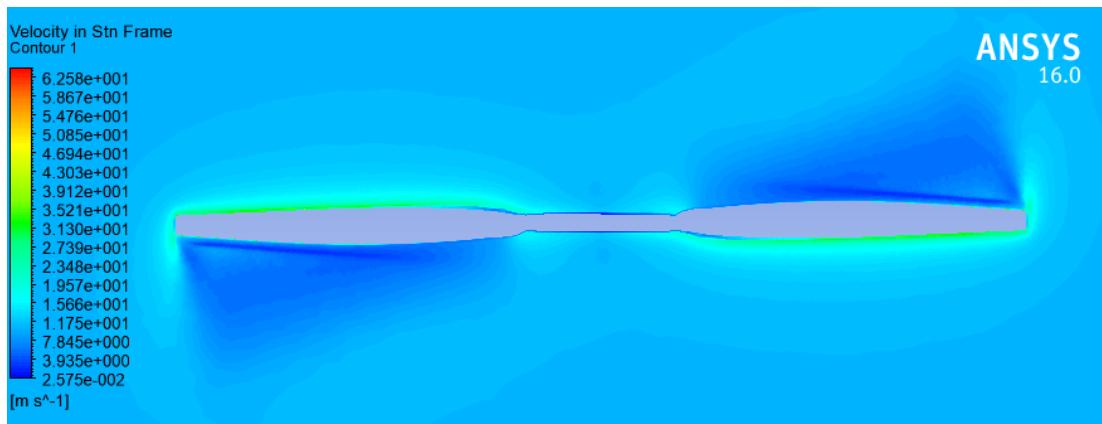


Figura 49 - Contornos de velocidade no plano $y=0$ para $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$

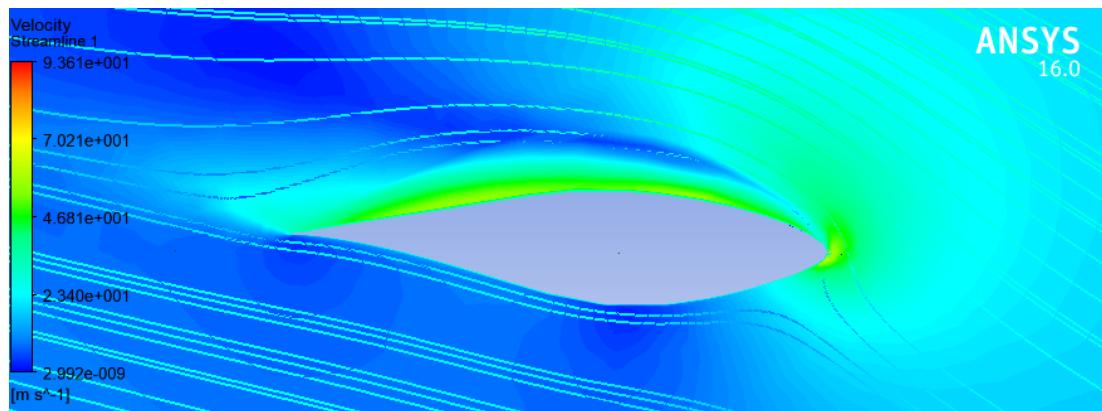


Figura 50 - Contornos de velocidade e linhas de corrente $z=0,3R$ para $U_\infty = 10 \text{ m/s}$

5.4.3.3. Velocidade da corrente livre igual a 15 m/s

A figura 51 apresenta a deformação da estrutura para o instante 0,05s.

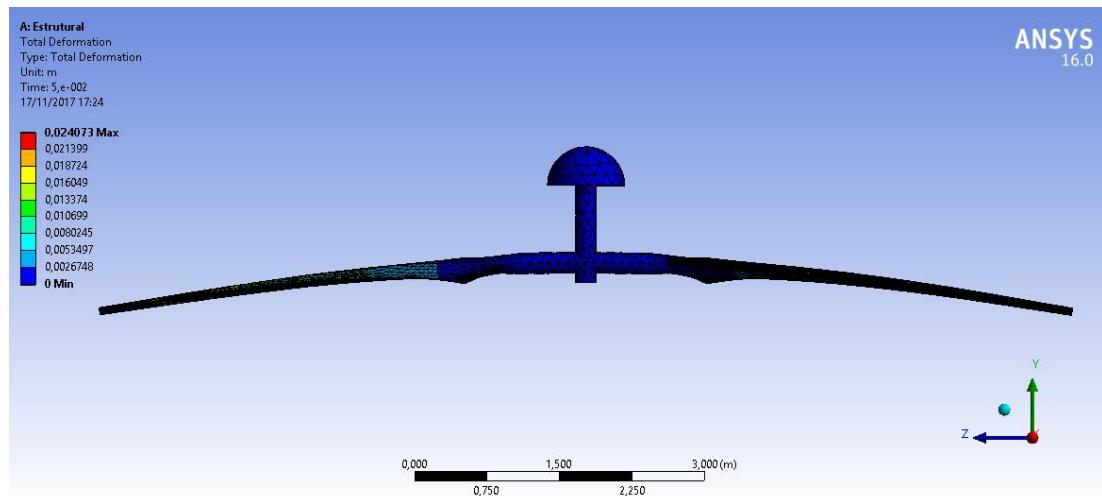


Figura 51 - Deformação total da estrutura para $U_\infty = 15 \text{ m/s}$

Os resultados de visualização geral do escoamento são expressos na figura 52. Na figura 53 é apresentado o campo de velocidades para a seção da pá localizada a uma distância radial de 3 m do eixo da turbina eólica.

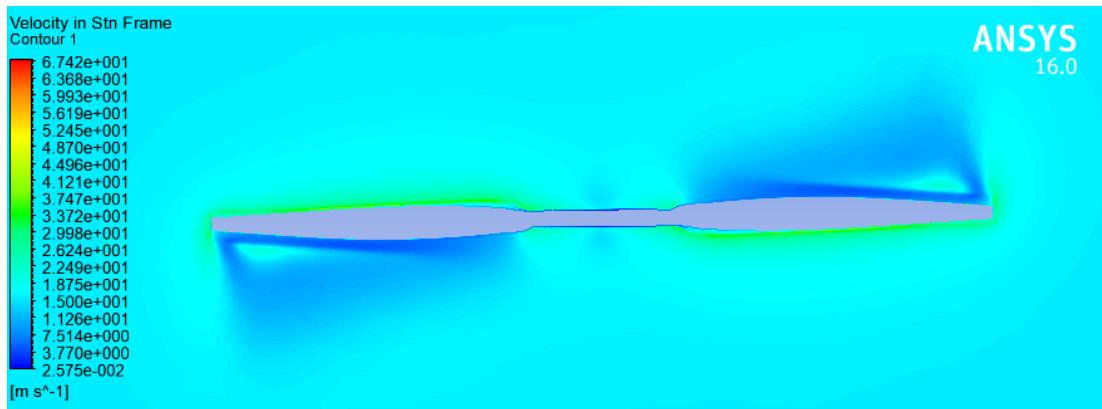


Figura 52 - Contornos de velocidade no plano $y=0$ para $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$

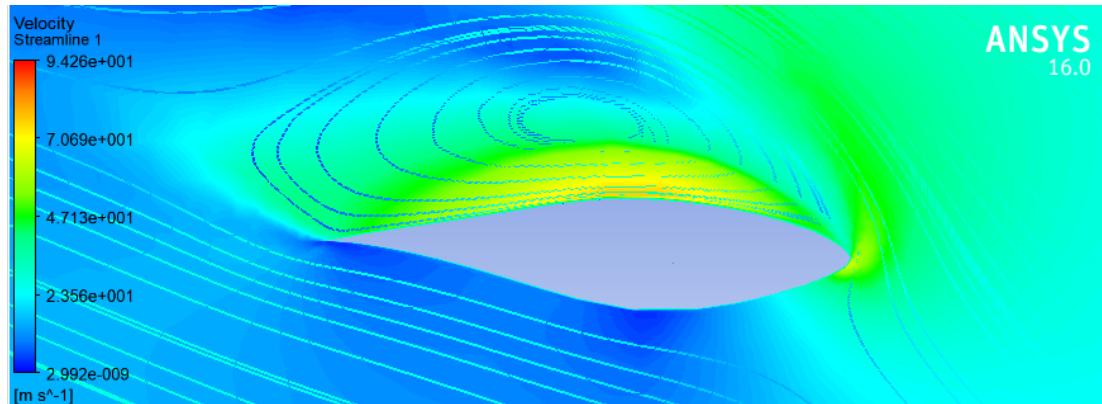


Figura 53 - Contornos de velocidade e linhas de corrente $z=0,3R$ para $U_{\infty} = 15 \text{ m/s}$

Como já era esperado o campo de deformações da pás da turbina eólica é simétrico em relação ao plano xy . Verificou-se também que conforme aumenta-se a velocidade da corrente livre do vento ocorre aumento na deformação das pás da turbina.

A tabela 7 apresenta os valores de deslocamento máximo (ponta da pá) para as três simulações realizadas.

Tabela 7- Deslocamento máximo da pá

Velocidade da corrente livre (m/s)	Deslocamento máximo (mm)
7	7
10	15
15	24

É importante destacar que o modelo estrutural das pás utilizado foi o modelo sólido (ao invés de casca), com material definido por fibra de vidro (GFRP). Deste

modo a deformação estimada por meio da simulação fluido-estrutural é inferior à deformação obtida em turbinas eólicas reais.

Além disso comparou-se os resultados de performance aerodinâmica obtidos entre o modelo simplificado rígido, o modelo simplificado elástico, o modelo completo rígido e o resultado experimental para a velocidade de 7 m/s. A análise comparativa é apresentada na tabela 8 abaixo.

Tabela 8 - Resultados comparativos de performance aerodinâmica

Velocidade da corrente livre (m/s) / Torque (N.m)	Modelo completo rígido	Modelo simplificado rígido	Modelo simplificado elástico	Resultado experimental
7	550	462	445	780

Pode-se concluir da tabela 8 que os resultados de performance aerodinâmica comparativos entre o modelo simplificado rígido e o modelo simplificado elástico foram semelhantes. Destaca-se que as restrições computacionais limitaram o número de elementos da malha de volumes finitos utilizada nas simulações, sobretudo nas simulações com interação fluido-estrutural. A malha de volumes finitos utilizada na simulação com modelo simplificado rígido e na simulação com modelo simplificado elástico foram iguais, porém com um número de elementos significativamente inferior à quantidade de elementos da malha de volumes finitos utilizada na simulação do modelo completo rígido.

Além disso as restrições computacionais limitaram o tempo total das simulações. Para maior acurácia dos resultados é necessário dar continuidade às simulações, utilizando um tempo total de simulação superior, bem como realizar estudos de refinamento de malha.

6. CONCLUSÃO

Aspectos aerodinâmicos da turbina eólica horizontal de duas pás e da turbina eólica horizontal de três pás foram avaliados através de simulações fluido computacionais.

Foram realizadas três simulações de velocidade do vento para cada uma das turbinas, totalizando seis simulações, considerando-se nesses casos o modelo rígido completo. Adicionalmente, para a turbina eólica de duas pás, realizaram-se três simulações fluido-estruturais para velocidades distintas da corrente livre, sendo utilizado um modelo estrutural simplificado.

Os resultados obtidos da simulação da turbina eólica de duas pás, como distribuição de pressões na pá, torque e potência foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente em Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI (HANSEN, 1993).

Os resultados obtidos para a turbina eólica de duas pás obtiveram boa aderência aos resultados experimentais para a simulação com $U=7$ m/s, contudo para as simulações com velocidades elevadas, ocorreram erros significativos entre o resultado computacional e os resultados experimentais. Possíveis fontes de erro estão associadas a metodologia empregada, como refinamento da malha de volumes finitos e escolha do modelo de turbulência. Já para as demais velocidades os resultados obtidos via CFD divergiram em relação aos resultados experimentais. Deste modo é possível inferir que ocorre o fenômeno de estol, para velocidades abaixo das velocidades esperadas experimentalmente.

Logo é necessário um estudo mais detalhado que possa justificar a ocorrência deste fenômeno de modo que se possa reproduzir o resultado experimental com maior acurácia. Possíveis verificações seriam inicialmente o teste de refinamento de malha, além do estudo dos modelos de turbulência.

É importante destacar que o torque obtido via CFD não é de fato constante ao longo do tempo, haja vista que a presença da torre induz um fenômeno transiente; contudo esta variação de torque ao longo do tempo não se demonstrou significativa

em frente à diferença de valores de torque experimental e via CFD. Além disso não se identificou a priori a influência do ângulo de arfagem das pás em relação ao escoamento na modificação de performance aerodinâmica da turbina eólica.

Por fim comparou-se os resultados de performance aerodinâmica obtidos nos modelos rígido completo, rígido simplificado, elástico simplificado e experimental. Verificou-se que houve pequenas diferenças nos resultados obtidos entre o modelo simplificado elástico e o modelo simplificado rígido. Para maior acurácia dos resultados é necessário dar continuidade às simulações, computando-se o escoamento para um tempo superior, realizar estudos de refinamento de malha e de convergência das simulações. Torna-se necessário também analisar o modelo estrutural das pás da turbina eólica.

No estudo apresentado, surgiram várias dificuldades intrínsecas às simulações fluido-computacionais, em particular das simulações fluido-estruturais. A maior barreira do progresso das simulações foi a limitação computacional. Um modelo completo da turbina eólica requer uma malha de volumes finitos refinada em toda a superfície das pás da turbina eólica, a fim de que o escoamento simulado compute bem a camada limite desenvolvida ao longo da pá. A camada limite define em grande parte a acurácia dos resultados de performance aerodinâmica da turbina eólica. Além de uma boa malha de volumes finitos, o modelo estrutural requer uma malha fina de elementos finitos a fim de que se compute adequadamente a deformação da estrutura, a qual define o campo de velocidades e pressões do fluido.

Nas simulações computacionais utilizou-se um PC com quatro processadores, apresentando fortes restrições computacionais, para simulação de um modelo complexo. Dentre as restrições, destaca-se o tempo elevado para convergência das simulações, a limitação no número de elementos máximo da malha de volumes finitos e por fim a necessidade de uma memória elevada de hardware para armazenamento das informações contidas nas simulações. Todas essas restrições computacionais limitaram o presente estudo de obter resultados com maior acurácia, bem como limitaram a realização da simulação fluido-estrutural com o modelo completo e em escala real.

Pode-se concluir que o uso de softwares CFD na simulação de escoamentos é uma ferramenta poderosa no estudo dos aspectos aerodinâmicos de turbinas eólicas, contudo ainda há uma grande linha de desenvolvimento de pesquisa, sobretudo em modelos de turbulência, cuja finalidade é aprimorar a validade numérica dos resultados obtidos nas simulações computacionais.

Deste modo torna-se necessário dar continuidade ao presente estudo, através da análise de refinamento de malha e escolha de modelo de turbulência a fim de validar os resultados. Além disso, é necessário estudar diferentes modelos estruturais das pás da turbina eólica, a fim de que se possa complementar o modelo completo rígido, bem como escalar o modelo. Neste caso se teria um modelo fluido-estrutural completo da turbina eólica, considerando-se todos os seus componentes: pás, hub, nacelle, torre e solo, o qual possa ser utilizado como ferramenta fundamental na otimização da geração da energia eólica pelo uso das turbinas eólicas.

7. REFERÊNCIAS

- A. C. HANSEN, C. P. BUTTERFIELD. **Aerodynamics of horizontal-axis wind turbines**, 1993.
- ABBOTT, IRA H., A.E. VON DOENHOFF. **Theory of Wing Sections – Including a Summary of Airfoil Data**, 1959.
- ANSYS. **Anssys Fluent Theory Guide**, 2013.
- ANSYS. **Anssys Mechanical Theory Guide** 2013.
- BAZILEVS Y., HSU M.C., KIENDL J. **3D Simulation of wind turbine rotors at full scale**. Part II: Fluid-structure interation modeling with composite blades, 2014.
- BP REVIEW. **BP Statistical Review of World Energy** June 2016. Disponível em: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-> .
- CBEE. **Centro brasileiro de energia eólica** UFPE, 2000.
- CRESESB. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB/CEPEL, 2003. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/atlas_eoli_co_brasil/atlas-web.htm.
- EPE. **Empresa de pesquisa energética**, Balanço energético nacional 2017, 2016. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf
- F. MASSOUEH, I. DOBREV. **Exploration of the vortex wake behind of wind turbine rotor**, 2007.
- JANG-OH. MO, YOUNG-HO LEE. **CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method**, 2012.
- M.M. HAND, D.A. SIMMS, L.J. FINGERSH, D.W. JAGER, J.R. COTRELL, S. SCHRECK, AND S.M. LARWOOD. **Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns**, 2001.

MALATESTA, FEDERICO. **CFD Study of a Wind Turbine Rotor**, Tese de conclusão de curso, 2012.

MING-CHEN HSU, IDO AKKERMAN AND YURI BAZILEVS. **Finite element simulation of wind turbine aerodynamics: Validation study using NREL Phase VI experiments**, 2012.

MING-CHEN HSU, YURI BAZILEVS. **Fluid-structure interaction modeling of wind turbines: simulating the full machine**, 2012.

NETO OSWALDO. **Avaliação do desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas através de modelagem e simulação computacionais**, Projeto Iniciação Científica, 2015.

QIANG WANG, HU ZHOU AND DECHENG WAN. **Numerical Simulation of Wind Turbine Blade-Tower Interaction**, 2012.

SCHAFFARCZYK, ALOIS PETER. **Introduction to Wind Turbine Aerodynamics**, 2014.

YUWEI LI, KWANG-JUN PAIK, TAO XING , PABLO M. CARRICA. **Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics**, 2011.

ANEXO A

Tabela 9 - Detalhes das seções radiais da pá da turbina eólica

Radial Distance r (m)	Span Station ¹ ($r/5.532$ m)	Span Station ² ($r/5.029$ m)	Chord Length (m)	Twist ² (degrees)	Thickness (m)	Twist Axis (% chord)
0.0	0.0	0.0	Hub - center of rotation	Hub - center of rotation	Hub - center of rotation	Hub - center of rotation
0.508 ³	0.092	0.101	0.218 (root hub adapter)	0.0 (root hub adapter)	0.218	50 (root hub adapter)
0.660 ⁴	0.120	0.131	0.218	0.0	0.218	50
0.883 ⁵	0.160	0.176	0.183	0.0	0.183	50
1.008 ⁵	0.183	0.200	0.349	6.7	0.163	35.9
1.067 ⁵	0.193	0.212	0.441	9.9	0.154	33.5
1.133 ⁵	0.205	0.225	0.544	13.4	0.154	31.9
1.257 ⁵	0.227	0.250	0.737	20.040	0.154	30
1.343	0.243	0.267	0.728	18.074	20.95% chord	30
1.510	0.273	0.300	0.711	14.292	20.95% chord	30
1.648	0.298	0.328	0.697	11.909	20.95% chord	30
1.952	0.353	0.388	0.666	7.979	20.95% chord	30
2.257	0.408	0.449	0.636	5.308	20.95% chord	30
2.343	0.424	0.466	0.627	4.715	20.95% chord	30
2.562	0.463	0.509	0.605	3.425	20.95% chord	30
2.867	0.518	0.570	0.574	2.083	20.95% chord	30
3.172	0.573	0.631	0.543	1.150	20.95% chord	30
3.185	0.576	0.633	0.542	1.115	20.95% chord	30
3.476	0.628	0.691	0.512	0.494	20.95% chord	30
3.781	0.683	0.752	0.482	-0.015	20.95% chord	30
4.023	0.727	0.800	0.457	-0.381	20.95% chord	30
4.086	0.739	0.812	0.451	-0.475	20.95% chord	30
4.391	0.794	0.873	0.420	-0.920	20.95% chord	30
4.696	0.849	0.934	0.389	-1.352	20.95% chord	30
4.780	0.864	0.950	0.381	-1.469	20.95% chord	30
5.000	0.904	0.994	0.358	-1.775	20.95% chord	30
5.305	0.959	1.055	0.328	-2.191	20.95% chord	30
5.532	1.000	1.100	0.305	-2.500	20.95% chord	30

Tabela 10 - Coordenadas do Aerofólio S809

Upper Surface		Lower Surface	
x/c	y/c	x/c	y/c
0.00037	0.00275	0.00140	-0.00498
0.00575	0.01166	0.00933	-0.01272
0.01626	0.02133	0.02321	-0.02162
0.03158	0.03136	0.04223	-0.03144
0.05147	0.04143	0.06579	-0.04199
0.07568	0.05132	0.09325	-0.05301
0.10390	0.06082	0.12397	-0.06408
0.13580	0.06972	0.15752	-0.07467
0.17103	0.07786	0.19362	-0.08447
0.20920	0.08505	0.23175	-0.09326
0.24987	0.09113	0.27129	-0.10060
0.29259	0.09594	0.31188	-0.10589
0.33689	0.09933	0.35328	-0.10866
0.38223	0.10109	0.39541	-0.10842
0.42809	0.10101	0.43832	-0.10484
0.47384	0.09843	0.48234	-0.09756
0.52005	0.09237	0.52837	-0.08697
0.56801	0.08356	0.57663	-0.07442
0.61747	0.07379	0.62649	-0.06112
0.66718	0.06403	0.67710	-0.04792
0.71606	0.05462	0.72752	-0.03558
0.76314	0.04578	0.77668	-0.02466
0.80756	0.03761	0.82348	-0.01559
0.84854	0.03017	0.86677	-0.00859
0.88537	0.02335	0.90545	-0.00370
0.91763	0.01694	0.93852	-0.00075
0.94523	0.01101	0.96509	0.00054
0.96799	0.00600	0.98446	0.00065
0.98528	0.00245	0.99612	0.00024
0.99623	0.00054	1.00000	0.00000
1.00000	0.00000	0.00000	0.00000