



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

VICTOR HUGO LOBO CORREIA

ANÁLISE AERODINÂMICA DA TURBINA EÓLICA NTK 500/41 VIA CFD

TERESINA

2019

VICTOR HUGO LOBO CORREIA

ANÁLISE AERODINÂMICA DA TURBINA EÓLICA NTK 500/41 VIA CFD

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Me. Anderson Felipe Chaves Fortes

TERESINA
2019

C 824 Correia, Victor Hugo Lobo
a ANÁLISE AERODINÂMICA DA TURBINA EÓLICA NTK 500/41 VIA CFD / Victor
Hugo Lobo Correia - 2019.
49 f. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Bacharelado em Engenharia
Mecânica, 2019.

Orientador : Prof Me. Anderson Felipe Chaves Fortes.

1. Turbina eólica. 2. CFD. 3. Energia renovável. I.Título.

CDD 620

FOLHA DE APROVAÇÃO

VICTOR HUGO LOBO CORREA

ANÁLISE AERODINÂMICA DA TURBINA EÓLICA NTK 500/41 VIA CFD

Monografia apresentada como requisito para a obtenção do título de graduação Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.

Aprovada em: 29/ 01/ 2019.

BANCA EXAMINADORA

Assinado no original

Prof. Msc. Anderson Felipe Chaves Fortes (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Assinado no original

Prof. Msc. Hélio de Paula Barbosa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Assinado no original

Prof. Francisco Rafael Pereira da Costa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Ao meu pai, Francisco.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Francisco e Helandra, por todo amor, carinho, companheirismo e ensinamentos. Ao apoio dos meus irmãos Denise e Antônio. A minha namorada, Renata Portela, por sempre estar ao meu lado me apoiando nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus professores do IFPI por todos os ensinamentos passados durante esses anos. Aos amigos de classe que fiz durante meus anos na Engenharia.

"It ain't about how hard you hit. It's about how hard you can get hit and keep moving forward. How much you can take and keep moving forward. That's how winning is done!"

Rocky Balboa

RESUMO

O presente trabalho realizou um estudo da turbina eólica modelo Nordtank 500/41 através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Para o desenvolvimento do trabalho foram abordados os conceitos de turbinas eólicas, aerodinâmica de rotores eólicos e os fundamentos de dinâmica dos fluidos computacional. Para a execução da simulação CFD, inicialmente foi feito um levantamento das especificações técnicas da turbina e em seguida a modelagem 3D da pá através do software SolidWorks. Para simulação numérica foi utilizado o software ANSYS Fluent. Foi realizado um estudo de convergência de malha, a fim de analisar a qualidade. Como resultados, foram obtidos os dados de desempenho da turbina que incluem a potência mecânica, torque e empuxo gerado pelo rotor. Também foram analisadas as características do escoamento no rotor, através dos campos de pressão e velocidade; e da esteira aerodinâmica. Os resultados obtidos na simulação apresentaram erros relativos menores que 4% quando comparados aos resultados do modelo experimental, indicando uma precisão satisfatória. Através do trabalho desenvolvido, concluiu-se que a simulação fluidodinâmica é uma ferramenta eficiente e versátil para o estudo de turbinas eólicas.

Palavras-chave: Turbina eólica. CFD. Energia renovável.

ABSTRACT

The present paper aims to perform a CFD analysis in a wind turbine model Nordtank 500/41. In order to develop the study, the concepts of wind energy, aerodynamics of wind turbines and computational fluid dynamics are presented. Initially, it was gathered technical specifications of the wind turbine and generated the tridimensional model of the blade through SolidWorks. The CFD analysis was performed in ANSYS Fluent. A mesh independency study was developed to study the grid quality. As results, the wind turbine performance was determined; it includes the mechanical power, torque and thrust. Also, the flow characteristics such as pressure and velocity contours and aerodynamic wake were analyzed. The results obtained in the simulation showed relatives errors less than 4% when compared to experimental data. It shows that the simulation has a high level of accuracy. The study concludes that CFD analysis is a powerful resource to analyze wind turbines.

Keywords: Wind turbine. CFD. Renewable energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes de uma turbina eólica.....	18
Figura 2 - Curva de Potência.....	19
Figura 3 - Principais características de um aerofólio.....	20
Figura 4 - Forças em um aerofólio	21
Figura 5 - Seção da pá sujeita a velocidade relativa	22
Figura 6 - Exemplo de uma malha não estruturada bidimensional.....	25
Figura 7 - Medição de velocidade por ponto em um escoamento turbulento	27
Figura 8 - Turbina eólica Nordtank 500/41	30
Figura 9 - Modelo em CAD da pá LM 19.1. (a) Vista Isométrica (b) Vista Frontal.....	32
Figura 10 - Domínio Computacional: (a) Vista Frontal (b) Vista Isométrica.....	33
Figura 11 - Inflation em uma seção da pá	34
Figura 12 - Distribuição dos elementos na faixa de qualidade	36
Figura 13 - Condições de contorno	37
Figura 14 – Gráfico dos resíduos obtidos na simulação.....	39
Figura 15 – Gráfico da potência mecânica da turbina Nordtank 500/41.....	40
Figura 16 - Seções de corte: 50% e 80% do raio total	41
Figura 17 - Contornos de pressão para 6 m/s: (a) 50% do raio (b) 80% do raio	42
Figura 18 - Contornos de pressão para 10 m/s: (a) 50% do raio (b) 80% do raio	42
Figura 19 - Turbulência no perfil da pá para 10 m/s: (a) Viscosidade dos vórtices turbulentos (b) Energia cinética turbulenta.....	43
Figura 20 - Distribuição de pressão ao longo da pá	43
Figura 21 - Velocidades ao longo da pá.....	44
Figura 22 - Gráfico da distribuição da energia cinética turbulenta ao longo do domínio	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características Geométricas da Pá LM 19.1.....	31
Tabela 2 - Análise de independência de malha.....	35
Tabela 3 - Valores de skewness e qualidade do elemento	35
Tabela 4 - Dados da validação.....	39
Tabela 5 - Valores de torque e empuxo para as velocidades	40

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade
t	Tempo
u	Vetor velocidade.
τ_{ij}	Tensor de tensões
g_i	Componente da gravidade na direção da coordenada x_i
U	Valor médio
u'	Valor flutuante
ϑ	Viscosidade cinemática
p	Pressão
$u'_i u'_j$	Tensor de tensões de Reynolds
ν_t	Viscosidade turbulenta
k	Energia cinética turbulenta
ω	Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
1.3.1	Turbinas eólicas.....	17
1.3.2	Aerodinâmica de rotores eólicos	20
1.3.2.1	Esteira Aerodinâmica	22
1.3.3	Dinâmica dos fluidos computacional (CFD).....	22
1.3.3.1	Modelo matemático	23
1.3.3.2	Método de discretização - volumes finitos	24
1.3.3.3	Malha numérica.....	24
1.3.3.4	Métodos de solução.....	25
1.3.3.4.1	<i>Métodos de solução do software.....</i>	<i>25</i>
1.3.3.5	Escoamento turbulento	26
1.3.3.5.1	<i>RANS</i>	<i>27</i>
2	MATERIAIS E MÉTODOS	30
2.1	TURBINA NORDTANK	30
2.2	MODELAGEM EM CAD.....	31
2.3	SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA	32
2.3.1	Modelo matemático	32
2.3.2	Domínio computacional	32
2.3.3	Malha numérica e estudo de independência.....	33
2.3.4	Configuração do ANSYS Fluent.....	36
2.3.5	Verificação e validação	38
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
3.1	DESEMPENHO DA TURBINA.....	40
3.2	ANÁLISE DO ESCOAMENTO.....	41
4	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as mudanças climáticas, advindas da influência do desenvolvimento humano no meio ambiente, vem se tornando cada vez mais motivo de preocupação mundial. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2018), serão necessárias transformações radicais para limitar o aquecimento do planeta em 1,5 graus Celsius em relação ao período pré-industrial. A organização alerta que o aquecimento acima desse nível, trará consequências profundas para a sociedade mundial e colocará o meio ambiente em risco. Emissões de dióxido de carbono terão que cair 45% até 2030 em relação aos níveis de 2010 e zerar até 2050. Diante deste cenário, é necessário o foco em pesquisa e desenvolvimento na área de energias renováveis como eólica, solar e biomassa; dessa maneira reduzindo gradativamente a dependência de combustíveis fósseis.

Seguindo essa tendência, o Brasil tem mostrado grande potencial na produção de energia renovável, especialmente na energia oriunda dos ventos. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2017), o Brasil atingiu o 7º lugar no ranking mundial de geração de energia eólica em 2016, ultrapassando o Canadá. Ainda de acordo com o Ministério, dentre os estados brasileiros, o Piauí teve destaque no quesito fator de capacidade, tendo o maior indicador do país (48,4%). Já a Empresa de Pesquisa Energética (2017), através do Balanço Energético Nacional 2017, indicou que a produção de eletricidade a partir da fonte eólica no Brasil em 2016 teve um aumento de 54,9% em relação a 2015, com um total de 33.489 GWh.

De acordo com Oliveira Neto (2016), a região nordeste tem a maior viabilidade técnica em recurso eólico do Brasil, representando mais da metade do potencial do país. Em vista disso, o nordeste do país tem o potencial de se tornar um pólo industrial, tecnológico e de pesquisa, assim produzindo equipamentos, tecnologia e serviços no setor eólico. Estudos comprovam que durante os meses de seca na região do Nordeste, os ventos são mais velozes e constantes (OLIVEIRA NETO, 2016). Dessa forma, o potencial eólico nordestino pode ser uma ótima alternativa para complementar a produção de energia nas usinas hidrelétricas, que sofrem com períodos de seca, a fim de garantir a produção de energia elétrica.

Tendo em vista do potencial eólico do Brasil, grandes empresas do mercado mundial de eólica têm feito investimentos no país. Segundo Macedo (2015), em 2009 havia apenas duas fabricantes de turbinas eólicas no Brasil, já em 2013 esse número subiu para 25 unidades, sendo 18 localizadas na região nordeste. Essa concentração de fábricas na região ocorre devido aos elevados custos de transporte dos equipamentos, o que estimula a construção de fábricas próximas aos parques eólicos. Dentre as principais empresas estão a norte americana GE e a dinamarquesa Vestas, que de acordo com Macedo (2015) é considerada a maior fabricante de turbinas eólicas no mercado global.

A energia eólica se baseia na conversão da energia cinética do vento em energia elétrica através da utilização de turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores. Basicamente, a conversão de energia eólica em elétrica inicia quando o vento atinge as pás do rotor que provoca o desenvolvimento de uma distribuição de forças aerodinâmicas, que resultam em um torque no eixo do rotor. Esse torque é transmitido para uma caixa de transmissão que tem o papel de multiplicar a rotação do eixo, que será transmitida para o gerador elétrico. Além disso, turbinas eólicas possuem sistemas de medição de vento e sistemas de controle.

De acordo com Manwell et al (2009), o rotor é considerado o componente mais importante de uma turbina eólica do ponto de vista de desempenho e custo geral. Segundo o mesmo autor, experiências mostram que os principais fatores do desempenho de turbinas eólicas são determinados pelas forças aerodinâmicas geradas pelo vento médio que atuam nas pás do rotor. As pás das turbinas eólicas funcionam de forma similar a uma asa de avião, na qual um perfil aerodinâmico gera forças de sustentação e arrasto devido à sua geometria. Os perfis aerodinâmicos utilizados nas primeiras turbinas eólicas eram projetados para o uso na aviação e não eram otimizados para ângulos de ataque maiores, que são frequentemente utilizados em turbinas eólicas. O projeto de um rotor eólico abrange diversos fatores, como escolha do número de pás, tipo de perfil aerodinâmico, distribuição da corda dos perfis, torção da pá, materiais de construção, dentre outros. Deste modo, estudos aerodinâmicos das pás são fundamentais, e tem a finalidade de melhorar a eficiência energética e reduzir os custos associados ao projeto de turbinas eólicas (SORENSEN, 2011).

Devido a fatores como a complexidade dos ambientes em que turbinas eólicas operam e as interações entre a camada limite em torno dos perfis aerodinâmicos, a produção de energia e o escoamento em torno da turbina, o uso de códigos computacionais é necessário para o projeto de pás eólicas (MANWELL et al., 2009). Estes códigos computacionais podem calcular características como o desempenho do rotor, as cargas aerodinâmicas ao longo das pás, o campo de escoamento em torno da turbina e a emissão de ruídos gerados pelo os efeitos aerodinâmicos.

Atualmente, existem diversos métodos analíticos para realizar a análise de desempenho em turbinas eólicas, dentre eles, o Método do Momento do Elemento de Pá (BEM). Segundo Sanderse (2009), o BEM é amplamente usado como ferramenta de projeto e ainda é a base para diversos códigos computacionais. De acordo com o autor, o método consiste na divisão da pá em pequenos elementos e o desempenho pode ser calculado pela soma da contribuição de todos estes elementos através de um procedimento iterativo.

Porém, modelos que utilizam o método BEM não conseguem determinar o desempenho de turbinas de grandes dimensões com precisão aceitável, principalmente devido os efeitos 3D, que são cada vez mais importantes (IVANELL, 2009). Diante disso, pode-se concluir que para uma análise precisa do desempenho de uma turbina eólica são necessários métodos mais sofisticados que considerem todos os efeitos do escoamento.

Segundo Burton et al. (2001), testes de campo de turbinas eólicas são realizados principalmente por dois motivos: como parte do processo de desenvolvimento de novos produtos e para determinar o desempenho da turbina para testes de qualidade de acordo com normas e para fins comerciais. Porém, experimentos de boa qualidade e em grande escala são caros e limitados, em relação a informações sobre o campo de escoamento (SANDERSE, 2009).

Neste contexto, códigos computacionais baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de modelar o escoamento em turbinas eólicas. Com a análise CFD é possível prever as características do escoamento, como campos de velocidade e pressão com grande precisão e confiabilidade. De acordo com Carcangiu (2008), a metodologia baseada em CFD proporciona uma considerável redução de tempo e custo na resolução de

problemas quando comparada com métodos tradicionais, dessa maneira, reduzindo a quantidade de análises experimentais necessárias para determinado projeto.

Dinâmica dos Fluidos Computacional, de acordo com Versteeg & Malalasekera (2007), é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor ou fenômenos como reações químicas, através de simulações computacionais. Segundo o mesmo autor, há diversas vantagens no uso do CFD ao invés de análises experimentais, como por exemplo:

- Redução considerável de tempo e custo do projeto de novos designs;
- Possibilidade de estudar sistemas em que experimentos controlados são difíceis ou impossíveis de serem realizados;
- Analisar sistemas que estão sujeitos a condições perigosas;
- Numerosas possibilidades de detalhamento dos resultados.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é aplicar a dinâmica dos fluidos computacional na análise do rotor de uma turbina eólica, determinando as variáveis de desempenho como potência, torque e empuxo; e as características do escoamento ao redor da turbina.

Para alcançar o objetivo principal os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- Determinar as características da turbina eólica;
- Modelar o rotor da turbina eólica NTK 500/41 em CAD;
- Gerar uma simulação numérica do rotor eólico através da dinâmica dos fluidos computacional;
- Validar a simulação;
- Determinar dados do desempenho da turbina;
- Determinar a distribuição de pressão ao longo da pá;
- Determinar a velocidade do ar na superfície da pá;
- Analisar a esteira aerodinâmica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do potencial eólico brasileiro, o presente trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de pesquisas no ramo eólico através do desenvolvimento de um estudo sobre o desempenho e aerodinâmica de uma turbina eólica. Devido à dificuldade e alto custo para a realização de experimentos e testes com turbinas eólicas, a principal motivação do presente trabalho é aplicar a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) como ferramenta de projeto para rotores eólicos, facilitando assim a realização de análises sem a necessidade de realizar experimentos em uma fase preliminar do projeto. Através da simulação CFD é possível analisar diversas variáveis relacionadas ao funcionamento de um rotor eólico.

1.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Ao longo desta seção serão abordados conceitos fundamentais sobre turbinas eólicas, aerodinâmica e dinâmica dos fluidos computacional.

1.3.1 Turbinas eólicas

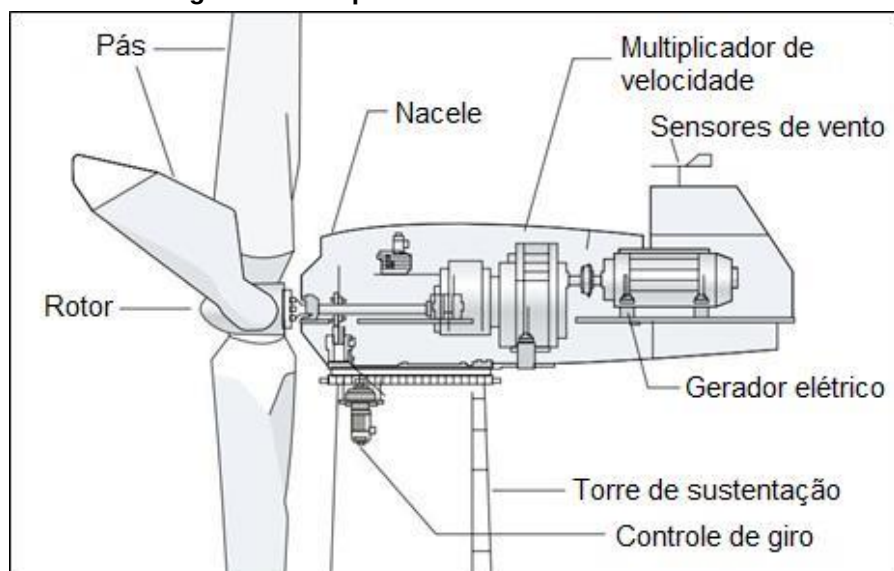
De acordo com Hansen (2008), a energia eólica começou a ser utilizada pela humanidade para a propulsão de veleiros. Com o passar dos anos, surgiram os moinhos de vento que usavam a energia eólica para moer grãos. A partir do surgimento dos primeiros geradores elétricos, no final do século 19, experimentos que acoplavam geradores a rotores de moinhos de vento se tornaram frequentes. De acordo com Manwell et al (2009), o mais notável exemplo foi desenvolvido por Charles Brush nos Estados Unidos da América no ano de 1888. A partir daí, começaram a surgir os primeiros modelos de turbinas eólicas.

As turbinas eólicas modernas convertem a energia do vento em energia elétrica. O processo de conversão de energia aplica a aerodinâmica, através da força de sustentação, para produzir torque em um eixo rotativo que está conectado a um gerador elétrico. A energia disponível no vento pode ser calculada através de uma relação que leva em consideração a densidade do ar, a velocidade do vento e a área do rotor eólico (MANWELL et al, 2009). De acordo com Schubel & Crossley (2012) aerogeradores podem ser classificadas em relação à orientação do seu eixo,

podendo ser horizontal, onde no qual o eixo de rotação é paralelo ao solo; e vertical, em que a orientação do eixo rotativo é perpendicular ao solo. Segundo os mesmos autores, atualmente, as turbinas eólicas de eixo horizontal são as mais utilizadas em projetos de grande porte devido ao alto desenvolvimento tecnológico desse modelo. Os principais componentes de uma turbina de eixo horizontal são mostrados na Figura 1.

- Rotor: componente formado pelas pás e pelo cubo, que realiza a conversão de energia cinética do vento em energia de rotação;
- Caixa de engrenagens: também chamado de multiplicador de velocidade, é um mecanismo que aumenta a rotação do eixo do rotor para o acionamento do gerador elétrico;
- Gerador elétrico: converte a energia mecânica do eixo em energia elétrica;
- Nacele: compartimento onde ficam os componentes mecânicos e elétricos da turbina;
- Torre: componente que suporta nacele.
- Sistemas de controle: são sensores e atuadores que realizam o monitoramento e controle da turbina. Dentre alguns deles estão o anemômetro e o controle de giro.

Figura 1 - Componentes de uma turbina eólica



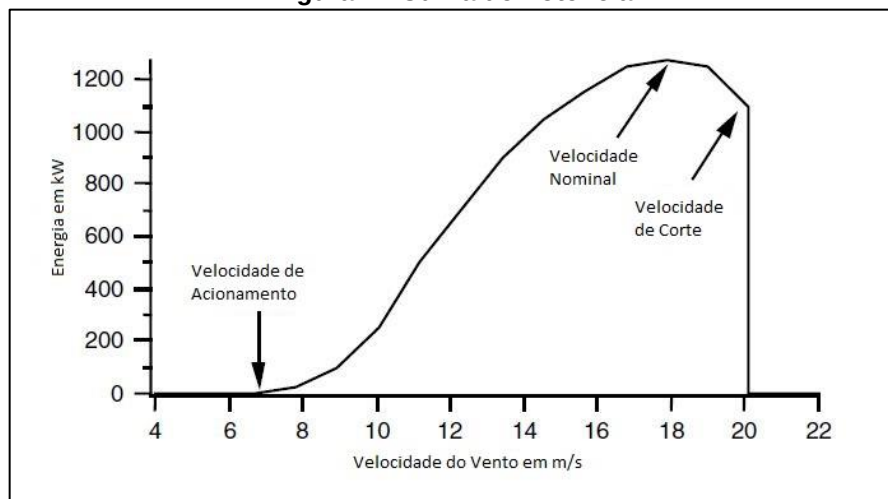
Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, 2000. (Adaptado)

A energia produzida por uma turbina eólica depende da velocidade do vento e das características como o tamanho do rotor e características geométricas das pás. Dessa maneira, cada turbina eólica terá uma curva de potência, que mostra a

produção de energia em função de diferentes velocidades de vento. Na Figura 2 é mostrada a curva de potência de uma turbina qualquer. Manwell et al (2002) afirma que através dessa curva é possível analisar a produção de energia de determinada turbina, sem levar em consideração muitos detalhes dos diversos componentes do sistema. Na curva é possível determinar três pontos importantes:

- Velocidade de acionamento (cut-in): velocidade mínima para a turbina iniciar a produção de energia útil.
- Velocidade nominal (rated): velocidade do vento que a produção de energia nominal é alcançada.
- Velocidade de corte (cut-out): velocidade máxima de operação da turbina. Geralmente é limitada por restrições de projeto e segurança com a finalidade de evitar esforços mecânicos excessivos.

Figura 2 - Curva de Potência



Fonte: Manwell, 2002 (Adaptado).

O desempenho de uma turbina eólica, segundo Burton (2001), pode ser caracterizado por três principais indicadores, são eles: potência, torque e empuxo. A potência determina a quantidade de energia que o rotor retira do vento. Já o torque desenvolvido no eixo do rotor indica os parâmetros de projeto para a caixa de engrenagens, que por sua vez deverá atender as especificações do gerador elétrico. E por fim, o empuxo axial que é a força que atua no rotor na direção normal devido à ação do vento. Essa tem uma grande influência na torre da turbina, sendo um dado fundamental para o projeto estrutural (BURTON, 2001).

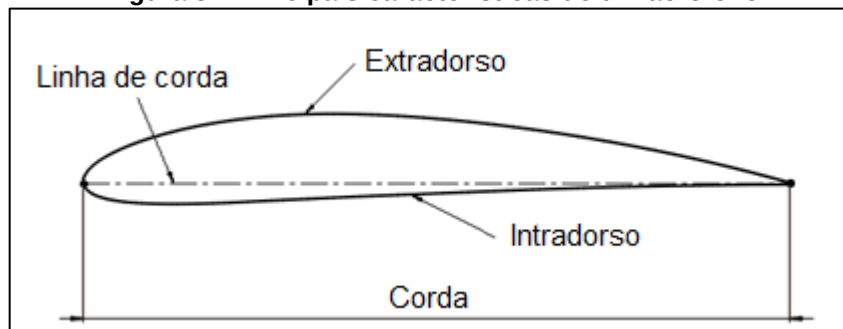
1.3.2 Aerodinâmica de rotores eólicos

As teorias de aerodinâmica desenvolvidas para aeronaves e helicópteros podem ser aplicadas na definição da performance de turbinas eólicas. No entanto, seus princípios são reformulados para que sejam aplicados de maneira adequada (MATHEW, 2006).

Segundo Hansen (2008), pás de turbinas eólicas são estruturas longas e delgadas, nas quais a velocidade de sua rotação é bem maior que a velocidade do fluxo de ar em sua região de entrada. Sendo assim, pode-se assumir que, em uma dada seção de pá, princípios da aerodinâmica bidimensional podem ser aplicados, e dados de análises bidimensionais de perfis podem ser utilizados.

Para que a extração de energia seja eficiente, Mathew (2006) afirma que pás de turbinas eólicas modernas são projetadas com seções de aerofólios, cujas principais características são apresentadas na Figura 3.

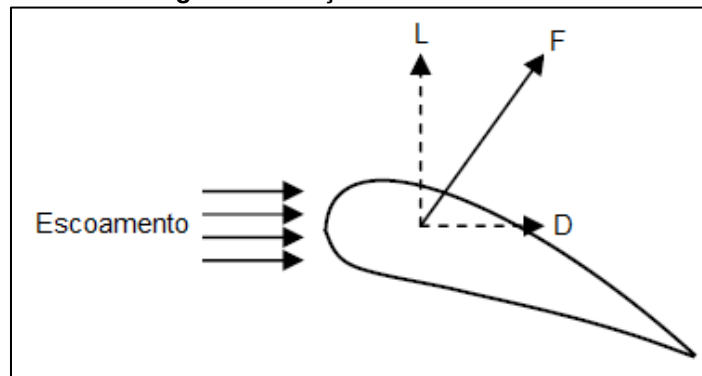
Figura 3 - Principais características de um aerofólio



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

Ainda segundo Mathew (2006), quando um aerofólio é posto diante de um fluxo de ar, sua curvatura típica faz com que este escoe mais rapidamente no extradorso do perfil em relação ao intradorso. Devido a isso, uma diferença de pressão é gerada entre as superfícies superior e inferior do aerofólio, que resulta em uma força F , como mostrado na Figura 4. A componente perpendicular à direção do escoamento não perturbado é denominada força de sustentação (L) e, a componente na direção do fluxo, é chamada de força de arrasto (D).

Figura 4 - Forças em um aerofólio

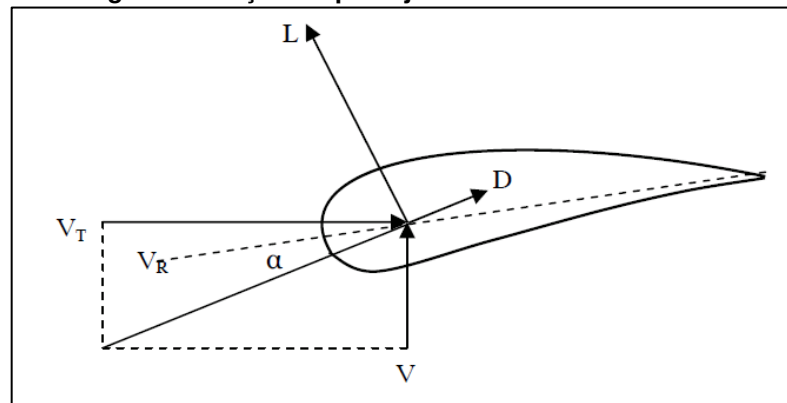


Fonte: Mathew, 2006. (Adaptado)

De acordo com Schubel & Crossley (2012), a sustentação aerodinâmica é a força responsável pelo rendimento de energia gerado pela turbina e, portanto, deve ser maximizada. E, a força de arrasto, que gera resistência ao movimento das pás, deve ser minimizada. A partir do ângulo de ataque, que é inclinação entre a velocidade relativa do vento e a linha de corda, são determinados os valores dos coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D). Então, é muito importante que o aerofólio seja posicionado com um ângulo de ataque ótimo em cada seção de pá, de modo que a razão entre C_L e C_D seja maximizada.

De acordo Mathew (2006), a seção transversal de uma pá eólica em rotação está sujeita a duas componentes de velocidade, a velocidade do vento (V) e a velocidade causada pela rotação da pá (V_T). Dessa maneira surge uma velocidade resultante, conhecida como velocidade relativa (V_R), que terá as componentes das forças aerodinâmicas como mostrado na Figura 5. A velocidade relativa se altera ao longo da pá devido a componente rotacional que para uma mesma velocidade rotacional do rotor, varia à medida que se distancia do cubo devido à relação entre a velocidade linear e a velocidade rotacional. Como consequência, o ângulo com que a velocidade relativa atinge o bordo de ataque (ângulo de ataque) da seção será diferente ao longo da pá. Para que o ângulo de ataque ótimo seja mantido, é necessária a existência de um ângulo de torção em cada seção da pá (MATHEW, 2006).

Figura 5 - Seção da pá sujeita a velocidade relativa



Fonte: Adaptado de Mathew, 2006

1.3.2.1 Esteira Aerodinâmica

De acordo com Rêgo (2017), a esteira aerodinâmica é a região de escoamento perturbado a jusante do rotor. O escoamento de esteira é constituído de complexas estruturas turbulentas com movimento rotacional induzido pelo movimento das pás do rotor. Além disso, esta região apresenta uma redução da velocidade e pressão (RÊGO, 2017). A esteira aerodinâmica causa efeitos indesejáveis em parques eólicos. Uma turbina eólica operando na esteira de outra tem a produção de energia elétrica reduzida, devido a menor incidência do vento, e a vida útil dos componentes prejudicada, pois há o aumento da intensidade da turbulência (SANDERSE, 2009). De acordo com Chamorro et al. (2012), a energia cinética turbulenta é uma dos parâmetros necessários para determinar o comportamento da esteira em turbinas eólicas.

1.3.3 Dinâmica dos fluidos computacional (CFD)

De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007), as equações governantes do escoamento de um fluido são baseadas nos princípios de conservação da massa, momento e energia. Estes equacionamentos descrevem o comportamento de todos os escoamentos. As equações de massa e momento se relacionam com a taxa de variação dessas propriedades dentro de um volume de controle. Já a equação da energia é derivada da primeira lei da termodinâmica, a qual afirma que a taxa de variação de energia em uma partícula de fluido é igual à taxa de calor fornecido e ao trabalho realizado no fluido.

Abaixo, é possível observar a equação da continuidade (Equação 1), que representa a equação da continuidade tridimensional para um fluido compressível. Onde ρ é a densidade, t é o tempo e u é o vetor velocidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

A equação da conservação da quantidade de movimento (Equação 2), onde τ_{ij} representa o tensor de tensões e g_i é o componente da gravidade na direção da coordenada x_i .

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

Estas equações podem ser representadas na forma diferencial ou integral. Ferziger & Peric (2002), afirmam que as equações governantes do escoamento dificilmente são resolvidas através de métodos analíticos, salve alguns casos especiais. Dessa forma, é necessário aplicar o método de discretização, que aproxima as equações diferenciais em um sistema de equações algébricas, para então ser resolvido através do computador. Então, pode-se afirmar que a dinâmica dos fluidos computacional consiste na solução das equações que descrevem o escoamento de fluidos através de métodos numéricos sofisticados.

Uma simulação do escoamento de um fluido através da dinâmica dos fluidos computacional, também conhecida como CFD, envolve diversos parâmetros, como malha numérica, condições de contorno, métodos numéricos, dentre outros. A seguir serão abordados tópicos essenciais para o entendimento da dinâmica dos fluidos computacional.

1.3.3.1 Modelo matemático

O modelo matemático é o ponto de partida para simulação. Essa etapa consiste na determinação das equações governantes (na forma diferencial ou integral) do problema a ser analisado e das condições de contorno (FERZIGER & PERIC, 2002). De acordo com Çengel & Cimbala (2007), as condições de contorno aplicadas para uma simulação CFD determinam o tipo de escoamento que será modelado. As condições de contorno são tão importantes quanto às equações governantes que definem o escoamento.

1.3.3.2 Método de discretização - volumes finitos

Como mencionado anteriormente, o método de discretização aproxima as equações diferenciais, que modelam o escoamento de fluido, em um sistema de equações algébricas para variáveis em um conjunto de posições discretas no espaço e tempo. Existem diferentes tipos de métodos de discretização, que podem ser escolhidos de acordo com o modelo a ser resolvido. Dentre os métodos mais comuns estão: diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos. Para a modelagem de escoamento de fluidos, o método dos volumes finitos é o mais utilizado na maioria dos softwares comerciais (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Segundo Andersson et al (2012), o método consiste na subdivisão do domínio computacional em um número finito de volumes de controle e na integração das equações governantes do escoamento em cada um dos volumes de controle. Em seguida, as equações integrais são transformadas em um sistema de equações algébricas que serão resolvidas através de um método iterativo.

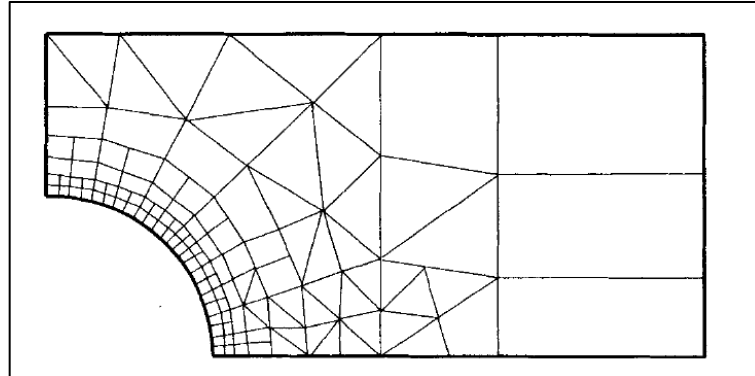
1.3.3.3 Malha numérica

O processo de discretização transforma o sistema contínuo em um sistema discreto de equações. Diante disso, a malha numérica, em uma simulação CFD, é a representação discreta do domínio geométrico em que o escoamento será calculado. A malha define as posições discretas em que as variáveis do escoamento serão calculadas (FERZIGER & PERIC, 2002). Esta representação é realizada através da divisão do domínio geométrico em um número finito de subdomínios, que podem ser elementos, volumes de controle e etc.

Há dois tipos principais de malha, as malhas estruturadas e não estruturada. As malhas estruturadas são caracterizadas por uma conexão regular, ou seja, cada elemento tem a mesma quantidade de vizinhos. Já as malhas não estruturadas (Figura 6), são compostas por elementos de diversas formas e possuem conexão irregular, na qual cada elemento pode ter diferentes números de vizinhos. Em geral, são usados triângulos e quadriláteros para problemas bidimensionais e tetraedros ou hexaedros para modelagens tridimensionais. Malhas não estruturada são mais

flexíveis, e indicadas para geometrias complexas. Além disso, este tipo de malha é mais fácil de ser criada e de ser refinada (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Figura 6 - Exemplo de uma malha não estruturada bidimensional



Fonte: Ferziger & Peric, 2002.

1.3.3.4 Métodos de solução

Segundo Versteeg & Malalasekera (2007), o processo de discretização gera um sistema linear de equações algébricas. A complexidade e o tamanho das equações geradas dependem da dimensão do problema, do número de nós da malha e do método de discretização aplicado. De acordo com os mesmos autores, há dois tipos de métodos de solução para equações algébricas lineares: métodos diretos e métodos iterativos. Exemplos de métodos diretos são a Regra de Cramer e a Eliminação de Gauss. Os métodos iterativos são baseados na aplicação, repetitiva, de algoritmos nos sistemas de equações até ocorrer à convergência. Este método inicia o procedimento através de uma estimativa inicial da solução, que pode ser obtida através da interpolação das condições de contorno para todos os elementos internos. A convergência é alcançada quando a diferença das soluções entre duas interações consecutivas (resíduo) é igual ou menor ao critério de convergência pré-definido.

1.3.3.4.1 Métodos de solução do software

O software ANSYS Fluent disponibiliza dois métodos numéricos de solução, um baseado na pressão e outro na densidade. Ambos os métodos utilizam o método de discretização dos volumes finitos. De acordo com o guia teórico do software (ANSYS, 2016), esses métodos possuem as seguintes funções principais:

- Dividir o domínio em volumes de controle discretos, através da malha numérica;
- Integrar as equações governantes do escoamento em cada volume de controle com o objetivo de desenvolver as equações algébricas para as variáveis discretas, como velocidade e pressão.
- Realizar a linearização das equações discretas e resolvê-las.

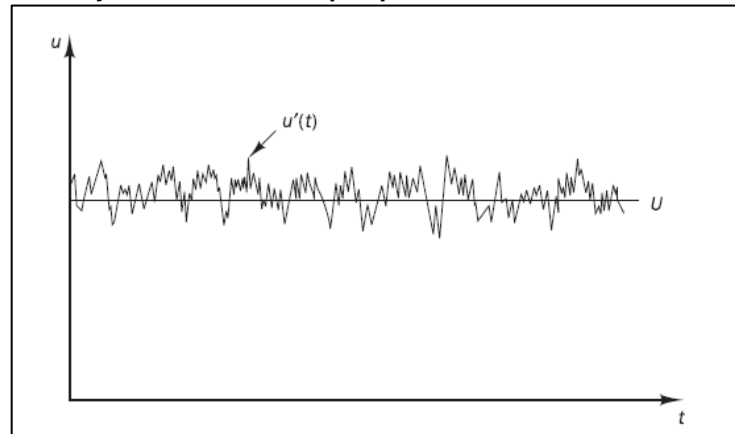
O método baseado na pressão foi desenvolvido para escoamentos incompressíveis de baixa velocidade, já o método baseado na densidade é indicado para escoamentos compressíveis de alta velocidade.

1.3.3.5 Escoamento turbulento

No escoamento de um fluido o número de Reynolds é a medida das forças inerciais e forças viscosas. Em problemas de engenharia, o escoamento se torna instável a partir de um determinado valor do número de Reynolds. O comportamento do escoamento se torna imprevisível e caótico, além disso, a velocidade e pressão mudam continuamente no decorrer do tempo. Este comportamento é conhecido como turbulência (ANDERSSON et al, 2012). O fenômeno da turbulência é encontrado em diversos tipos de escoamentos, desde escoamentos naturais como em rios, oceanos e na atmosfera, até em sistemas industriais como em trocadores de calor e reatores químicos.

De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007), experimentos com sistemas fluidos mostram que escoamentos com valores de Reynolds abaixo do valor crítico, o fluxo é regular e ordenado, caracterizando um escoamento laminar. Com valores acima do Reynolds crítico, o fluxo se torna turbulento, apresentando comportamento instável e todas suas propriedades variam de uma forma caótica. Essa oscilação caótica das propriedades é causada por estruturas com fluxo rotacional, que são observadas no escoamento turbulento, conhecidas como vórtices turbulentos (ANDERSSON et al, 2012). Na Figura 7 é mostrada a medição da velocidade em um escoamento turbulento:

Figura 7 - Medição de velocidade por ponto em um escoamento turbulento



Fonte: Versteeg & Malalasekera, 2007.

Devido à instabilidade do comportamento do escoamento, são necessários métodos numéricos que modelem os efeitos da turbulência. Esses métodos podem ser divididos em três: DNS, LES e RANS. O método DNS (Direct Numerical Simulation) resolve as equações governantes do escoamento de forma direta, para todos os movimentos do fluxo turbulento, sem nenhuma modelagem. Malhas bastantes refinadas com passos de tempo bem pequenos são aplicados a fim de determinar toda a gama de escalas turbulentas. Este método tem um alto custo computacional e não é utilizado em aplicações industriais (Versteeg & Malalasekera, 2007). O método LES (Large Eddy Simulation), por sua vez, resolve os movimentos de grande escala de forma direta como o DNS, e modela os movimentos de menor escala utilizando modelos de escalas sub-malha. Já o método RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) é obtido aplicando-se a decomposição de Reynolds nas equações governantes. Esta metodologia leva em consideração parte das flutuações devido à turbulência. O custo computacional para soluções precisas é razoável (ANDERSSON et al, 2012).

1.3.3.5.1 RANS

A decomposição de Reynolds consiste em representar o escoamento através da divisão em valores médios das propriedades do fluxo e valores aleatórios causados pela turbulência (ANDERSSON et al, 2012). Dessa maneira a velocidade instantânea, em um escoamento turbulento, pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (3)$$

Onde U representa o valor médio e u' , o valor flutuante causado pela turbulência.

Segundo Andersson et al (2012), aplicando a decomposição de Reynolds nas equações da continuidade e de conservação da quantidade de movimento é possível obter as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, como apresentado nas Equações 4 e 5, respectivamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\vartheta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - u'_i u'_j \right) \quad (5)$$

Onde u é a velocidade, t é o tempo, x é o comprimento, ϑ é a viscosidade cinemática, p a pressão e $u'_i u'_j$ é o tensor de tensões de Reynolds, que representa a perturbação média das flutuações.

De acordo com Ferziger & Peric (2002), o tensor de tensões de Reynolds insere novas incógnitas nas equações, fazendo com que o sistema tenha mais variáveis do que equações, gerando o chamado problema de fechamento matemático da turbulência. Para solucionar este problema é preciso introduzir modelos para avaliar o tensor de Reynolds.

A aproximação de Boussinesq é um dos métodos para o cálculo do tensor de Reynolds. Esta é baseada na suposição de que os componentes do tensor de tensões de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade. O modelo sugere que o transporte de momento através da turbulência é um processo difusivo e que a tensão de Reynolds pode ser modelada usando uma viscosidade turbulenta (Andersson et al, 2012). Em resumo, a aproximação de Boussinesq relaciona as forças viscosas e as tensões de Reynolds, expressando-as em função da viscosidade dos vórtices e do gradiente de velocidades. A aproximação é definida pela a equação 6.

$$-u'_i u'_j = \nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (6)$$

Onde,

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

Sendo v_t a viscosidade turbulenta e k representa a energia cinética turbulenta e é definida de acordo com a equação 8.

$$k = \frac{1}{2} (u'_i u'_j) \quad (8)$$

A viscosidade turbulenta é uma função do escoamento, diferente da viscosidade molecular que é uma propriedade do fluido. O valor de v_t varia de ponto a ponto no escoamento.

Para determinar o valor da viscosidade turbulenta são utilizados modelos de turbulência que consistem em conjuntos de equações. De acordo com Andersson et al (2012), esses modelos são classificados de acordo com o numero de equações de transporte adicionais. Segundo o mesmo autor, o modelo com duas equações é o mais utilizado em simulações de engenharia.

Segundo Versteeg & Malalasekera (2007), o modelo $k\omega$ – SST modela a tensão turbulenta através da equação da aproximação de Boussinesq, sendo a viscosidade turbulenta, v_t , calculada em função da energia cinética turbulenta, k , e da taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta, ω , como mostrado na equação 9.

$$v_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (9)$$

De acordo com Tande (2011), este método é bastante utilizado na indústria eólica, e tem sido utilizado por diversos pesquisadores ao redor do mundo. Segundo o mesmo autor, este modelo leva em consideração o transporte da tensão de cisalhamento turbulenta, e modela de forma precisa o início e a quantidade da separação da camada limite sob gradiente adverso de pressão.

1.3.3.6 Verificação e validação

De acordo com Versteeg & Malalasekera (2007), é necessário desenvolver métodos para quantificar o grau de confiança dos resultados. Para isso, é pratica comum em simulações computacionais realizar a verificação e a validação dos resultados. A verificação consiste em determinar se as equações foram resolvidas de forma correta. Já a validação indica a precisão com que o modelo computacional representa modelos reais (ANDERSSON et al, 2012).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, os dados da turbina eólica utilizada no estudo são mostrados e então é realizada a modelagem 3D da pá. A modelagem foi realizada no software SolidWorks a partir das características geométricas da pá. Com o modelo da pá definido, realizou-se a simulação fluidodinâmica no software ANSYS Fluent. E por fim, a verificação e validação dos resultados foram realizadas. A metodologia aplicada ao trabalho teve o objetivo de analisar apenas o escoamento no rotor da turbina apresentada. Componentes como a nacele, torre e cubo, não foram levados em consideração no estudo.

2.1 TURBINA NORDTANK

Para o desenvolvimento da análise foi escolhida a turbina eólica Nordtank 500/41 (figura 8), a qual é equipada com o modelo de pá LM 19.1 e tem uma potência nominal de 500 kW. A turbina foi fabricada e instalada pela empresa Nordtank e está situada no terreno do Riso National Laboratories na Dinamarca. Esta turbina foi escolhida devido à disponibilidade de especificações técnicas em literaturas como Hansen (2008), e por ter sido o foco de diversas pesquisas como realizado por Diznabi (2009) e por Zahle & Sorensen (2009).

Figura 8 - Turbina eólica Nordtank 500/41



Fonte: Amano & Malloy, 2009.

Abaixo são mostrados os principais dados da turbina de acordo com Hansen (2008):

- Raio do rotor: 20,5 m
- Número de pás: 3
- Velocidade de Acionamento: 4 m/s
- Velocidade de corte: 25 m/s
- Velocidade rotacional: 27,1 rpm

2.2 MODELAGEM EM CAD

Devido ao método adotado para a simulação fluidodinâmica, que será explicado posteriormente, foi gerado o modelo tridimensional de apenas uma pá. Esta, segundo Amano & Malloy (2009) utiliza o perfil aerodinâmico NACA 63-418. Na Tabela 1, são apresentadas as características geométricas que incluem os valores de corda, ângulo de torção e raio da seção ao longo do comprimento da pá.

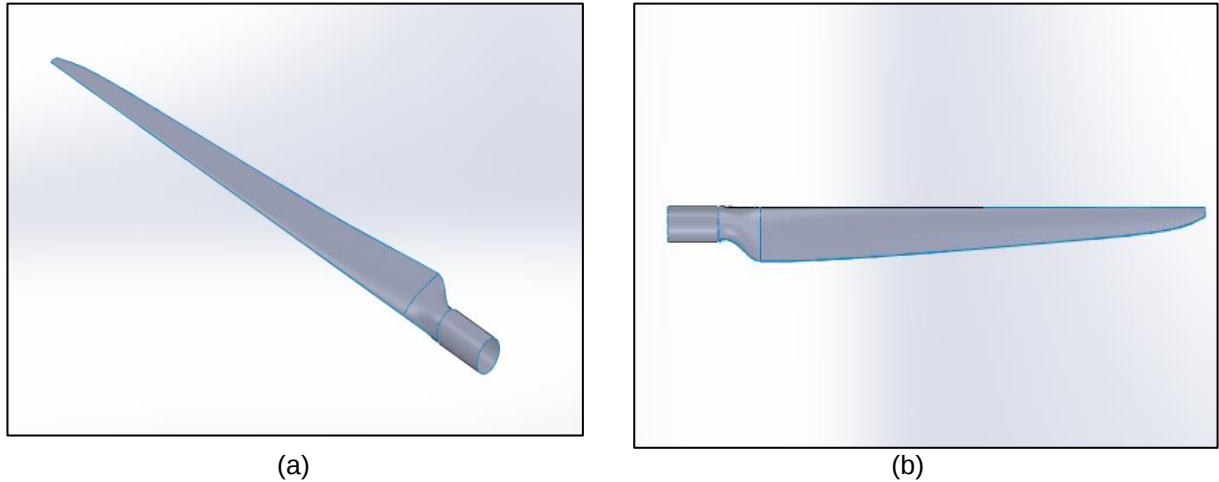
Tabela 1- Características Geométricas da Pá LM 19.1

R [m]	Torção [°]	Corda [m]
4,5	20,00	1,630
5,5	16,30	1,597
6,5	13,00	1,540
7,5	10,05	1,481
8,5	7,45	1,420
9,5	5,85	1,356
10,5	4,85	1,294
11,5	4,00	1,229
12,5	3,15	1,163
13,5	2,60	1,095
14,5	2,02	1,026
15,5	1,36	0,955
16,5	0,77	0,881
17,5	0,33	0,806
18,5	0,14	0,705
19,5	0,05	0,545
20,3	0,02	0,265

Fonte: Hansen, 2008.

A partir desses dados, foi possível realizar a modelagem tridimensional através do software de CAD, Solidworks. O modelo é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo em CAD da pá LM 19.1. (a) Vista Isométrica (b) Vista Frontal



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

2.3 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA

Nesta seção é apresentada a metodologia para a simulação numérica utilizando o software ANSYS Fluent.

2.3.1 Modelo matemático

As equações governantes da simulação são as equações da continuidade e conservação da quantidade de movimento. Essas equações serão aplicadas na simulação na forma de Moving Reference Frame, através do software ANSYS Fluent. De acordo com o guia teórico do software (ANSYS, 2016), este método é aplicado em simulações que tenham partes móveis e que o fluxo ao redor tenha influência nos resultados. Quando este modo está ativado, um termo que representa a aceleração é adicionado nas equações governantes do escoamento.

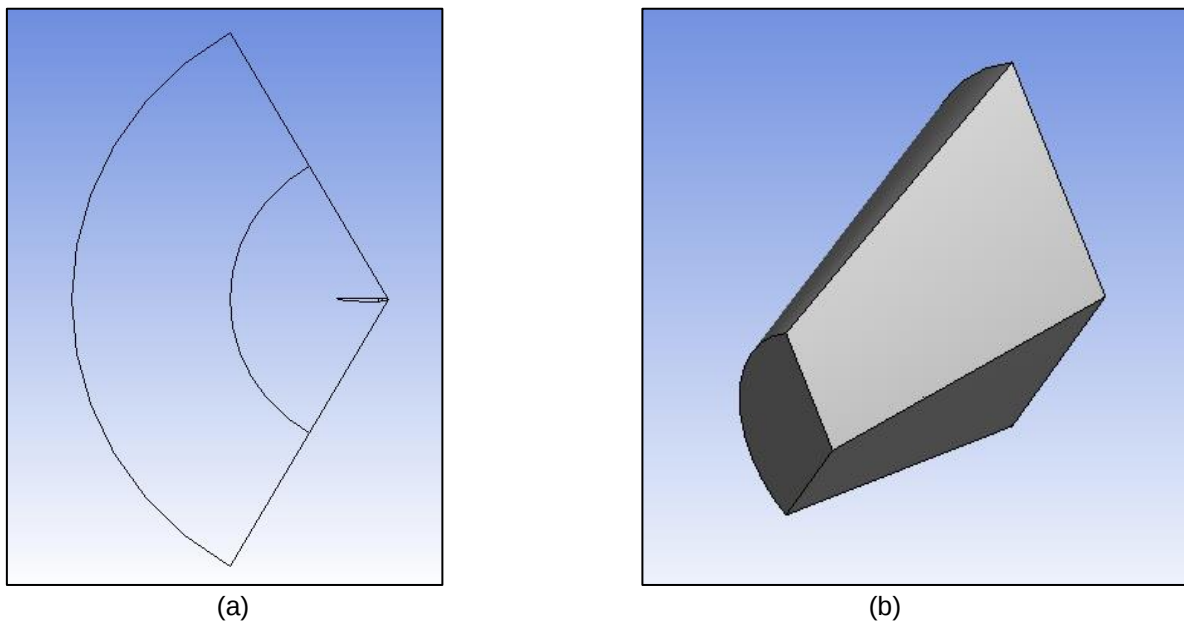
2.3.2 Domínio computacional

Para a simulação foi necessário desenhar o domínio, que é o ambiente que envolve o rotor. O domínio deve ser grande o suficiente para evitar que efeitos indesejáveis interfiram significativamente no campo de escoamento. Apesar do rotor

da turbina ser formado por três pás, somente uma pá será analisada na simulação, então apenas 1/3 do domínio foi representado. Essa representação diminui a quantidade de elementos na malha e consequentemente reduz o custo computacional. Essa prática é possível através da aplicação das condições de contorno periódicas.

Para determinar o comprimento do domínio foi utilizada como base a norma IEC 61400-12-1, que determina uma distância razoável para o desenvolvimento do escoamento após o rotor de 2 a 4 diâmetros da turbina. O domínio foi criado utilizando a terça parte de dois círculos concêntricos. O primeiro círculo possui 61,5 m de raio e está distante 60 metros da pá, enquanto os valores para o segundo são de 123 e 120, respectivamente. O comprimento total do domínio é de 180 metros, sendo bem maior que o comprimento da pá, dessa maneira, eliminando qualquer possibilidade de interferência no campo de escoamento e nos resultados da simulação. O domínio é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Domínio Computacional: (a) Vista Frontal (b) Vista Isométrica



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

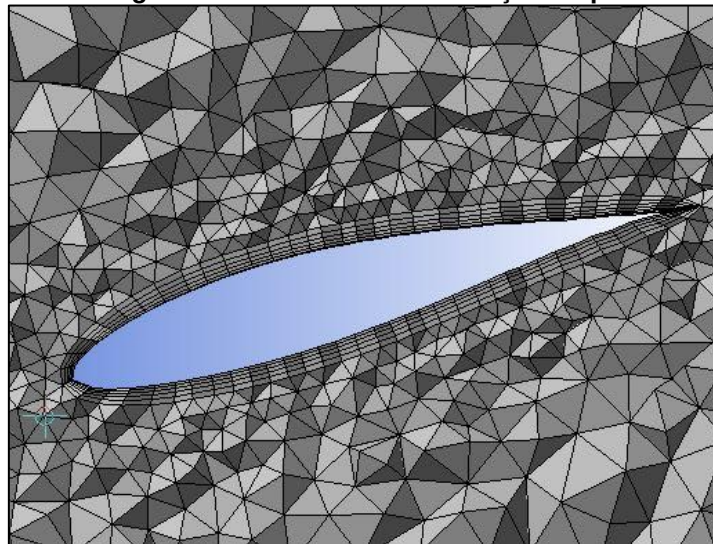
2.3.3 Malha numérica e estudo de independência

A malha é um ponto fundamental para alcançar uma solução numérica precisa. O refino da malha pode trazer melhores resultados, porém isso aumenta bastante o custo computacional, dificultando a análise do problema. Então, um maior refinamento da malha pode não compensar. Para o presente estudo, a malha foi

gerada utilizando o software ANSYS Meshing, através o qual é possível gerar diversos tipos de malha, desde problemas estruturais ate fluidodinâmicos. O software mostrou-se uma ferramenta versátil para o caso analisado.

Através do software é possível controlar os tamanhos mínimos e máximos dos elementos da malha. A região próxima da pá requer uma malha mais fina e com maior número de elementos, com o objetivo de modelar de forma precisa o desempenho do rotor. Para isso, foram utilizados os recursos inflation e sizing. O inflation é um recurso que gera camadas próximas da superfície da pá para modelar a camada limite, permitindo calcular com precisão os valores de pressão ao longo da superfície. Na Figura 11 é mostrado o recurso inflation aplicado à pá.

Figura 11 - Inflation em uma seção da pá



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

Já o sizing é uma função que determina o tamanho dos elementos na superfície da pá. As configurações de size function controlam parâmetros da malha como o ângulo entre elementos adjacentes, número de elementos entre geometrias e a transição entre os tamanhos mínimos e máximos dos elementos, baseado na taxa de crescimento. Para essa configuração foi escolhido “proximity and curvature”, pois essa opção favorece a geração de malha em superfícies curvilíneas, como é o caso da pá.

Com o objetivo de analisar a qualidade da malha, é pratica comum em simulações computacionais realizar um estudo de independência de malha. De acordo com Çengel & Cimbala (2007), a metodologia padrão para testar a independência de malha é realizar um refinamento e repetir a simulação, se os resultados não mudarem de forma considerável, a malha original provavelmente é

apropriada para a simulação. Caso o resultado mude de forma significativa, a malha original tem uma resolução inapropriada para o problema.

Para o estudo, o parâmetro para investigar a independência da malha foi o torque gerado pela pá. Foram realizadas cinco simulações, refinando a malha através de configurações do ANSYS Meshing. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 2 - Análise de independência de malha

Malha	Número de Elementos	Torque [kN*m]
1	213.010	0,8716
2	467.392	2,0923
3	703.805	4,6619
4	1.109.135	6,0853
5	1.760.265	6,4873

Fonte: Produzido pelo autor (2019).

A partir dos dados da análise de independência de malha é possível observar que a melhora nos resultados da malha 4 para a malha 5 não alcança 10%. Então, foi possível chegar a uma malha de qualidade satisfatória, onde já não havia melhora significativa na precisão do resultado com o aumento do número de elementos. Assim, a malha 4 com 1.109.135 de elementos foi escolhida para a simulação. Para avaliar a qualidade da malha foi utilizado o critério denominado skewness. Esse critério determina o quanto o formato dos elementos de malha está próximo do ideal. De acordo com o manual do software (ANSYS, 2016), a skewness indica a qualidade do elemento em uma faixa de 0 a 1, onde 0 indica um elemento equilátero, ou seja, de ótima qualidade e 1 indica um elemento deformado. Na Tabela 3 são mostrados os valores de skewness e a respectiva qualidade do elemento de acordo com o manual do software.

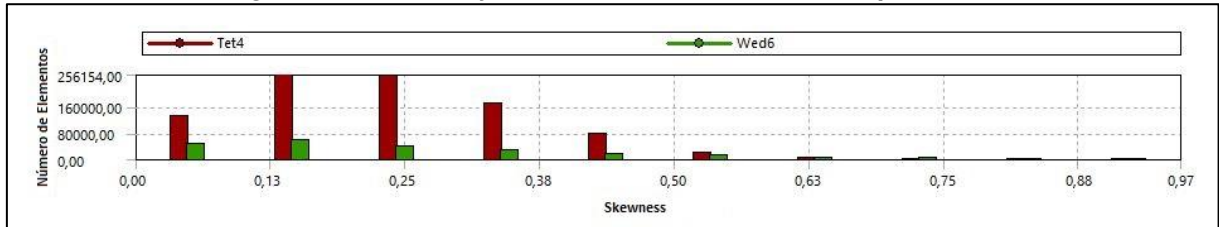
Tabela 3 - Valores de skewness e qualidade do elemento

Skewness	Qualidade do elemento
1	Degenerado
0,90 – 1	Ruim
0,75 – 0,9	Pobre
0,50 – 0,75	Razoável
0,25 – 0,50	Bom
0,25 – 0	Excelente
0	Equilátero

Fonte: Manual ANSYS Meshing, 2016.

A Figura 12 mostra a distribuição dos elementos de malha em relação ao critério de qualidade. Na figura, a coluna vermelha indica os elementos de formato tetraédricos, já a coluna verde exibe os elementos com formato de prisma.

Figura 12 - Distribuição dos elementos na faixa de qualidade



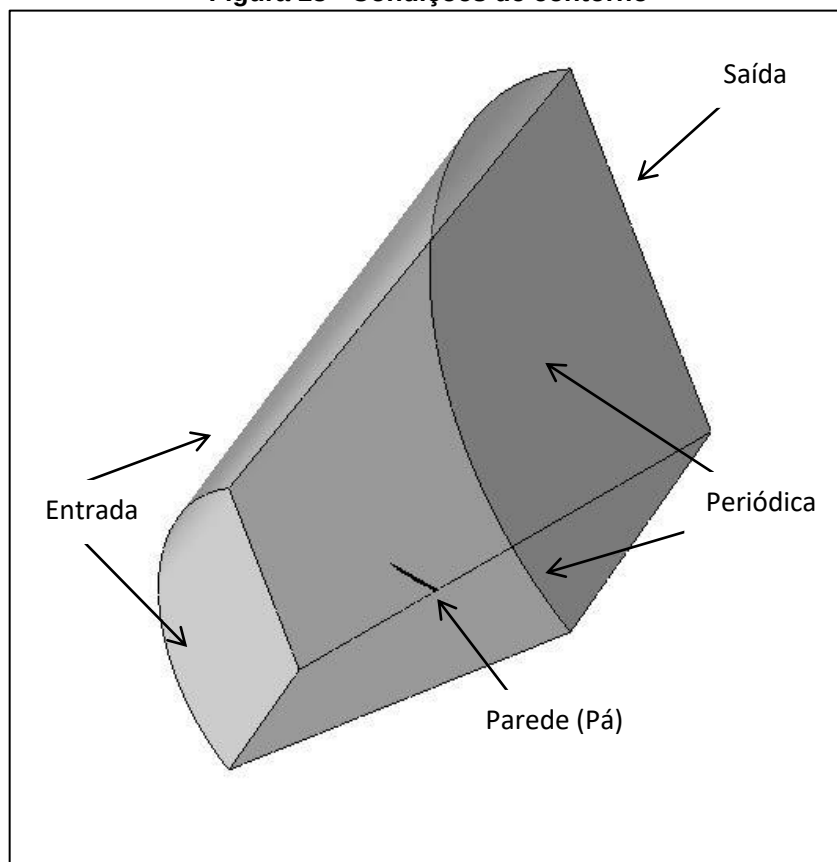
Fonte: Produzido pelo autor (2019)

É possível observar na figura que a maioria dos elementos da malha gerada está abaixo do valor de 0,50. Do total dos elementos, 96% estão dentro da faixa de qualidade bom, excelente ou equilátero e apenas 4% dos elementos não possuem formato satisfatório.

2.3.4 Configuração do ANSYS Fluent

A determinação das condições de contorno é uma etapa crítica de simulações numéricas, sendo importante especificá-las de forma adequada. As condições de contorno foram atribuídas ao domínio mencionado anteriormente, e são mostradas na Figura 13. Na condição de entrada, a velocidade do escoamento do fluido é especificada para a face. A condição de saída é do tipo pressão, na qual indica que o fluido escoar para fora do domínio computacional. A pressão nessa face é igual à pressão atmosférica, indicando uma superfície aberta. Na condição de contorno periódica as variáveis de escoamento ao longo de uma face periódica estão numericamente vinculadas a uma segunda face de forma análoga (ÇENGEL & CIMBALA, 2007). Dessa maneira, o movimento da pá atravessa a primeira face periódica e entra na segunda com características idênticas. De forma simples, essa condição indica a repetição das condições de contorno nos 2/3 restantes do domínio. Para a pá foi determinado à condição de contorno do tipo parede sem deslizamento, ou seja, um obstáculo ao fluxo de ar.

Figura 13 - Condições de contorno



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

Para o presente trabalho, o método numérico escolhido foi o baseado na pressão. O campo de pressão é modelado através de equações de correção da pressão que são obtidas através das equações da continuidade e do momento. Os campos de velocidade são obtidos através das equações de momento. Para a modelagem do escoamento através deste método numérico, foi selecionado o algoritmo acoplado. Este algoritmo resolve as equações de momento e continuidade ao mesmo tempo. Para a turbulência foi utilizado o modelo $k\omega$ – SST de duas equações. O critério de convergência adotado para o processo iterativo foi de 0,0001. Para os métodos de discretização, foram escolhidos os esquemas de segunda ordem, pois, de acordo com o manual do ANSYS Fluent, eles garantem uma maior precisão nos resultados. No quadro 1 são mostrados os métodos de discretização utilizados.

Quadro 1 - Métodos de Discretização

Variável do Escoamento	Método
Gradiente	Least Squares Cell Based
Pressão	Second Order
Momento	Second Order Upwind
Energia Cinética Turbulenta	Second Order Upwind
Taxa de Dissipação Específica	Second Order Upwind

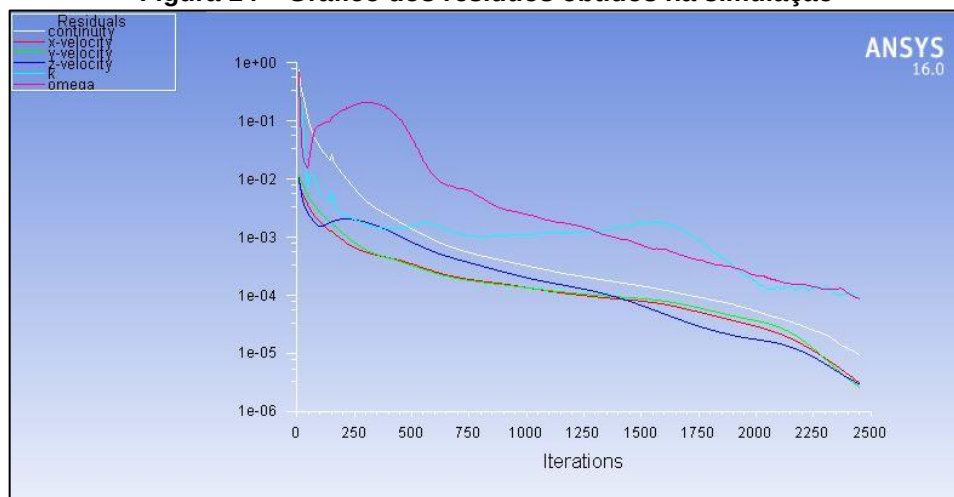
Fonte: Produzido pelo autor (2019)

2.3.5 Verificação e validação

Para a verificação do modelo, foi analisado o valor de balanço de massa e o número de iterações necessárias para haver a convergência da solução final. E, a simulação foi validada através da comparação dos valores de potência mecânica gerados pela simulação e valores experimentais disponíveis em Hansen (2008). A potência mecânica foi calculada a partir da multiplicação da velocidade angular da pá pelo valor de torque extraído da simulação.

Inicialmente foram analisados os resíduos da simulação, apresentados na Figura 14, a fim de verificar o modelo. É possível observar que foram necessárias em torno de 2500 iterações para que todas as variáveis do escoamento alcançassem o critério de convergência definido. Para a verificação, também foi analisado o balanço de massa final da solução, a fim de verificar o princípio da conservação da massa. Ao fim das iterações foi alcançado um valor de 0,0332 kg/s, sendo bem próximo de zero. Isto indica que o modelo computacional apresenta um bom desempenho.

Figura 14 – Gráfico dos resíduos obtidos na simulação



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

Para realizar a validação foram comparados os valores de potência mecânica para duas velocidades de escoamento, 6 m/s e 8 m/s. De acordo com os dados mostrados na Tabela 4, é possível observar que os erros relativos entre os valores para a potência do modelo experimental e da simulação ficaram abaixo de 4%. Assim, pode-se afirmar que a simulação apresentou precisão satisfatória em relação ao modelo experimental.

Tabela 4 - Dados da validação

Velocidade [m/s]	Simulação [kW]	Experimental [kW]	Erro [%]
6	65,47	66,80	2,03
8	172,70	178,90	3,59

Fonte: Produzido pelo autor (2019)

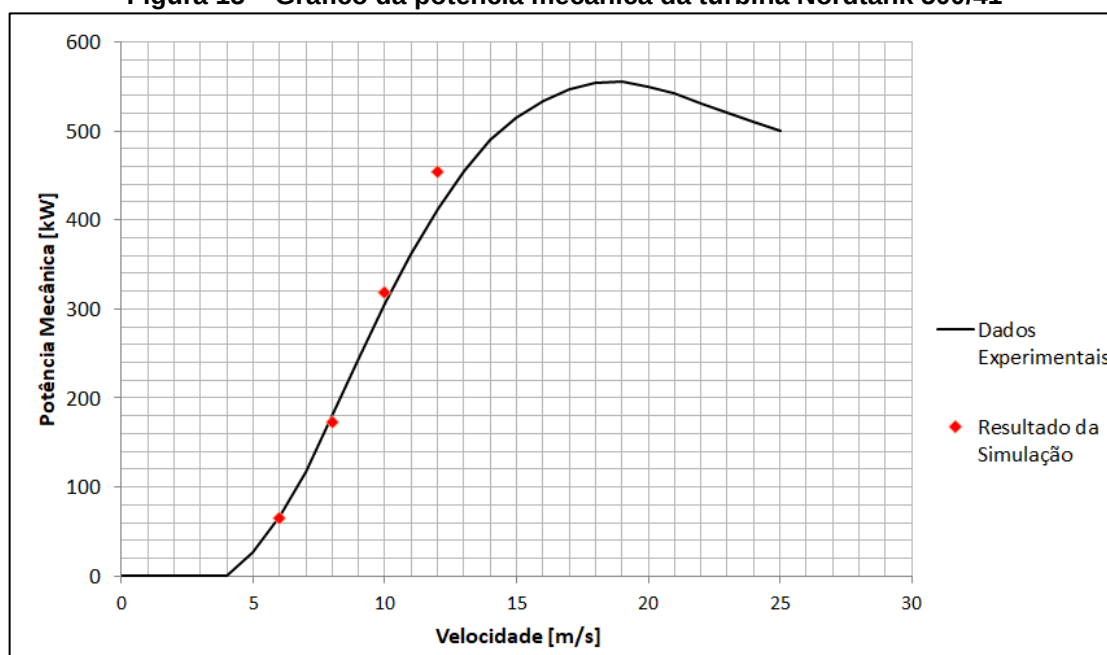
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados alcançados com a simulação: desempenho da turbina e análise do escoamento na pá.

3.1 DESEMPENHO DA TURBINA

Através da simulação foram obtidos os valores para o desempenho da turbina, que incluem o torque gerado pelo eixo, o empuxo atuante no rotor e a potência mecânica gerada. Devido a limitações computacionais, o rotor foi simulado apenas para quatro velocidades de escoamento: 6, 8, 10 e 12 m/s. A Figura 15 mostra o gráfico da potência mecânica em função da velocidade do vento do modelo experimental (HANSEN, 2008) e os valores obtidos na simulação.

Figura 15 – Gráfico da potência mecânica da turbina Nordtank 500/41



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

A Tabela 5 apresenta os valores de torque e empuxo gerados na simulação.

Tabela 5 - Valores de torque e empuxo para as velocidades

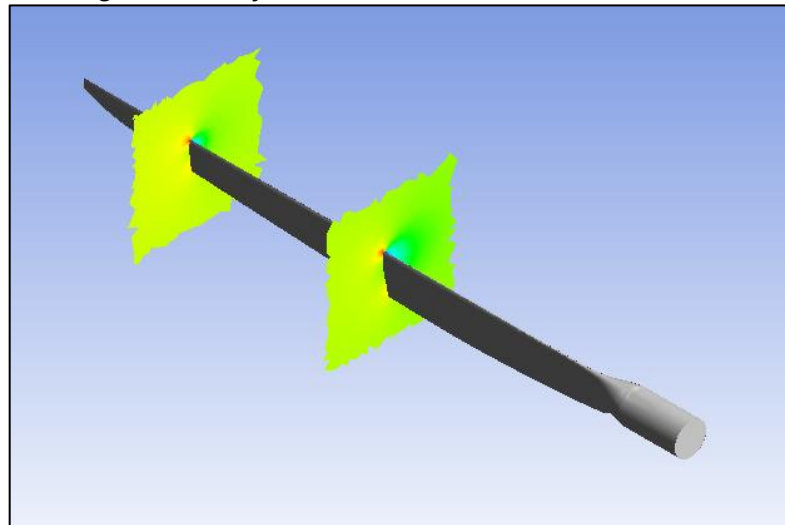
Velocidade [m/s]	Torque [kN*m]	Empuxo [kN]
6	7,68	24,39
8	15,23	44,75
10	22,45	69,15
12	26,67	82,50

Fonte: Produzido pelo autor (2019)

3.2 ANÁLISE DO ESCOAMENTO

Foram analisados os contornos de pressão nas seções do perfil aerodinâmico da pá, para as velocidades de vento de 6 e 10 m/s. Nos gráficos é possível observar a diferença de pressão entre o extradorso e o intradorso do perfil da pá. As seções de corte escolhidas para a análise dos contornos de pressão foram para razões r/R (porcentagem do raio total) de 0,5 e 0,8 como mostrado na Figura 16.

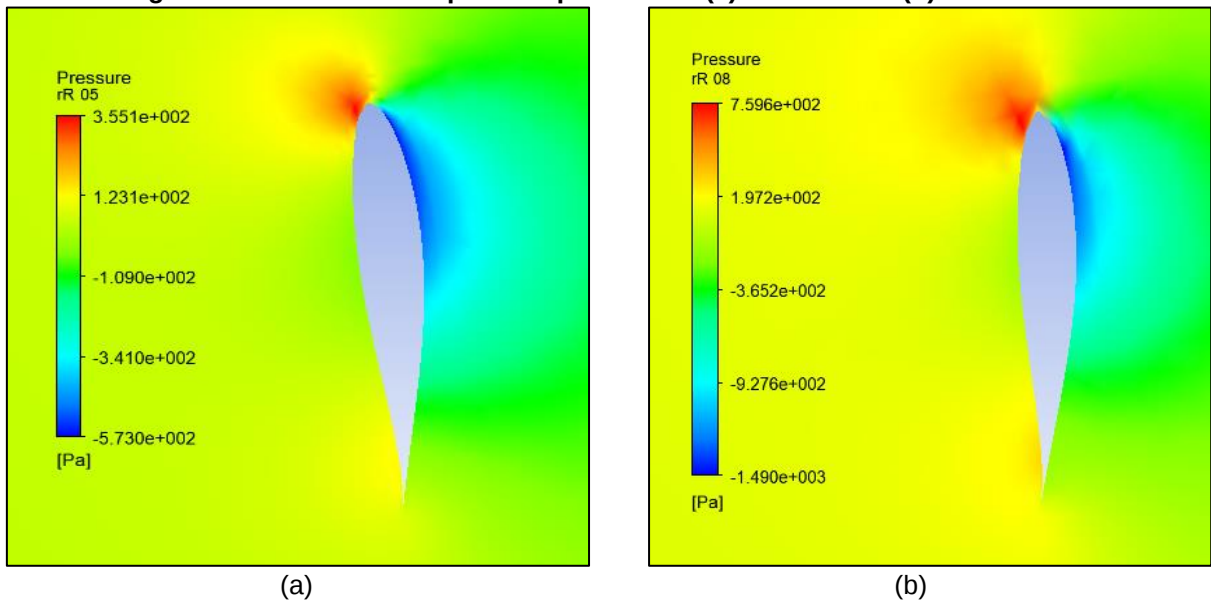
Figura 16 - Seções de corte: 50% e 80% do raio total



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

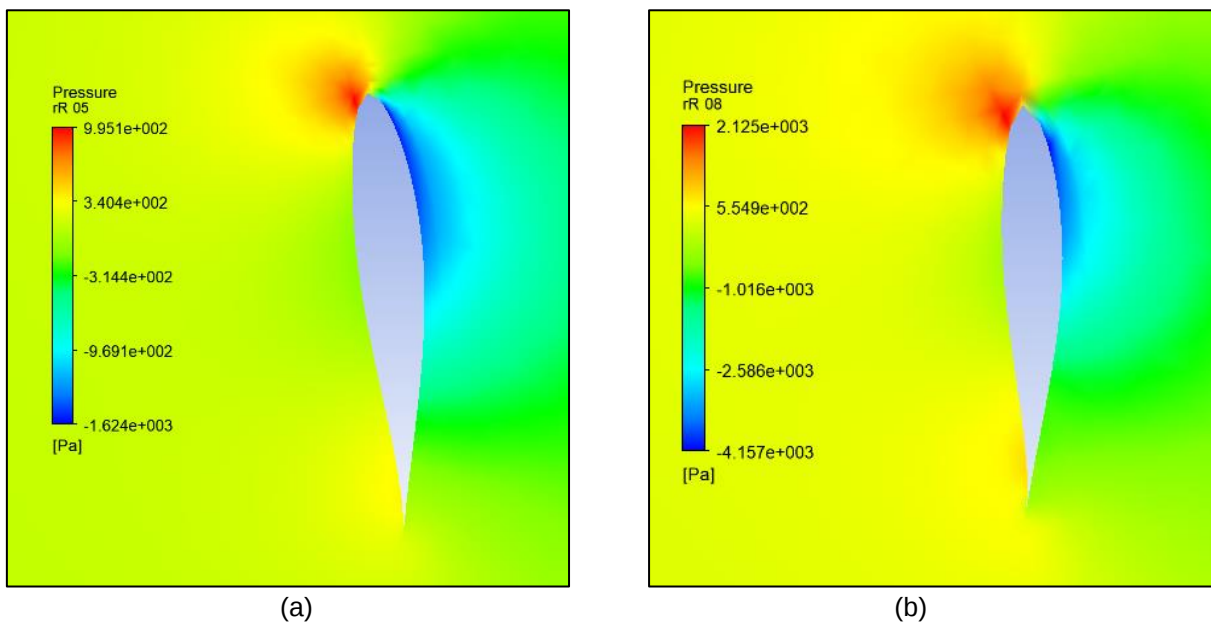
A partir das Figuras 17 e 18 é possível observar que à medida que o raio da pá aumenta, a diferença de pressão entre o intradorso e o extradorso aumenta. Esse comportamento ocorre devido ao aumento da velocidade relativa ao longo do comprimento da pá. A velocidade de incidência do vento no perfil aerodinâmico aumenta, dessa maneira reduzindo a pressão no extradorso (MANWELL et al, 2002). Também foi analisada a relação da velocidade de escoamento do ar e a pressão no perfil. Para a porcentagem do raio de 80%, a pressão máxima no perfil aerodinâmico para a velocidade de 6 m/s foi de 759,6 Pa, já para a velocidade de 10 m/s foi observado um aumento da pressão para 2125,0 Pa.

Figura 17 - Contornos de pressão para 6 m/s: (a) 50% do raio (b) 80% do raio



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

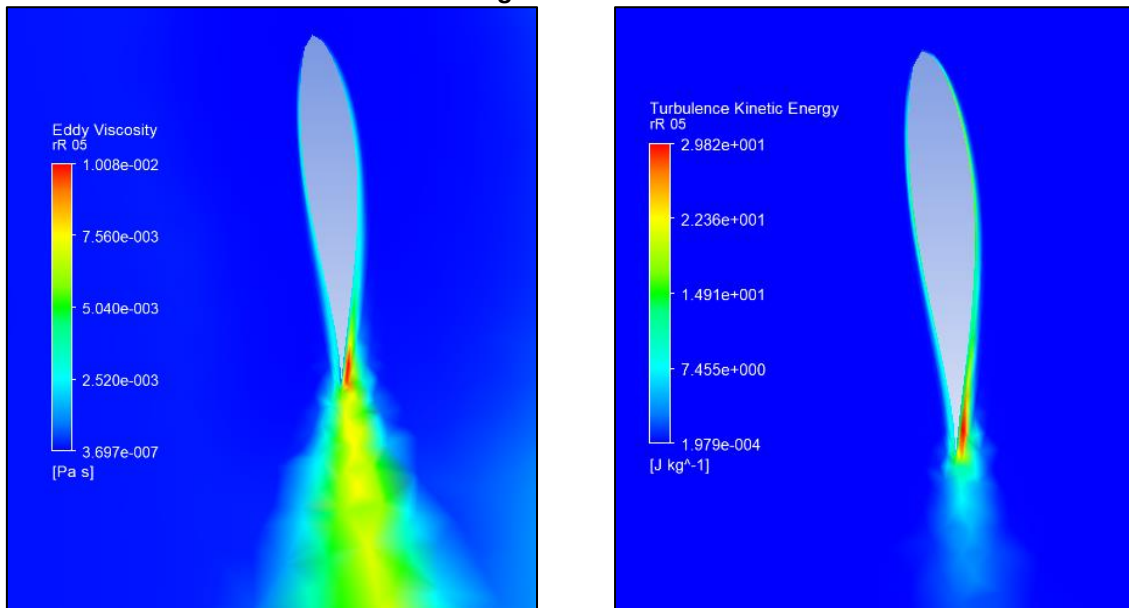
Figura 18 - Contornos de pressão para 10 m/s: (a) 50% do raio (b) 80% do raio



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

Para mostrar a turbulência que atua no perfil da pá, foram analisados os valores da viscosidade dos vórtices turbulentos e da energia cinética turbulenta. Através da Figura 19, é possível notar que a turbulência é mais intensa em regiões próximas ao bordo de fuga do perfil. Nessa região ocorre a transição do escoamento de laminar para turbulento devido à separação da camada limite.

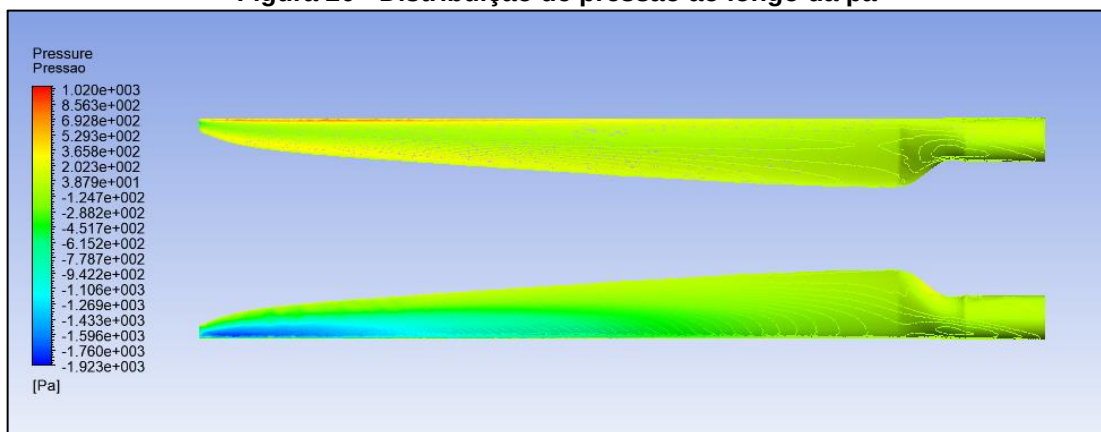
Figura 19 - Turbulência no perfil da pá para 10 m/s: (a) Viscosidade dos vórtices turbulentos (b) Energia cinética turbulenta



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

A distribuição de pressão do fluido ao longo de toda a pá foi analisada e é mostrada na Figura 20, para os lados de incidência e de saída do vento na pá. A parte da pá com maior pressão se concentra na região do bordo de ataque. Essa região estará sujeita a carga aerodinâmica mais elevada. Já as regiões com pressão negativa ficam na região de saída do ar.

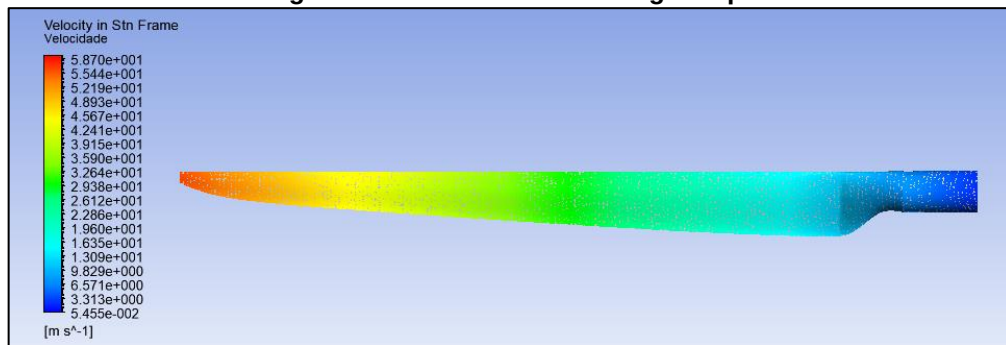
Figura 20 - Distribuição de pressão ao longo da pá



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

Também foram analisadas as velocidades do ar na superfície da pá. Através da figura 21, é possível observar que a velocidade na superfície aumenta ao longo da pá, em decorrência da velocidade causada pela rotação do rotor.

Figura 21 - Velocidades ao longo da pá

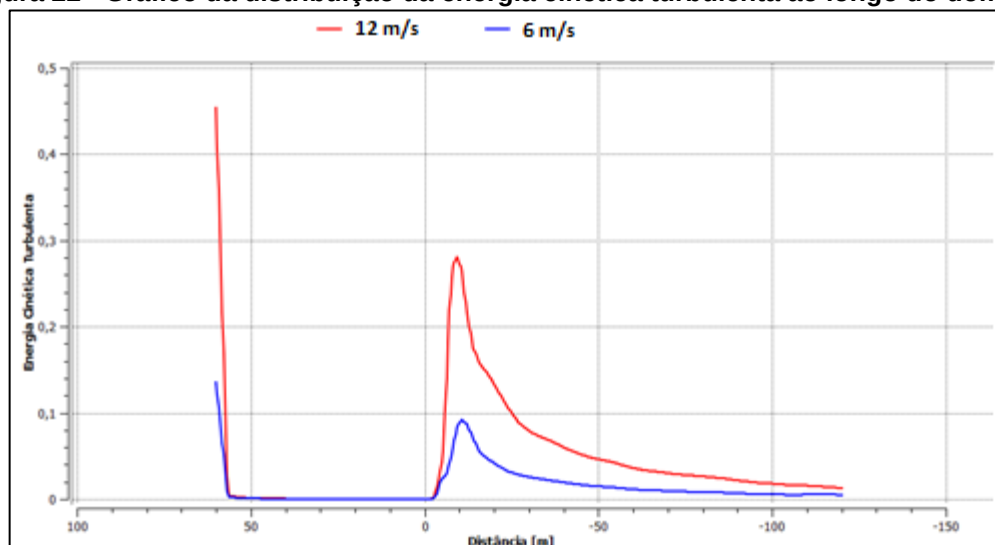


Fonte: Produzido pelo autor (2019)

A formação da esteira aerodinâmica foi analisada para as velocidades de 6 e 12 m/s. No gráfico da Figura 22, o eixo x representa o comprimento do domínio, sendo o ponto zero a posição do rotor, e o eixo y os valores para a energia cinética turbulenta. Para a velocidade de 12 m/s a energia cinética turbulenta é mais intensa devido a velocidade do escoamento, então, a dissipação da energia ocorre a uma distância maior após o rotor. Já para a velocidade de 6 m/s, a energia é dissipada em uma distância consideravelmente menor.

Para a velocidade de 6 m/s a esteira aerodinâmica é minimizada em aproximadamente 80 metros após o rotor, ou seja, em torno de aproximadamente 2 diâmetros do rotor. É possível observar na Figura 22 que a partir desta distância a energia cinética turbulenta está bem próxima de zero. Já para a velocidade de 12 m/s a esteira tende a minimizar a partir de 110 metros. Estes valores estão de acordo com a norma IEC 61400-12-1 que determina que uma distância razoável para a minimização do efeito esteira é de 2 a 4 diâmetros do rotor.

Figura 22 - Gráfico da distribuição da energia cinética turbulenta ao longo do domínio



Fonte: Produzido pelo autor (2019)

4 CONCLUSÃO

O uso de energias renováveis no mundo tende a crescer cada vez mais. Isso se comprova diante do grau de investimento que países desenvolvidos tem feito na pesquisa e desenvolvimento nessa área. Diante disso o presente trabalho apresentou um estudo sobre turbinas eólicas através da dinâmica dos fluidos computacional. Análises utilizando essa metodologia têm sido cada vez mais aplicadas, devido ao alto custo, ou até inviabilidade técnica, de experimentos envolvendo turbinas eólicas. Pode-se afirmar que a ferramenta da dinâmica dos fluidos computacional é de grande importância para o desenvolvimento de novas tecnologias no setor eólico. Diversos parâmetros podem ser simulados, possibilitando o teste e validação de inovações.

Para a realização da simulação fluidodinâmica, o domínio computacional representou bem o campo de escoamento, sendo de tamanho suficiente para o desenvolvimento do fluxo sem a ocorrência de fenômenos que interferissem na simulação. A malha computacional gerada apresentou desempenho satisfatório, tendo em vista a precisão dos resultados. A partir da verificação e da validação, foi possível concluir que os resultados obtidos no estudo foram satisfatórios, pois os erros relativos entre os valores obtidos na simulação e os valores do modelo experimental ficaram abaixo de 4%, o que indica um bom nível de precisão.

Os resultados para o escoamento mostraram concordância com a teoria da aerodinâmica de turbinas eólicas. Através dos contornos de pressão nas seções da pá, foi possível observar o aumento da diferença de pressão entre as superfícies do perfil devido ao aumento da velocidade relativa ao longo do comprimento. A partir da distribuição da pressão ao longo da pá, foi possível observar as regiões que estão sujeitas a cargas aerodinâmicas mais intensas. Para a esteira aerodinâmica foi observado a influência da velocidade do escoamento na minimização do efeito. A turbina NTK 500/41 atendeu os valores da norma IEC 61400-12-1 que determina os valores para a minimização do efeito esteira.

Através da simulação fluidodinâmica foi possível determinar características da turbina que seriam difíceis ou até mesmo inviáveis de determinar através de métodos experimentais. Um exemplo é o comportamento do escoamento na superfície das pás e o empuxo gerado pelo rotor.

Como recomendações para trabalhos futuros, pode-se destacar o uso de softwares com recursos para ajuste fino de malha a fim de melhorar os indicadores de qualidade, pois a malha é crucial para a modelagem de escoamentos tridimensionais de rotores eólicos. Com os dados gerados na simulação fluidodinâmica pode ser realizada uma análise fluido-estrutural. Com a distribuição de pressão ao longo da pá, é possível realizar uma análise estrutural a fim de verificar as tensões e deformações que a pá sofre devido às cargas aerodinâmicas. Também, é possível realizar alterações na geometria da pá e validar de acordo com a simulação, verificando a melhora no desempenho do rotor.

REFERÊNCIAS

AMANO, R. S.; MALLOY, R. J. CFD Analysis on Aerodynamic Design Optimization of Wind Turbine Rotor Blades. **International Journal Of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic And Manufacturing Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 12, p. 1450-1454, 2009.

ANDERSSON, Bengt et al. **Computational Fluid Dynamics for Engineers**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

ANSYS, Inc. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Canonsburg: ANSYS. 2016

BURTON, Tony et al. **Wind Energy: Handbook**. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

CARCANGIU, Carlo Enrico. **CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbines**. 2008. 141 p. Tese (Doutorado) - Doctor of Philosophy, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Dimeca, Università Degli Studi di Cagliari, Cagliari.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2007.

CHAMORRO, L. P. et al. On the evolution of turbulent scales in the wake of a wind turbine model. **Journal Of Turbulence**, [s.l.], v. 13, p.1-13, jan. 2012.

DIZNABI, Babak. **Investigation of the flow relation to nacelle anemometry**. 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Department Of Mechanical Engineering, Technical University Of Denmark, Roskilde, 2009.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro, 2017.

FERZIGER, Joel H.; PERIC, Milovan. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Heidelberg: Springer, 2002.

HANSEN, Martin O. L.. **Aerodynamics of wind turbines**. 2. ed. London: Earthscan, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61400-12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines**. 1 ed. [s.l.], 2005. 96 p.

IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Relatório Especial sobre Aquecimento Global de 1.5°C (SR15)**. 2018.

IVANELL, S. **Numerical Computations of Wind Turbine Wakes**. Gotland University. Stockholm. 2009.

MACEDO, Luziene Dantas de. **Produção de energia elétrica por fonte eólica no Brasil e aspectos de seu impacto na região nordeste e Rio Grande do Norte**.

2015. 403 f. Tese (Doutorado) - Curso de Economia, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.

MATHEW, Sathyajith. **Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics**. Heidelberg: Springer, 2006.

MME. Ministério de Mina e Energia. **Boletim de Energia Eólica Brasil e Mundo – Base 2016**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/15+-+Energia+E%C3%B3lica+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29+-+NOVO/f63a15ea-9d2c-4d27-9400-5d7c3fd97b22?version=1.4>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2018.

OLIVEIRA NETO, Calisto Rocha de. **Energia eólica e desenvolvimento no terceiro milênio: reflexões a partir do Brasil, Nordeste e Rio Grande do Norte**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Centro de Ciencias Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

RÊGO, Victor Cintra. **Estudo experimental do escoamento turbulento em esteira de modelo de turbina de eixo horizontal**. 2017. 172 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SANDERSE, B. ECN Wind Energy. **Aerodynamics of wind turbine wakes**. ECN Publication, 2009. 46 p.

SCHUBEL, P. J.; CROSSLEY, R. J. Wind Turbine Blade Design. **Energies**, [s.l.], v. 5, n. 9, p. 3425-3449, 6 set. 2012.

SORENSEN, J. N. **Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion**. Annual Reviews of Fluid Mechanics, Lyngby, 2011.

TANDE, Jørgen Jensen. **CFD Study of a 10 MW Offshore Horizontal Axis Wind Turbine Blade**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Department Of Physics, Norwegian University Of Science And Technology, Trondheim, 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W.. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

Zahle, F., & Sørensen, N. N. (2009). Characterisation of the Unsteady Flow in the Nacelle Region of a Modern Wind Turbine. In Buhl, T. (Ed.). **Research in Aeroelasticity EFP-2007-II**. Roskilde: Technical University of Denmark, Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, 2009. p. 30-41.