

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS / FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL**

Eric Vargas Loureiro

Metodologia para análises aerodinâmicas de hélices

Juiz de Fora

2020

Eric Vargas Loureiro

Metodologia para análises aerodinâmicas de hélices

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional.

Orientadora: Profa. D.Sc. Patrícia Habib Hallak

Juiz de Fora

2020

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Vargas Loureiro, Eric.

Metodologia para análises aerodinâmicas de hélices / Eric Vargas Loureiro. – 2020.

102 f. : il.

Orientadora: Patrícia Habib Hallak

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas / Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, 2020.

1. Modelagem. 2. Hélices. 3. OpenFOAM. I. Habib Hallak, Patrícia, orient. II. Título.

Eric Vargas Loureiro

Metodologia para análises aerodinâmicas de hélices

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional.

Aprovada em 04 de março de 2020

BANCA EXAMINADORA

Profa. D.Sc. Patrícia Habib Hallak - Orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D.Sc. Flávio de Souza Barbosa
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. D.Sc. Suzana Moreira Ávila
Universidade de Brasília

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível. Agradeço à minha mãe, Virginia, por sempre fazer o possível e o impossível por mim. À minha tia, Valéria, e à minha vó, Maria Cândida, por sempre me cobrarem e incentivarem. À professora, Patrícia, pelo apoio prestado nesse período e neste trabalho final. Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram para meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional no decorrer destes anos.

Agradeço à UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), ao PPGMC (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional) e ao MAC (Departamento de Mecânica Computacional e Aplicada) pelas diversas orientações e conhecimentos repassados. Agradeço também à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de estudos durante o período integral do curso de mestrado.

RESUMO

As hélices são amplamente utilizadas para diversas finalidades em nosso cotidiano. São dispositivos rotativos que podem gerar empuxo para um sistema quando acopladas a um motor, ou, quando acionadas pelo vento, capazes de transformar sua energia cinética de rotação em outro tipo de energia que seja do interesse do usuário. Devido a isso, análises aerodinâmicas são necessárias para avaliar o empuxo e o torque que as hélices são capazes de absorver ou entregar.

Dentre as ferramentas disponíveis para tal fim, destaca-se a dinâmica dos fluidos computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics), que foi usada por ser a mais completa, sendo capaz de incorporar mais informações no processo de modelagem. Em geral, as principais preocupações com o uso do CFD se encontram na complexidade de sua geometria, que na maioria das vezes não é disponibilizada pelo fabricante, na geração da malha e no uso dos métodos numéricos apropriados para solucionar o problema. O emprego da CFD para a obtenção do empuxo e torque de hélices é o principal objetivo desta pesquisa. Para tal, foi utilizado o software livre e aberto OpenFOAM.

Se tratando disso, o domínio computacional é subdividido em dois subdomínios, o rotativo que compreende a hélice e uma região externa estacionária. A ferramenta computacional tem que ser capaz de captar o movimento do domínio rotativo da hélice e transferir as informações para o restante do domínio computacional que é estacionário. Nas interfaces entre ambos, não há um perfeito encaixe entre os nós e os elementos de uma malha para a outra. Contudo, a técnica numérica utilizada garante a correta transferência de informações. Além disso, devido às características do fluxo, modelos de turbulência devem ser incorporados para representar todo o comportamento do sistema adequadamente.

A metodologia aqui proposta consiste em utilizar a CFD e comparar as respostas em termos de empuxo e torque para algumas condições operacionais de três exemplos de hélices. Nas comparações, quando pertinente, adotam-se condições de contorno e técnicas numéricas semelhantes. Há, ainda, comparações com resultados em túnel de vento e com modelos matemáticos para validação dos métodos e verificação da qualidade dos resultados.

De uma forma geral, houve uma boa correlação entre os resultados deste trabalho com a literatura. A partir destas análises, foi possível evidenciar a contribuição da metodologia empregada para as análises aerodinâmicas de hélices em comparação a outras metodologias.

Palavras-chave: Modelagem. Hélices. OpenFOAM.

ABSTRACT

Propellers are widely used for various purposes in our daily lives. They are rotating devices that can generate thrust for a system when coupled to an engine, or, when driven by the wind, capable of transforming its kinetic energy of rotation into another type of energy that is of interest to the user. Due to its importance, aerodynamic analyzes are necessary to assess the thrust and torque that the propellers are capable of absorbing or delivering.

Among the tools available for this purpose, the computational fluid dynamics (CFD - Computational Fluid Dynamics) stands out, which was used because it is the most complete and capable to incorporate more information in the modeling process. In general, the main concerns with the use of CFD are found in the complexity of its geometry, which most of the time is not available by the manufacturer, in the generation of the mesh and in the use of the appropriate numerical methods to solve the problem. The use of CFD to obtain propeller thrust and torque is the main objective of this research. For this, the free and open software OpenFOAM was used.

When it comes to this, the computational domain is subdivided into two subdomains, the rotating domain that comprises the propeller and a stationary external region. The computational tool must be able to capture the movement of the rotating domain of the propeller and transfer the information to the rest of the computational domain, which is stationary. At the interfaces between both, there is no perfect fit between the nodes and the elements from one mesh to the other. However, the numerical technique used ensures the correct transfer of information. In addition, due to the flow characteristics, turbulence models must be incorporated to represent the entire behavior of the system properly.

The methodology proposed here consists of using the CFD and comparing the responses in terms of thrust and torque for some operational conditions of three examples of propellers. In comparisons, when relevant, boundary conditions and similar numerical techniques are adopted. There are also comparisons with results in a wind tunnel and with mathematical models to validate the methods and verify the quality of the results.

In general, there was a good correlation between the results of this work and the literature. From these analyzes, it was possible to evidence the contribution of the methodology used for the aerodynamic analysis of propellers in comparison to other methodologies.

Keywords: Modeling. Propellers. OpenFOAM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Moinho e parque eólico. Retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_eólica .	12
(a) Moinho de vento persa de eixo vertical, com vistas em corte. (Fonte: Eldridge [1975]). (b) Tipo primitivo de moinho de vento de eixo horizontal com velas de lança enroladas em barras de madeira. (Fonte: Eldridge [1975]).	13
A. tipo mais antigo, frente e verso (cerca de 1600). B. tipo holandês antiquado normal (uma placa principal removida). C. tipo de obturador com freio a ar. D. tipo de obturador com raspador de céu. (Fonte: Eldridge [1975]).	15
(a) Turbina eólica Gedser. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]). (b) Turbina de eixo horizontal de Ulrich Hutter. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).	16
(a) Turbina eólica Savonius. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]). (b) Turbina de eixo vertical Darrieus. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).	16
Turbina eólica MOD de 2MW. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).	17
Capacidade global acumulada de energia eólica instalada. (Fonte: GLOBAL [2018]).	19
Mapa de ventos do Brasil. (Fonte: Silva da Purificação [2012]).	20
Escala de turbinas eólicas. (Fonte: Junior [2015], <i>apud</i> IEA [2013]).	27
Configuração das pás de uma TEEH moderna com sistema de controle de passo. (Fonte: adaptado de Schubel and Crossley [2012]).	28
Formas modais das pás de uma TEEH. (Fonte: Kim et al. [2016]).	28
(a) Controle aerodinâmico por <i>pitch</i> . (Fonte: de Matos Melo [2012]). (b) Controle aerodinâmico por <i>stall</i> . (Fonte: de Matos Melo [2012]).	29
(a) Mecanismo <i>yaw</i> cata-vento. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]). (b) Mecanismo <i>yaw</i> elétrico e sensorizado. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).	30
(a) Turbina eólica horizontal <i>upwind</i> . Retirada de https://tudelft.nl/duwind/upwind_downwind . (b) Turbina eólica horizontal <i>downwind</i> . Retirada de https://tudelft.nl/duwind/upwind_downwind	30
(a) Sistemas de controle de passo (<i>pitch</i>) e de rotação do conjunto nacele-rotor em torno do eixo vertical da torre (<i>yaw</i>). (Fonte: adaptado de Hau [2013]). (b) Variação da potência, velocidade do rotor e ângulo de passo das pás com a velocidade do vento. (Fonte: de Araújo et al. [2018]).	31
TSR para diferentes tipos de turbinas eólicas. (Fonte: Silva da Purificação [2012]).	32
Geometria de um aerofólio. (Fonte: Wall [2012]).	33
Linhas de corrente atuantes em um aerofólio. (Fonte: Anderson [2010]).	34

(a) aerofólio DU40, (b) aerofólio DU35, (c) aerofólio DU30, (d) aerofólio DU25, (e) aerofólio DU21, e (f) aerofólio NACA 64. (Fonte: Agarwala and Ro [2015]).	36
Parâmetros geométricos de uma hélice. Retirada de https://mh-aerotools.de/airfoils/prophist	36
Passo de uma hélice. Retirada de https://propellerpages.com/?c=articlesf=2006-03-08-whatispropellerpitch	37
Eficiência de uma hélice pela razão de avanço. Adaptada de https://blackholes.org.uk/PP/e1low	39
Eficiência de uma hélice pela razão de avanço para diferentes passos. (Fonte: adaptado de McCormick [1979]).	40
Exemplo de um sinal aleatório de velocidade em um escoamento turbulento. (Fonte: Versteeg and Malalasekera [2007]).	45
Distribuição de energia das flutuações de um sinal de velocidade em escoamento turbulento. (Fonte: Zikanov [2010]).	47
Espectro de energia da turbulência. (Fonte: Zikanov [2010]).	48
Rotor e estator de uma malha móvel. Retirada de https://slideshare.net/fumiyanozaki/96/cfd-for-rotating-machinery-using-openfoam	55
(a) Interface de malha arbitrária (AMI) entre domínio fixo (estator) e domínio móvel (rotor). (Fonte: Wilhelm [2015]). (b) Subdomínio de malha rotativa com AMI. (Fonte: Wilhelm [2015]).	56
(a) e (b) Duas malhas quadrilaterais. (c) Uma super malha triangular de (a) e (b), colorida para mostrar os elementos de (a). (d) A mesma super malha de (a) e (b), colorida para mostrar os elementos de (b). (Fonte: Farrell and Maddison [2011]).	56
Definição de volume de controle. (Fonte: Rezende [2009]).	59
Nós nos vértices dos VCs (esquerda) e nós nos centros dos VCs (direita) para uma malha quadrilátera. Retirada de https://esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/	60
Esquema <i>upwind</i> . Retirada de https://slideshare.net/edpackness/cfd-aula-3	61
Volume de controle para a definição da equação de transporte. (Fonte: adaptado de Rezende [2009]).	62
Solução <i>upwind</i> versus solução exata. Retirada de https://slideshare.net/edpackness/cfd-aula-3	62
Malha escalonada. (Fonte: adaptado de Versteeg and Malalasekera [2007]).	63
Volumes de controle para escalares e velocidades. (Fonte: Issa et al. [1986]).	64
Geometria da hélice de seis pás.	68
Geometria domínio computacional.	70
Malha para estudo de caso da hélice de seis pás.	71

(a) <i>Inlet</i> da interface do rotor. (b) Parede da interface do rotor.	71
Gráfico empuxo/torque OpenFOAM 1170rpm.	76
Geometria da hélice APC 14x7.	78
(a) Malha completa menos refinada. (b) Malha completa mais refinada. . . .	80
(a) Domínio rotativo menos refinado. (b) Domínio rotativo mais refinado. . . .	81
(a) Hélice menos refinada. (b) Hélice mais refinada.	81
Coefficiente de tração APC 14x7.	83
Coefficiente de potência APC 14x7.	83
Eficiência APC 14x7.	84
Coefficiente de tração APC 14x7 de apenas alguns casos.	84
Coefficiente de potência APC 14x7 de apenas alguns casos.	85
Eficiência APC 14x7 de apenas alguns casos.	85
<i>Layout</i> de uma turbina com rotor <i>upwind</i> e 3 pás. (Fonte: adaptado de Jonkman et al. [2005]).	88
Modelo geométrico rotor NREL 5MW.	89
Domínio computacional NREL 5MW.	90
Malha domínio rotativo NREL 5MW.	91
Malha de uma das pás da NREL 5MW.	91
Parâmetros de saída NREL 5MW. (Fonte: Jonkman et al. [2009]).	92
Parâmetros de saída NREL 5MW. (Fonte: de Araújo et al. [2018]).	92
Força (N) e torque (N.m) NREL 5MW. (Fonte: Zhao et al. [2014]).	93
Força (N) e torque (N.m) NREL 5MW no OpenFOAM.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros geométricos.	69
Tabela 2 – Condições de operação.	69
Tabela 3 – Empuxo(T) e torque(Q) - Resultados do Ansys.	75
Tabela 4 – Empuxo(T) e torque(Q) - Resultados do OpenFOAM.	75
Tabela 5 – Empuxo(T) e torque(Q) - Resultados do modelo k- ϵ	77
Tabela 6 – Empuxo(T) e torque(Q) - Results do modelo k- ω SST.	77
Tabela 7 – Velocidades e razão de avanço para hélice APC 14x7.	78
Tabela 8 – Velocidades e razão de avanço no OpenFOAM.	79
Tabela 9 – Configurações das simulações no OpenFOAM.	81
Tabela 10 – Propriedades brutas escolhidas para a turbina eólica da linha de base NREL de 5 MW.	87
Tabela 11 – Casos de estudo para a turbina eólica NREL de 5 MW.	89
Tabela 12 – Casos de estudo para a NREL de 5 MW no OpenFOAM.	89
Tabela 13 – Configurações para simulação hélice NREL 5 MW no OpenFOAM.	90
Tabela 14 – Respostas para a turbina eólica NREL de 5 MW. (Fonte: Zhao et al. [2014]).	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.1.1	Revisão histórica	12
1.1.2	Motivação	18
1.2	FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE HÉLICES	19
1.2.1	Modelos analíticos - Disco atuador e teoria do elemento de pá	20
1.2.2	Modelos em dinâmica dos fluidos computacional	21
1.3	OBJETIVOS	22
1.4	BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
1.5	ESCOPO	25
2	DESEMPENHO DE HÉLICES	26
2.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	26
2.2	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE HÉLICES	33
2.2.1	Geometria do perfil aerodinâmico	33
2.2.2	Geometria da hélice	35
2.2.3	Parâmetros de desempenho	37
3	MODELAGEM FÍSICA DE ESCOAMENTOS VISCOSOS E INCOMPRESSÍVEIS	41
3.1	NÍVEIS DE MODELAGEM	41
3.2	EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES PARA ESCOAMENTOS INCOMPRESSÍVEIS	43
3.3	TURBULÊNCIA	44
3.3.1	Características dos escoamentos turbulentos	44
3.3.2	Modelos de turbulência	49
3.3.3	Modelos de turbulência de duas equações	50
3.3.3.1	<i>Modelo $k-\epsilon$</i>	51
3.3.3.2	<i>Modelo $k-\omega$</i>	52
3.3.3.3	<i>Modelo $k-\omega SST$</i>	53
3.4	MODELO CINEMÁTICO PARA MOVIMENTO DO SÓLIDO	54
3.4.1	Arbitrary Mesh Interface (AMI)	54
4	TRATAMENTOS NUMÉRICOS	58
4.1	PROGRAMA CFD UTILIZADO	58
4.2	TÉCNICAS NUMÉRICAS	58
5	EXEMPLOS E RESULTADOS	66
5.1	METODOLOGIA	66
5.2	VALIDAÇÃO DO MODELO	67
5.2.1	Hélice de seis pás	68

5.2.2	Hélice APC 14x7	77
5.2.3	Hélice turbina NREL 5MW	85
6	CONCLUSÕES	95
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial será introduzido ao leitor os componentes de maior importância para este trabalho. Nas seções que seguem, serão apresentados as motivações para realização deste estudo, a contextualização histórica do desenvolvimento de hélices, as ferramentas atuais para sua análise, uma revisão bibliográfica de referências abordadas e por fim os objetivos que este trabalho deseja alcançar.

1.1 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1.1 Revisão histórica

Hélices são dispositivos rotativos que podem ter seu funcionamento dedicado a dois objetivos distintos e, até certo ponto, opostos. No primeiro, a hélice é acoplada a um motor que é responsável por acioná-la. Através de sua rotação é gerado empuxo, responsável por mover o sistema onde a mesma se encontra acoplada. Tanto veículos marinhos (barcos, navios, submarinos), quanto aéreos (aviões, helicópteros, drones) utilizam essa configuração. A segunda finalidade é quando a hélice é acionada pelo vento e conectada a um sistema capaz de transformar sua energia cinética de rotação em outro tipo de energia que seja do interesse do usuário. Historicamente, esse modelo de configuração foi utilizado em moinhos e, atualmente, é utilizado em usinas de energia eólica. Esses dois últimos sistemas podem ser vistos lado a lado na Figura 1.

Figura 1 – Moinho e parque eólico. Retirada de https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_eólica.

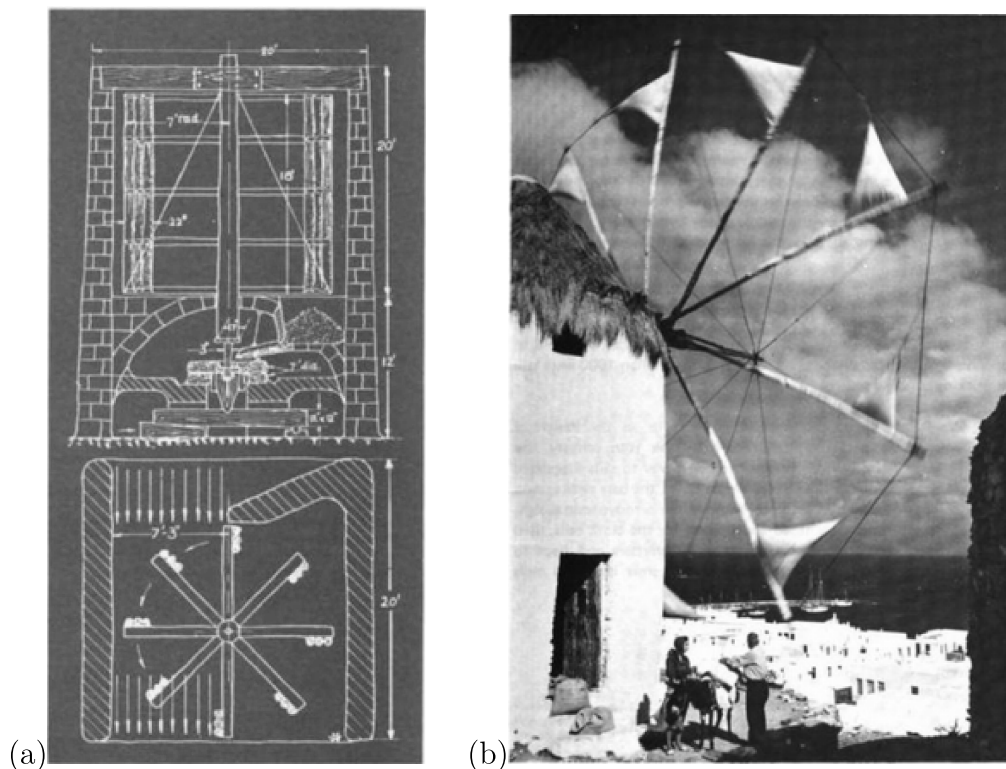


Este trabalho tem por finalidade estudar o desempenho de hélices para aplicações distintas, desde hélice de um equipamento doméstico, passando por uma hélice para aeromodelismo e culminando em uma hélice de turbina eólica. Foco maior será dado ao

estudo de hélices para o ramo do setor eólico. Neste sentido, nesta seção, traça-se um breve histórico deste último dispositivo.

De acordo com Eldridge [1975], as primeiras turbinas eólicas eram provavelmente de eixo vertical simples, como as usadas na Pérsia em cerca de 200 a.C. para moer grãos, vide Figura 2 (a). O uso desses moinhos de eixo vertical posteriormente se espalhou pelo mundo islâmico. Posteriormente, foram desenvolvidos moinhos de vento de eixo horizontal, constituídos por até dez barras de madeira, equipadas com velas de lança. Esses tipos primitivos de moinhos de vento ainda são encontrados hoje em uso em muitas regiões do Mediterrâneo, como visto na Figura 2 (b).

Figura 2 – (a) Moinho de vento persa de eixo vertical, com vistas em corte. (Fonte: Eldridge [1975]). (b) Tipo primitivo de moinho de vento de eixo horizontal com velas de lança enroladas em barras de madeira. (Fonte: Eldridge [1975]).



No século 11 d.C., os moinhos de vento estavam em uso extensivo no Oriente Médio e foram introduzidos na Europa no século 13 pelo retorno das Cruzadas. Durante a Idade Média subsequente na Europa, a maioria dos direitos senhoriais incluía o direito de recusar a permissão para construir moinhos de vento, obrigando os inquilinos a manter seus grãos no moinho do senhor da mansão. O plantio de árvores perto de moinhos de vento foi proibido para garantir "vento livre". No século 14, os holandeses assumiram a liderança na melhoria do design do projeto dos moinhos de vento e os usaram extensivamente a partir de então para drenar os pântanos e lagos do delta do Rio Reno. Entre 1608 e 1612, o Beemster Polder (município da Holanda que sofria com alagamentos), a 10 pés abaixo do

nível do mar, foi drenado por 26 moinhos de vento de até 50 cv cada, operando em duas etapas. Mais tarde, Leeghwater, o renomado engenheiro hidráulico, drenou o Schermer Polder (antiga região alagável dos Países Baixos) em quatro anos. Quatorze moinhos de vento bombearam água para uma bacia de armazenamento a uma taxa de 1000 metros cúbicos por minuto. Trinta e seis moinhos bombearam a água da bacia de armazenamento para um canal circular que esvaziava no Mar do Norte (Hansen [2015]).

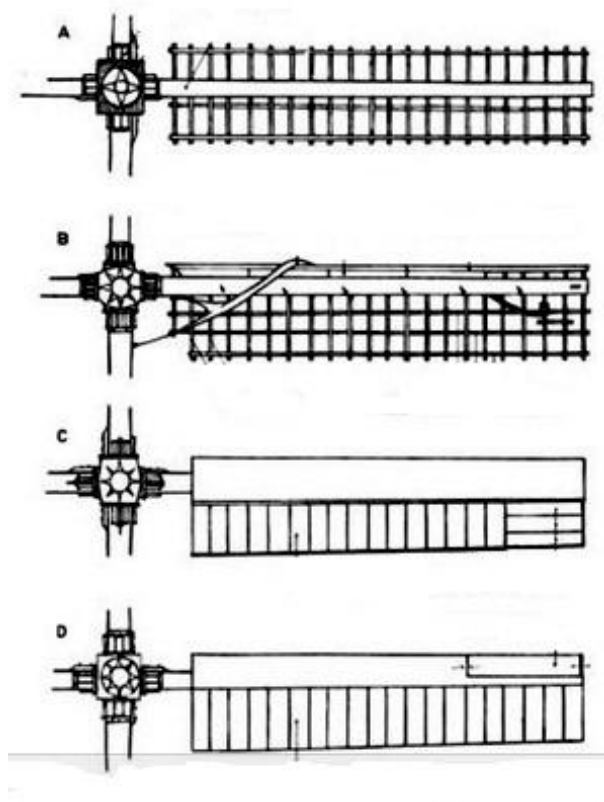
O primeiro moinho de petróleo foi construído na Holanda em 1582. O primeiro moinho de papel foi construído em 1586 para atender às enormes demandas por papel resultantes da invenção da prensa de impressão. No final do século XVI (Fleming and Probert [1984]), as serrarias foram introduzidas para processar madeira importada das regiões do Báltico. Em meados do século 19, cerca de 9000 moinhos de vento estavam sendo usados na Holanda para uma ampla variedade de propósitos. Com a introdução do motor a vapor, durante a Revolução Industrial, o uso da energia eólica na Holanda começou a declinar. Na virada do século XX, apenas cerca de 2500 moinhos de vento ainda estavam em operação na Holanda e, em 1960, menos de 1000 ainda estavam em condições de funcionamento.

Os holandeses introduziram muitas melhorias no projeto de moinhos de vento e, em particular, nos rotores, como visto na Figura 3. No século XVI, as velas primitivas de lança em barras de madeira deram lugar a velas sustentadas por barras de madeira em ambos os lados do estoque. Posteriormente (Krohn [2002]), as barras foram movidas para a borda traseira do rotor para melhorar o design aerodinâmico. Projetos mais modernos substituíram as chapas metálicas pelas velas de pano, usaram estoques de aço e introduziram vários tipos de persianas e abas para controlar a velocidade do rotor em ventos fortes. As usinas industriais maiores podiam fornecer até 90 cv em ventos fortes.

Na Dinamarca, Poul la Cour, que foi um dos primeiros a conectar um moinho de vento a um gerador, deu um curso para eletricitas "agrícolas". La Cour teve uma grande ideia e em sua escola ele instalou um dos primeiros túneis de vento no mundo para investigar a aerodinâmica de rotores. Gradualmente, no entanto, os motores a diesel e as turbinas a vapor assumiram produção de eletricidade e somente durante as duas guerras mundiais, quando o combustível era escasso, a energia eólica floresceu novamente.

Após a Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento de turbinas eólicas mais eficientes ainda era realizado em vários países como a Alemanha, EUA, França, Reino Unido e Dinamarca. Na Dinamarca, este trabalho foi realizado por Johannes Juul, funcionário da empresa de serviços públicos SEAS e antigo estudante de la Cour. Em meados da década de 1950, Juul introduziu o que mais tarde foi chamado de conceito dinamarquês, construindo a famosa turbina Gedser (Figura 4 (a)), que possuía um rotor de três pás, regulado por *stall*, *upwind* e conectado a um gerador funcionando com velocidade quase constante. No mesmo período, o professor alemão Ulrich Hutter implementou

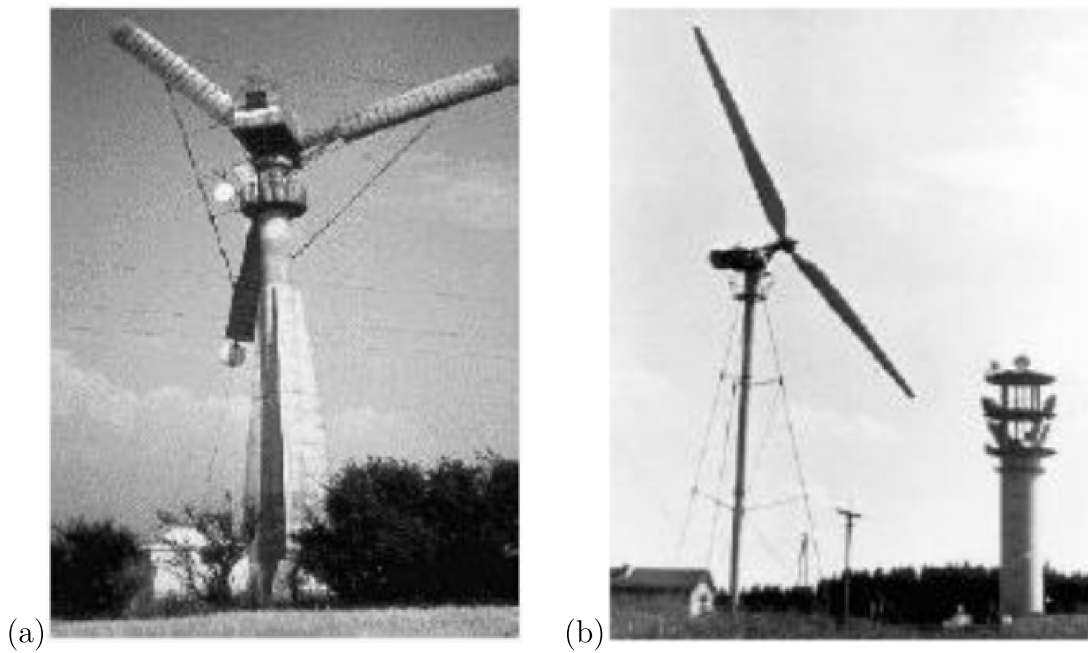
Figura 3 – A. tipo mais antigo, frente e verso (cerca de 1600). B. tipo holandês antiquado normal (uma placa principal removida). C. tipo de obturador com freio a ar. D. tipo de obturador com raspador de céu. (Fonte: Eldridge [1975]).



diversas vantagens para as turbinas de eixo horizontal, como a fabricação das pás das turbinas em materiais compostos com regulagem de *pitch*, que proporcionou uma maior eficiência e menor peso às pás, além do desenvolvimento da torre tubular esbelta, que reduziu o peso das cargas do rotor (Figura 4 (b)).

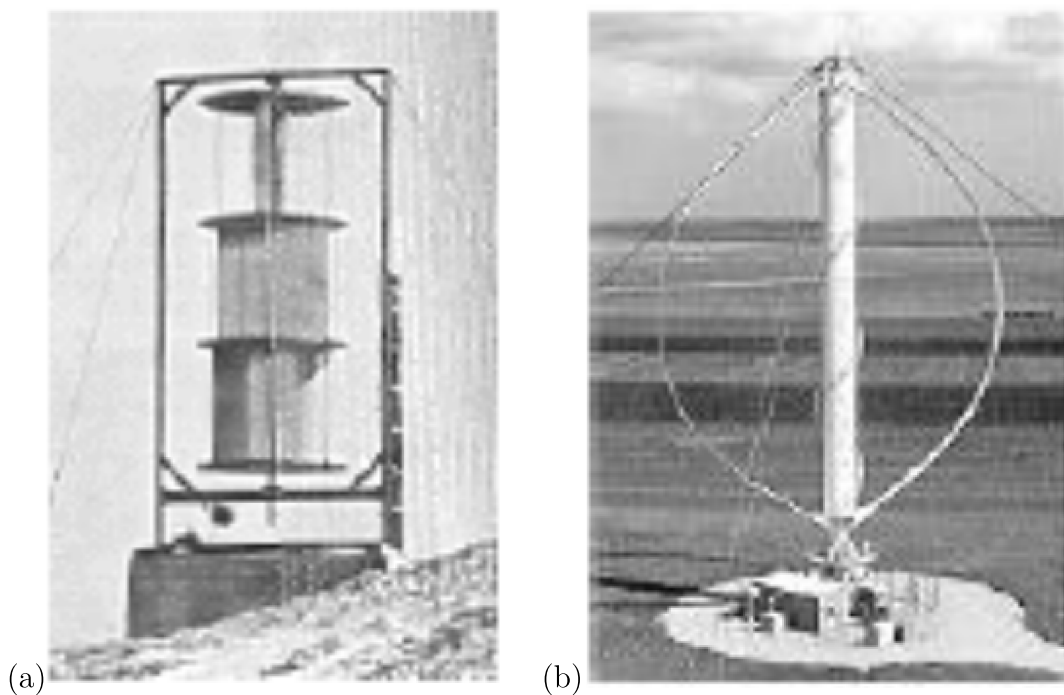
Paralelamente ao desenvolvimento das turbinas eólicas horizontais, foram criadas as turbinas eólicas de eixo vertical, que tem como princípio de funcionamento a utilização da força de arrasto para propiciar o giro do rotor. A turbina eólica Savonius (Figura 5 (a)) foi originada na Finlândia em 1924, e tem como característica a sua operação a baixas velocidades aliada a elevados torques. Sua principal aplicação era a moagem de grãos e o bombeamento de água. Outra turbina eólica de eixo vertical, denominada Darrieus, originou-se na França em meados de 1927 e, diferentemente da turbina eólica de eixo horizontal, o gerador elétrico e a caixa de engrenagens são colocados no solo, reduzindo assim o peso da estrutura. Além disso, não necessita de um sistema de direcionamento da turbina em relação a direção do vento (Figura 5 (b)). A desvantagem desta configuração é o fato de suportar diferentes esforços ao longo do eixo, já que a velocidade do vento aumenta conforme a altura da turbina eólica, o que gera uma dificuldade para manter

Figura 4 – (a) Turbina eólica Gedser. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]). (b) Turbina de eixo horizontal de Ulrich Hutter. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).



a torre ereta para altas velocidades do vento. Além disso, as turbinas eólicas Darrieus devem possuir um sistema auxiliar para a partida da mesma.

Figura 5 – (a) Turbina eólica Savonius. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]). (b) Turbina de eixo vertical Darrieus. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).



Com a crise do petróleo em 1973, de repente as turbinas eólicas se tornaram

interessantes novamente para os países que queriam ser menos dependentes das importações de petróleo. Portanto, muitos programas nacionais de pesquisa foram iniciados para investigar as possibilidades de utilização da energia eólica. Grandes protótipos não comerciais foram construídos para avaliar a economia de eletricidade através de energia eólica e medir as cargas em grandes turbinas. Desde a crise do petróleo, turbinas eólicas comerciais tornaram-se gradualmente uma importante indústria, com taxas de crescimento anual de até 20%. Foi neste período que foram desenvolvidas em larga escala dois tipos de turbinas eólicas, a MOD (Figura 6) e a GROWIAN.

Figura 6 – Turbina eólica MOD de 2MW. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).



As séries de turbinas MOD e GROWIAN possuíam eixo horizontal e duas pás, porém estes projetos apresentaram desvantagens devido aos problemas mecânicos, como envergadura extrema das pás e fratura por fadiga em alguns componentes das turbinas. Assim, como as turbinas eólicas da série MOD e GROWIAN não obtiveram sucesso por problemas técnicos, o caminho encontrado foi o desenvolvimento de novos projetos, com turbinas eólicas de menor porte, até o amadurecimento da tecnologia.

Com o passar dos anos, não somente os componentes mecânicos que constituem as turbinas eólicas se tornaram complexos, como também o sistema elétrico. Alguns fabricantes começaram a fornecer pás com controle de *pitch*, sistema este que, permite que a pá gire ao redor do próprio eixo. Assim, a potência de saída da turbina era limitada para condições adversas de operação. Foram apresentados também os conversores estáticos de potência para variar a velocidade de operação da turbina, como objetivo de maximizar a potência de saída da mesma. Além disso, outra grande adaptação nas turbinas eólicas foi a substituição dos geradores assíncronos pelos geradores síncronos, eliminando a necessidade

da caixa de engrenagens.

1.1.2 Motivação

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável e limpa. No início do segundo milênio, fontes energéticas como vento e a água eram utilizadas para a produção de calor e de força motriz. À medida que os países começaram a se industrializar, a demanda por energia aumentou drasticamente. Assim estas fontes tradicionais de energia foram substituídas pelo carvão, petróleo, gás natural e a energia nuclear. Após a crise do petróleo, na década de 70, muitos países economicamente desenvolvidos, com o intuito de não dependerem apenas das fontes de energia oriundas do petróleo, passaram a incentivar e investir cada vez mais em projetos voltados para a utilização de formas alternativas de geração de energia (Silva da Purificação [2012]). Deste modo, houve o ressurgimento da utilização do vento como fonte de energia, uma vez que a energia eólica é limpa e renovável, ou seja, não há liberação de gases nocivos como CO_2 e óxidos de nitrogênio na atmosfera, além de não correr o risco de escassez de vento. No mais, a energia eólica é relativamente trabalhosa em relação à mão de obra, portanto, cria muitos empregos.

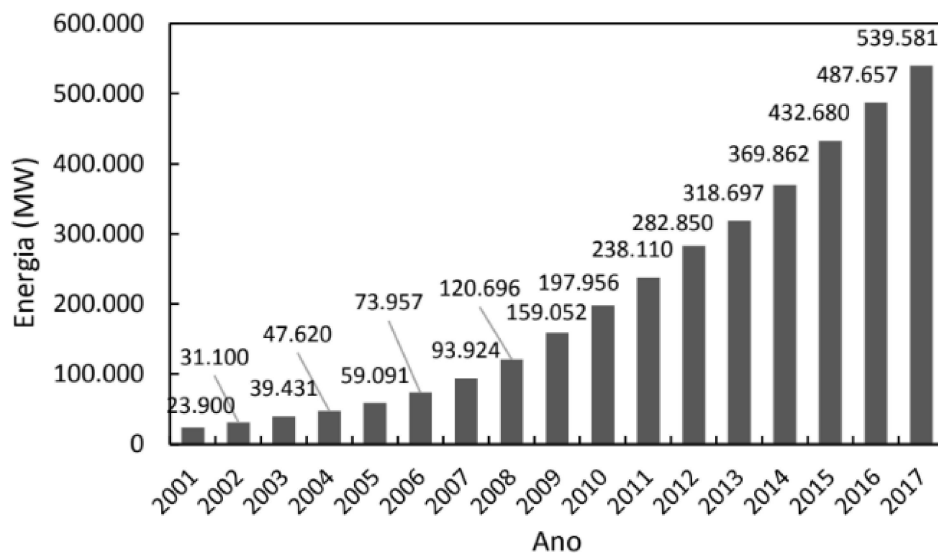
As turbinas eólicas, responsáveis pela conversão da energia eólica em energia elétrica, atualmente possuem tecnologia capaz de gerar uma quantidade de eletricidade próxima a de grandes usinas nucleares. Um fator importante, quando se trata de turbinas eólicas, é saber o seu local de instalação, pois informações a respeito da velocidade e duração do vento são fundamentais para a construção de uma fazenda eólica eficiente. A energia cinética do vento aumenta exponencialmente em proporção a sua velocidade, de modo que um pequeno aumento na velocidade do vento representa um grande aumento do potencial de energia. A regra geral é que, dobrando a velocidade do vento, obtém-se um aumento de oito vezes no potencial de energia (Silva [2011]). Esse fator é "teórico" porque, em condições reais, há um limite para a quantidade de energia que uma turbina pode extrair do vento. Ele é chamado de limite de Betz e é de cerca de 60% (dos Santos Custódio [2009], Wilson [1980]).

O aumento da demanda global por energia ao longo dos anos tem como reflexo elevadas emissões de gases de efeito estufa, oriundos de muitos setores de geração de energia que utilizam matrizes poluentes. Para mitigar o problema, têm sido implementadas metas em escala mundial visando gerar grandes porcentagens da energia necessária por meio de fontes de energia limpa e renovável. O *Global Wind Energy Council* (GWEC) prevê que, até 2035, a energia proveniente de fontes renováveis atenderá a mais de 25% das necessidades mundiais de eletricidade, sendo uma boa parte proveniente da energia eólica (GWEC [2013]).

O impulso ao setor eólico mundial nas últimas décadas resultou em um crescimento exponencial do mercado, tornando-o, atualmente, a segunda maior fonte de energia

renovável do mundo, atrás apenas da energia hidrelétrica. A Figura 7 registra a evolução da capacidade global acumulada instalada de energia eólica no mundo, segundo o relatório *Global Wind Statistics*, do GWEC, que abriga dados de 2001 a 2017. Note-se que, as instalações totais em 2017 foram 51.924 MW, elevando o total global para 539.581 MW.

Figura 7 – Capacidade global acumulada de energia eólica instalada. (Fonte: GLOBAL [2018]).



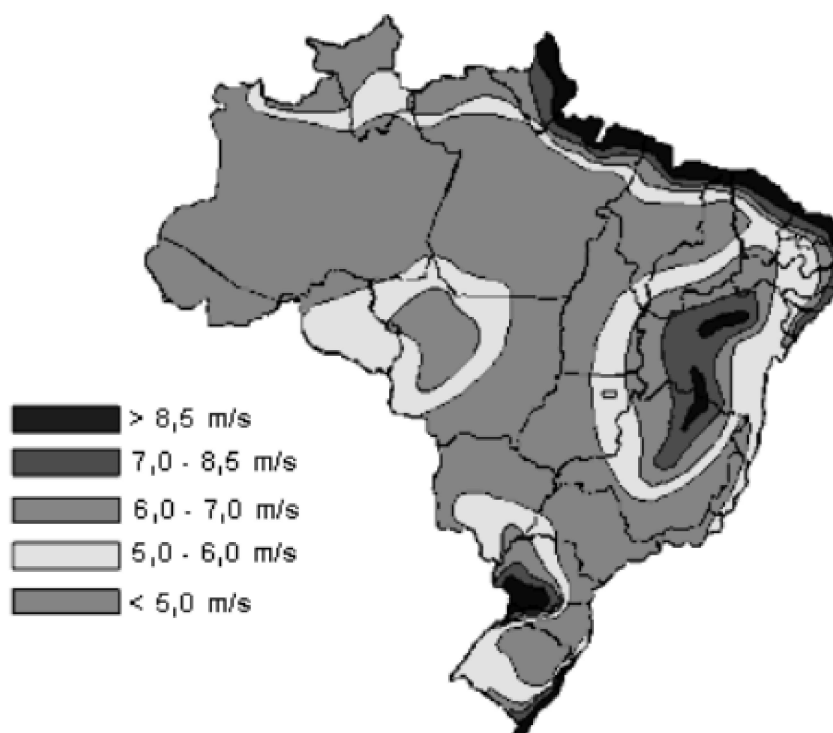
O Brasil possui elevado potencial eólico disposto ao longo do seu território, tendo o Nordeste ocupado posição de destaque frente às demais regiões do país. Dada a importância da caracterização dos recursos eólicos da região Nordeste, o Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, com o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT lançou, em 1998, a primeira versão do Atlas Eólico do Nordeste do Brasil com o objetivo principal de desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos confiáveis para a região. Um mapa de ventos preliminar do Brasil gerado a partir de simulações computacionais com modelos atmosféricos é mostrado na Figura 8.

O aproveitamento desse potencial ainda é muito baixo, pois o interesse por explorar a energia eólica para a produção de eletricidade é bastante recente. O país aparece no cenário mundial de instalação e geração de energia eólica, com registro de mais de 2 GW instalados em 2017. Além disso, o Brasil é líder em capacidade acumulada na América Latina e Caribe, sendo o 6º colocado no ranking mundial de novas instalações em 2017 e o 8º em capacidade instalada acumulada, após ultrapassar o Canadá (GLOBAL [2018]).

1.2 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE HÉLICES

Encontram-se na literatura diferentes métodos para projeto e análise de hélices baseados em diferentes níveis de sofisticação. De uma forma mais generalizada, o principal

Figura 8 – Mapa de ventos do Brasil. (Fonte: Silva da Purificação [2012]).



objetivo desses métodos é avaliar o desempenho desses elementos em termos de empuxo, torque, potência e eficiência. Descrevem-se, de forma bem resumida nesta seção, alguns destes métodos.

1.2.1 Modelos analíticos - Disco atuador e teoria do elemento de pá

Podem ser citados, primeiramente, os modelos analíticos conhecidos como a teoria do disco atuador (ou da quantidade de movimento linear) e a teoria do elemento de pá (BET - *Blade Element Theory*), bem como formulações híbridas dessas duas teorias (BEMT - *Blade Element Momentum Theory*).

A primeira, desenvolvida para hélices marítimas por Rankine (1865) e Froude (1885), segue o princípio básico de funcionamento de uma hélice, que é o de fornecer ao ar que passa através dela certa quantidade de movimento, aproveitando a reação gerada para acelerar um corpo contra o deslocamento de ar.

Traçando-se um breve histórico, uma grande contribuição para o desenvolvimento de teorias racionais para o estudo de hélices veio do trabalho de Prandtl. Este desenvolveu, visando incorporar os efeitos da circulação às asas dos aviões, a teoria da linha de sustentação que, posteriormente, foi assimilada a teoria de hélices (Wald [2006]). Betz em 1919 mostrou que a distribuição de carregamento para hélices levemente carregadas e considerando a condição de perda mínima de energia, ou seja, com vorticidade constante ao

longo da esteira da pá, fazem com que os vórtices desprendidos formem uma esteira regular helicoidal que se move sem se deformar na esteira da hélice (Adkins and Liebeck [1994], Adkins and Liebeck [1983]). Glauert [1935] apresentou uma metodologia que incorpora dois modelos básicos, a do disco atuador com a teoria do elemento de pá. Theodorsen [1948] provou que é possível obter a distribuição do coeficiente de sustentação nas pás para diferentes níveis de carregamento analisando-se a folha de vórtices helicoidais na esteira afastada da hélice quando se considera a contração da esteira. Vale ressaltar que o trabalho de Theodorsen é um marco na teoria de hélices.

Estas teorias não são objeto de estudo desta pesquisa. Foram aqui apresentadas com o intuito de complementar as informações sobre as teorias de hélices. Destaca-se que estas formulações não demandam muito dos recursos computacionais, mas são bastante limitadas quando se deseja análises mais complexas.

1.2.2 Modelos em dinâmica dos fluidos computacional

No topo da hierarquia destinada a análises de fluidos, com o auxílio de recursos computacionais, encontram-se os modelos que consideram escoamentos viscosos, tridimensionais, incompressíveis e/ou compressíveis. Esses escoamentos são descritos pelas equações diferenciais parciais de Navier Stokes. As simulações dessa natureza são denominadas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamic*).

Na CFD as equações de Navier Stokes são resolvidas por meio de métodos discretos dos quais os mais tradicionais são o método dos elementos finitos (MEF), o método das diferenças finitas (MDF) ou pelo método dos volumes finitos (MVF). Em linhas gerais, esses métodos transformam as equações diferenciais parciais e suas condições iniciais e de contorno em um sistema algébrico de equações.

As principais preocupações dos métodos supracitados consistem em utilizar algoritmos específicos que tratem os problemas inerentes da discretização das equações de Navier Stokes. Dentre esses problemas, destacam-se a não linearidade do termo advectivo, o problema do acoplamento dos termos de pressão e velocidade, os problemas de interação entre o fluido e a estrutura em movimento e, em função do parâmetro de Reynolds, a inserção de modelos de turbulência que contemplem as diversas escalas temporais e espaciais.

Além destas questões, para o objeto de estudo desta pesquisa, destaca-se ainda a questão da compatibilização de interfaces. Para a execução de simulações que envolvem elementos rotativos, como é o caso da hélice, é necessário definir-se pelo menos dois domínios diferentes; um deles é estacionário, o outro rotativo. Para que a simulação seja possível, é necessário compatibilizar as interfaces comuns aos diferentes domínios. Devido a rotação, torna-se necessário contabilizar o movimento relativo de múltiplos rotores e estatores, seja por mudanças topológicas diretas na malha ou por simplificações

geométricas (Beaudoin and Jasak [2008]).

A CFD, devido a sua complexidade, requer recursos computacionais apropriados devido ao elevado custo de processamento. Somado a isto, para a prática da engenharia, o custo da simulação precisa ser suficientemente baixo para permitir estudos detalhados de condições fora do projeto, otimização da forma geométrica, estudos de projeto robusto, etc. (Beaudoin and Jasak [2008]).

Todavia, quando comparados às demais aproximações, possui como vantagens a sua versatilidade e flexibilidade, pois permite a solução de alguns problemas que matematicamente não possuem solução analítica exata bem como possibilitam que este estudo seja aplicado a geometrias e casos muitas vezes complexos. Este é o principal atrativo para o uso destas ferramentas e é neste contexto que insere-se a presente pesquisa.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é o de investir em uma metodologia para a modelagem computacional de hélices, visando obter respostas sobre o seu desempenho mediante comparação com as respectivas literaturas.

Como objetivos específicos, podem ser citados:

- modelagem física, matemática e numérica do problema;
- considerações sobre modelos de turbulência e refinamentos de malha para posterior análise da influência dos mesmos no desempenho final;
- estudo do problema sobre condições de regime transiente, tridimensional e com modelo cinemático para movimento de sólido.

1.4 BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crescente busca por alternativas de geração de energia de fontes renováveis e sustentáveis, devido às alterações climáticas e aquecimento global, tem impulsionado o crescimento do setor eólico mundial nos últimos anos. No entanto, o custo de instalação de turbinas eólicas é grande e diferentes estratégias estão sendo consideradas para redução de custos por MW. Como solução, a indústria vem investindo em turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) com dimensões cada vez maiores, principalmente na área do disco do rotor e assim, conseqüentemente, no aumento de energia captada por turbina.

As turbinas eólicas operam dentro da camada limite atmosférica, onde estão expostas a efeitos de turbulência do vento e variação ao longo da altura de sua velocidade média. Quanto maior o diâmetro do rotor, maior é a sensibilidade da turbina aos citados efeitos do vento da camada limite atmosférica. A turbulência pode induzir grandes

amplitudes de vibrações na estrutura e a variação da velocidade média com a altura leva a pressões diferentes em um mesmo ponto do rotor conforme sua posição angular. Segundo Luhur et al. [2016] a interação de tal vento complexo e dinâmico com as pás de rotor de turbina leva a forças altamente dinâmicas.

De modo geral, o campo de informações sobre turbinas eólicas é bastante restrito. Em especial, características inerentes à geometria das pás são mantidas em segredo pelos fabricantes, uma vez que estão diretamente relacionadas com a eficiência do rotor, tratando-se de um grande segredo de mercado. Assim, o desenvolvimento de pesquisas e projetos concernentes à tecnologia eólica são bastante dificultados, uma vez que a determinação das características do rotor, torre e fundações estão intrinsecamente relacionadas com as pás e as forças que nela atuam.

Neste contexto, o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL - *National Renewable Energy Laboratory*) do Departamento de Energia dos EUA (DOE's), por meio do Centro Nacional de Tecnologia Eólica (NWTC - *National Wind Technology Center*), documentou e disponibilizou publicamente, especificações completas de uma turbina eólica de grande porte que é representativa de turbinas de multimegawatts terrestres e marítimas. Para fins de detalhamento, foram escolhidos o tamanho básico e a potência nominal da turbina. Assim, reunindo as precárias informações disponibilizadas por fabricantes de turbinas com características similares, além de propriedades de modelos conceituais públicos, foi criada a Turbina Eólica de Base NREL 5 MW (Jonkman et al. [2009]). Desde então, este modelo vem sendo amplamente utilizado em pesquisas no setor eólico ao redor do mundo, como em Zuo et al. [2018], Fitzgerald and Basu [2014], Eliassen et al. [2015] e Matha [2010].

Os trabalhos supracitados utilizam a Teoria do Elemento de Pá no cálculo de forças aerodinâmicas no rotor, obtidas em função das características de arrasto e sustentação de cada aerofólio bidimensional. O acoplamento desta teoria às equações da Teoria do "Momentum" para a consideração das velocidades induzidas na pá devido à formação de esteira turbulenta pelo giro do rotor é encontrado na literatura, sendo abordado por Araújo [2017]. O estudo é aplicado à Turbina Eólica NREL 5MW, comparando respostas da estrutura em termos de empuxo, torque e potência obtidas com o cálculo analítico das forças aerodinâmicas no rotor e em software disponibilizado pelo NREL (Driscoll et al. [2016]).

Jasak and Beaudoin [2011] mostram a importância na implementação de técnicas para tratamento das interfaces, então denominadas GGI (*Generalized Grid Interface*), que permite o acoplamento dos domínios rotativo e estacionário. O algoritmo apresentado foi desenvolvido para a plataforma OpenFOAM. A principal vantagem da técnica apresentada está na não necessidade de ajustar a topologia da malha na interface entre duas malhas. Em vez disso, um conjunto de fatores de ponderação é avaliado para

equilibrar adequadamente o fluxo na interface do GGI.

No estudo de Zhao et al. [2014], a turbina eólica *offshore* de 5 MW NREL da Fase II do projeto internacional *Code Comparison Collaboration Continuation* (OC4) foi selecionada como objeto de estudo por possuir seus dados detalhados com certa confiabilidade, o método *Multiple Reference Frame* (MRF) baseado em código-fonte aberto OpenFOAM é usado, o desempenho aerodinâmico da turbina eólica de linha de base de 5 MW sob diferentes velocidades do vento é simulado, sem considerar o impacto da estrutura flutuante, e o empuxo do rotor, torque, coeficiente de pressão e dados de vórtices aerodinâmicos e informações de campo de fluxo foram obtidos em detalhes.

Wang et al. [2012] apresentaram simulações numéricas da interação pá-torre da turbina eólica usando as ferramentas OpenFOAM de código aberto acopladas ao método *Arbitrary Mesh Interface* (AMI). As equações que governam foram as *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), que foram resolvidas pelo solucionador *pimpleDyMFoam*, e o método AMI foi empregado para lidar com os movimentos da malha. A turbina eólica da fase VI do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) na configuração *upwind* foi selecionada para testes numéricos com diferentes velocidades de vento de entrada, *pitch* fixo e velocidade rotacional constante. Foram apresentados resultados numéricos detalhados da estrutura do vórtice, históricos de tempo de empuxo e distribuição de pressão na pá e torre. As descobertas mostram que a torre da turbina eólica tem pouco efeito sobre todo o desempenho aerodinâmico de uma turbina eólica *upwind*, enquanto o rotor rotativo induz uma óbvia queda cíclica na pressão frontal da torre. Também foi observada forte interação dos vórtices da ponta da pá com a separação da torre.

O trabalho de Rocha et al. [2014] trata de uma investigação computacional enfatizada na calibração de um modelo de turbulência em relação à capacidade operacional de um SS-HAWT (turbina eólica de eixo horizontal de pequena escala). Testes de campo experimental foram realizados para coletar dados para avaliar o coeficiente de desempenho (potência), C_p , em função da razão de velocidade da ponta da hélice. O protótipo examinado foi uma turbina eólica de três pás (perfil NACA (Comitê Consultivo Nacional de Aeronáutica) 0012) projetada para uma relação de velocidade de ponta fixa, construída e operada na Universidade Federal do Ceará. O valor máximo alcançado experimentalmente para C_p foi de cerca de 14%. O modelo de turbulência $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*), resolvido pela caixa de ferramentas CFD (dinâmica computacional de fluidos) de código aberto OpenFOAM, avaliou o desempenho das turbinas eólicas. As informações dos dados experimentais obtidas relatando o desempenho aerodinâmico do protótipo SS-HAWT foram necessárias para calibrar o modelo. A intensidade da turbulência e o comprimento característico foram estudados em termos de um parâmetro constante do modelo de turbulência adotado e sua variação afeta principalmente o atrito viscoso sobre as lâminas. O coeficiente de potência previsto numericamente tende a concordar com a avaliação experimental.

1.5 ESCOPO

O presente capítulo apresenta o tema estudado, a motivação do seu estudo, sua importância e os objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo serão apresentados conceitos fundamentais de hélices, como suas características geométricas e seus parâmetros de desempenho.

No terceiro capítulo serão apresentados conceitos sobre a modelagem física de escoamentos viscosos e incompressíveis como as equações de Navier Stokes, modelos de turbulência e modelos cinemáticos para movimentação de sólido.

No quarto capítulo são apresentados os programas utilizados neste trabalho, bem como as técnicas numéricas por eles utilizadas e também como são tratadas as interfaces dos problemas estudados.

No quinto capítulo são apresentados os experimentos elaborados e seus resultados, os quais são comentados.

No sexto e último capítulo, apresentam-se as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 DESEMPENHO DE HÉLICES

Neste capítulo será descrito os princípios de funcionamento de hélices, bem como suas principais características geométricas, além de como esta é avaliada em termos de seu desempenho.

2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

A turbina eólica do tipo hélice pode ser considerada um parafuso de ar que extrai energia do ar propulsor e a converte em uma forma mecânica, em contraste com uma hélice que expelle energia no ar a partir de outra fonte de energia. A semelhança entre a hélice e a turbina eólica permite que o mesmo desenvolvimento teórico seja seguido para a análise de desempenho.

As hélices consistem de duas ou mais pás conectadas ao cubo central no qual essas pás são fixadas. Com a rotação, as pás “cortam” o ar e criam um efeito aerodinâmico, como o da sustentação de uma asa, ou seja, o deslocamento circular da pá no ar provoca uma baixa pressão no dorso da pá, e uma alta pressão na face, provocando a tração ou empuxo.

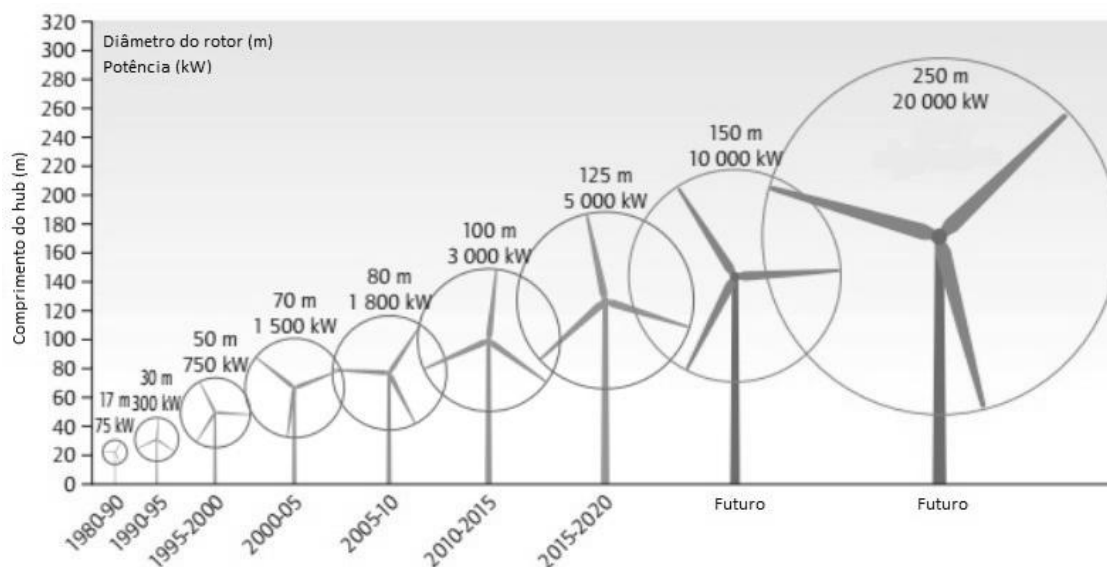
Durante o funcionamento, a hélice gira e avança ao mesmo tempo como uma rosca de parafuso. A cada volta ela avança uma determinada distância que é chamada de passo da hélice. Por isso, elas são classificadas como hélices de passo fixo ou de passo variável. As de passo fixo são, geralmente, inteiriças e com suas pás fixas ao cubo, formando uma unidade integral. Já as de passo variável têm suas pás instaladas no cubo e podem ser movimentadas de modo a alterar o seu ângulo.

O objetivo de variar o ângulo da pá com uma hélice de passo variável é manter um ângulo ótimo nas pás da hélice, enquanto a velocidade varia, maximizando sua eficiência. Um ângulo de ataque das pás pequeno tem um bom desempenho em relação ao arrasto, mas gera pouco impulso, enquanto que ângulos grandes têm o efeito contrário. O melhor ângulo de ataque das pás é quando essas atuam como pequenas asas, gerando mais sustentação do que arrasto.

Atualmente, a configuração de aerogerador mais adotada e eficiente é a turbina eólica de eixo horizontal (TEEH), assim denominada por seu eixo de rotação ser paralelo ao solo (ou ao nível médio do mar, em casos de estruturas *offshore*). As turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) são raras no mercado energético devido a sua menor eficiência frente às TEEH, uma vez que por possuírem menor altura, operam em regiões da camada limite atmosférica onde a velocidade do vento é menor (Lopes [2012]). A partir dos princípios básicos, a potência nominal e o tamanho de uma turbina crescem com a área varrida pelo rotor. O tamanho mais comum de grandes turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) se insere dentro da escala de produção de energia de 2 até 5 MW, operando numa faixa de

aproximadamente 300 a 500 W/m^2 de área varrida. Devido a isso, as pás têm atingido comprimentos cada vez maiores, conforme observado na Figura 9.

Figura 9 – Escala de turbinas eólicas. (Fonte: Junior [2015], *apud* IEA [2013]).



Segundo Manwell et al. [2010], dentre as principais opções de projeto e construção de turbinas eólicas, estão presentes a escolha do número de pás (em geral duas ou três), determinação das características das pás (materiais, métodos construtivos e perfis aerodinâmicos), projeto do *hub* (rígido ou oscilante), orientação do rotor (*downwind* ou *upwind*), velocidade do rotor fixa ou variável, condição de alinhamento com o vento (*yaw* livre ou *yaw* ativa) e sistema de controle do rotor (*pitch* ou *stall*). Note-se, portanto, que a excelência do desempenho e do custo de um projeto de turbina eólica está diretamente relacionada ao projeto do rotor, constituído pelo *hub* (cubo) e conjunto de pás, frequentemente considerados os componentes mais importantes de um aerogerador.

A Figura 10 apresenta a configuração das pás de uma TEEH moderna com sistema de controle de passo (*pitch*), responsável pela rotação axial das pás. Para fins de determinação das propriedades estruturais das seções dos aerofólios das pás, usualmente a direção da corda é chamada *edge* e a transversal a esta, *flap*. Para a turbina NREL 5 MW, por exemplo, as rigidezes à flexão das seções são fornecidas de acordo com esta definição, sendo *flap* a rigidez à flexão em torno da corda e *edge* a rigidez à flexão na direção perpendicular à corda. A Figura 11 mostra o 1º e 2º modos de *flap* e o 1º modo de *edge* de uma pá de TEEH. Ressalta-se, entretanto, que esta nomenclatura não deve ser confundida com a atribuída à direção de flexão fora (*flap*) e dentro (*edge*) do cone de rotação do rotor. Somente quando o ângulo de passo das pás é igual a zero, as direções de flexão *flap* e *edge* das pás coincidem com as do cone de rotação.

Os rotores de turbinas eólicas em geral são dotados de sistemas de controle destinados a manter constante a potência gerada quando a velocidade do vento exceder a

Figura 10 – Configuração das pás de uma TEEH moderna com sistema de controle de passo. (Fonte: adaptado de Schubel and Crossley [2012]).

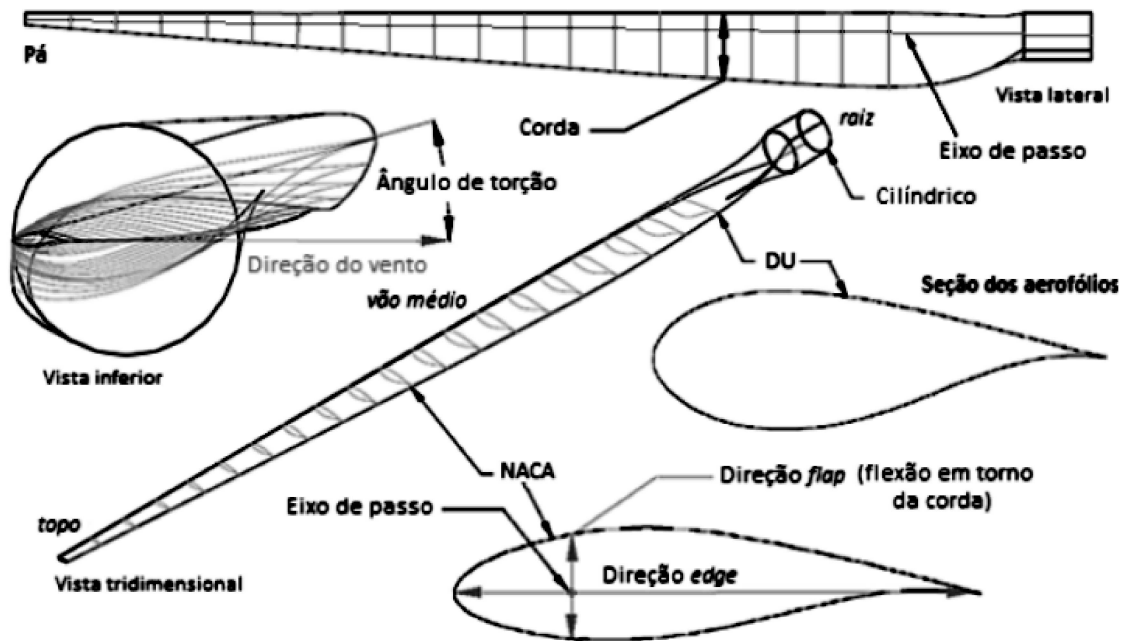
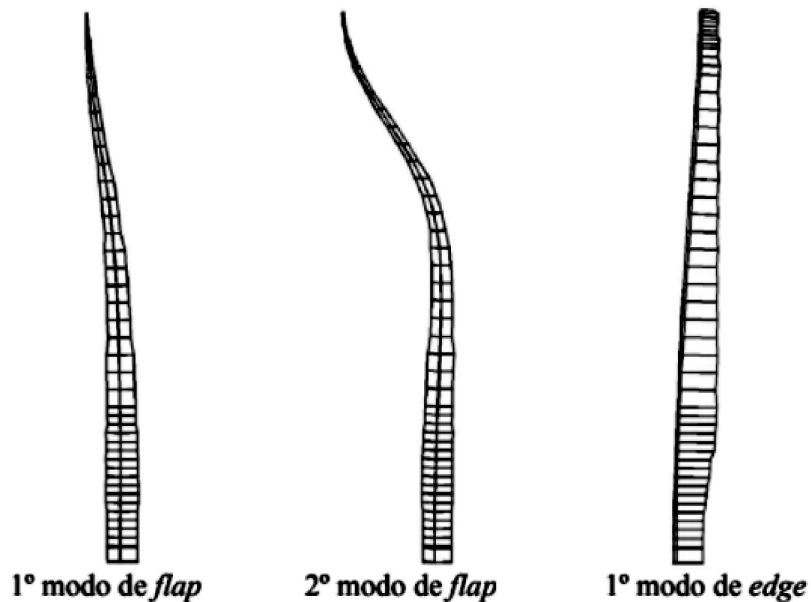


Figura 11 – Formas modais das pás de uma TEEH. (Fonte: Kim et al. [2016]).

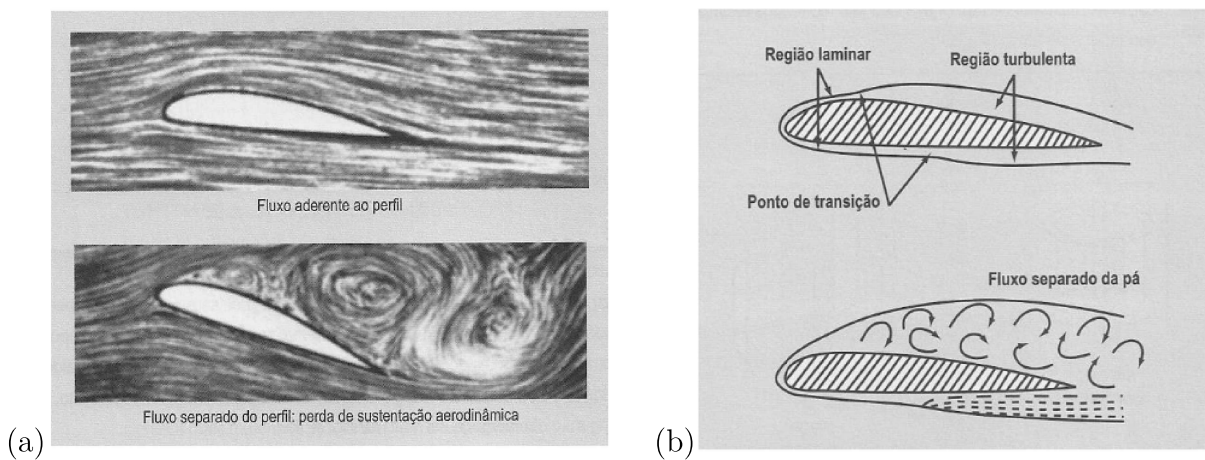


velocidade nominal, de forma a limitar o carregamento e as tensões nos componentes estruturais. Existem dois desses sistemas, o controle de estol (*stall*) e o controle de passo (*pitch*), um passivo (reage à velocidade do vento) e outro ativo (recebe sinal de sensores), respectivamente.

O controle por *pitch* acontece por controle de variação de passo das pás, ou seja, da rotação da pá em torno do seu eixo longitudinal. Quando a velocidade do vento ultrapassa

a nominal, o ângulo de passo é alterado, aumentando o ângulo de ataque e controlando as forças aerodinâmicas de modo a se manter a velocidade nominal e assim limitando a extração de potência, conforme Figura 12 (a). No controle por *stall*, as pás se mantêm fixas e não rodam em torno do seu eixo longitudinal. É determinado um desenho aerodinâmico das pás, de tal forma que, a partir de uma certa velocidade, o fluxo em torno do perfil da pá descola, causando turbulência (Ribeiro [2014]). Essa perda aerodinâmica se torna progressiva devido à diminuição da força de sustentação (*lift*) e aumento da força de arrasto (*drag*), conforme a Figura 12 (b).

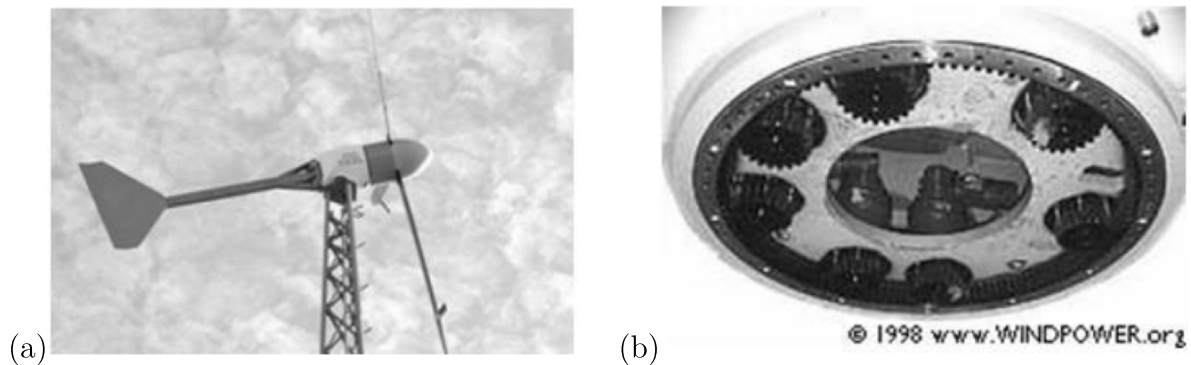
Figura 12 – (a) Controle aerodinâmico por *pitch*. (Fonte: de Matos Melo [2012]). (b) Controle aerodinâmico por *stall*. (Fonte: de Matos Melo [2012]).



As turbinas eólicas de eixo horizontal podem ser classificadas baseadas na posição do seu rotor em relação à torre: em *upwind* e *downwind*. As turbinas *upwind*, são projetadas para operar com a sua face contra a direção do vento, assim o vento incide na área de varredura do rotor pela frente da turbina (Figura 14 (a)). A principal vantagem dos projetos para este tipo de turbina é que a torre não se constitui em obstáculo direto ao vento, motivo pelo qual levou as turbinas *upwind* serem as mais utilizadas atualmente. No entanto, existe o inconveniente de um pequeno desvio na direção do vento causado pela torre, já que o vento começa a desviar da torre antes mesmo de encontrá-la (pressão do ar contrária à sua direção), desta forma cada vez que ocorrer a passagem periódica das pás pela torre ocorrerá pulsões de torque na turbina e, conseqüentemente, redução de potência. Para reduzir esses inconvenientes é necessário o afastamento entre as pás e a torre, além de um mecanismo de orientação direcional (*yaw*) para manter a posição contra o vento.

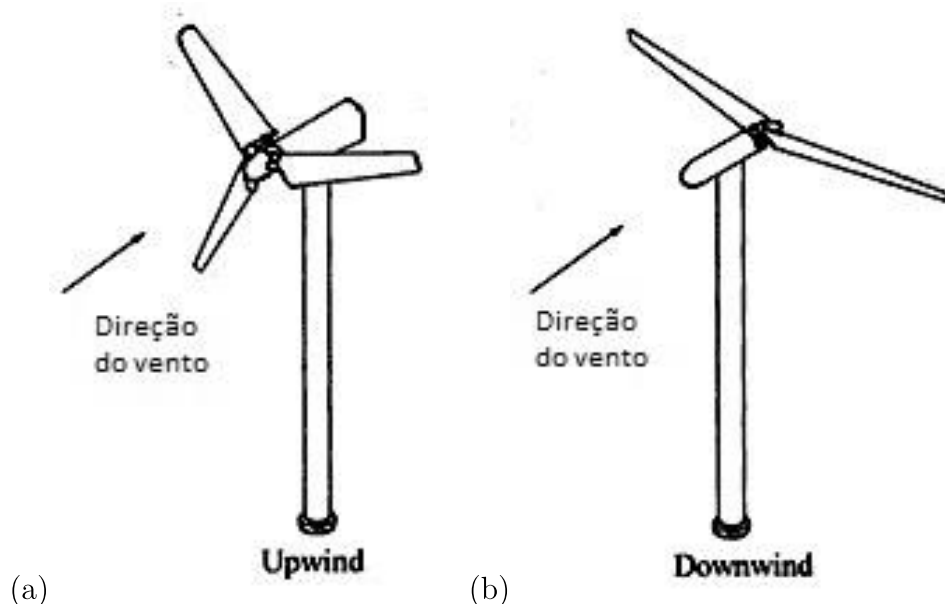
Existem dois métodos de mecanismo direcional *yaw*: o primeiro consiste de um cata-vento acoplado à nacele da turbina que tem a função de realizar o alinhamento do rotor (Figura 13 (a)), enquanto a segunda alternativa, e a mais utilizada, consiste de um sistema de alinhamento forçado, através de motores elétricos e sensores para orientar a turbina contra o vento (Figura 13 (b)) (dos Santos Custódio [2009]).

Figura 13 – (a) Mecanismo *yaw* cata-vento. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]). (b) Mecanismo *yaw* elétrico e sensorizado. (Fonte: dos Santos Custódio [2009]).



Nas turbinas *downwind* (Figura 14 (b)), o vento incide na área de varredura do rotor por trás da turbina eólica. Assim, o vento passa pela torre antes de encontrar as pás do rotor. A principal vantagem das turbinas *downwind* é a sua construção com componentes mais leves, tornando o conjunto mais flexível e barato. No entanto, para esta configuração ocorre a turbulência causada no vento pela torre, levando a maiores cargas de fadiga, comparada às turbinas *upwind* (dos Santos Custódio [2009]).

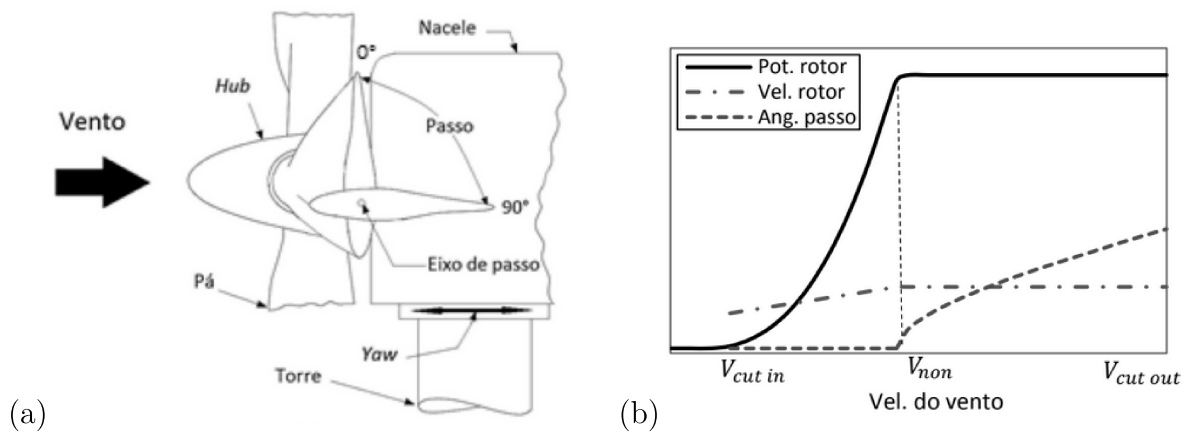
Figura 14 – (a) Turbina eólica horizontal *upwind*. Retirada de https://tudelft.nl/duwind/upwind_downwind. (b) Turbina eólica horizontal *downwind*. Retirada de https://tudelft.nl/duwind/upwind_downwind.



Turbinas eólicas modernas, especialmente aquelas de multimegawatts, em geral possuem rotor com 3 pás, configuração *upwind* e operam com velocidade variável viabilizada por meio do sistema de controle de passo. A Figura 15 (a) mostra uma vista lateral do rotor e indica o ângulo de passo da pá. No intervalo de velocidade do vento compreendido

entre a partida ($V_{cut\ in}$) e a nominal de operação da turbina (V_{nom}), a velocidade de rotação do rotor varia conforme a velocidade do vento. A partir de V_{nom} , o sistema de controle de passo é ativado, rotacionando o conjunto de pás (cada qual em torno de seu eixo, Figura 10) tanto quanto maior for a velocidade do vento, de maneira que a velocidade de rotação do rotor se mantenha constante e seja possível extrair a potência nominal - P_n , conforme mostrado no gráfico da Figura 15 (b). Para fins de segurança, atingida a velocidade máxima de operação ($V_{cut\ out}$), a turbina é desligada.

Figura 15 – (a) Sistemas de controle de passo (*pitch*) e de rotação do conjunto nacele-rotor em torno do eixo vertical da torre (*yaw*). (Fonte: adaptado de Hau [2013]). (b) Variação da potência, velocidade do rotor e ângulo de passo das pás com a velocidade do vento. (Fonte: de Araújo et al. [2018]).

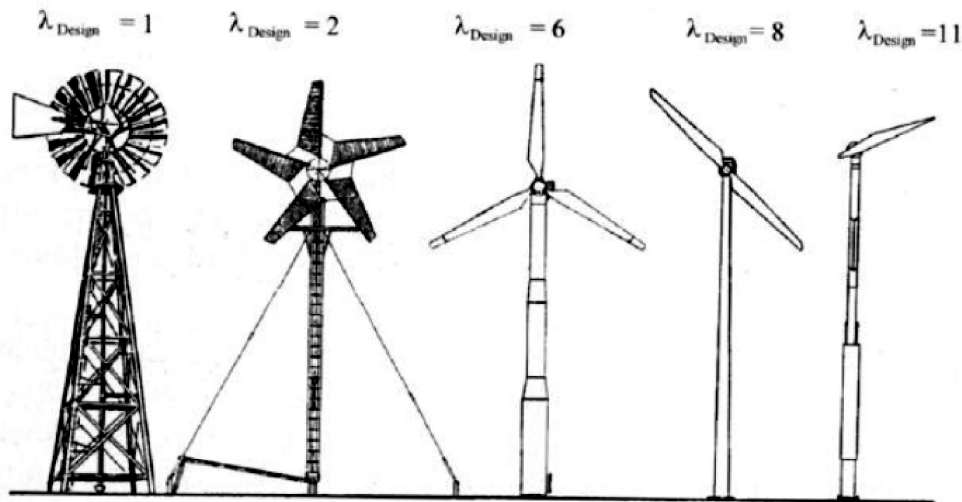


Quanto ao número de pás, as turbinas horizontais podem ser constituídas de uma, duas, três, quatro ou múltiplas pás. O número de pás está indiretamente relacionado com o TSR, *tip speed ratio* (λ) (dos Santos Custódio [2009]). Portanto, para turbinas com baixo TSR, como os rotores com múltiplas pás, é necessária uma área de varredura bastante sólida, ou seja, as pás são largas e em grande número, enquanto as turbinas que operam em alta velocidade, alto valor TSR, elas podem ser construídas principalmente com três ou até mesmo uma ou duas pás (Figura 16).

A principal característica dos rotores com múltiplas pás é o alto torque de partida, sendo seu uso recomendado para operações que exigem um alto torque já no seu início, como bombeamento d'água. Portanto, não é aconselhável sua utilização em operações que implicam em altas velocidades de rotação. Além disso, o design, a construção e o sistema de controle para estes tipos de turbinas são simples, pelo fato de serem poucos sensíveis aos fatores de aerodinâmica e, com isso, não exige grande tecnologia na sua construção. A máxima eficiência que pode ser atingida para esse tipo de rotor é de 30% (Silva da Purificação [2012]).

Já para as turbinas que operam em alta velocidade, devido ao alto valor TSR, elas podem ser construídas com três ou até mesmo uma ou duas pás. Como a área total

Figura 16 – TSR para diferentes tipos de turbinas eólicas. (Fonte: Silva da Purificação [2012]).



é reduzida, as cargas nas torres, ao contrário dos rotores com múltiplas pás, são bem menores, pelo fato do rotor não sofrer uma carga de arrasto muito grande. Além disso, níveis maiores de potência são mais facilmente alcançados, pois há uma relativa facilidade de se construir rotores com diâmetros maiores. Os principais inconvenientes para este tipo de configuração são: baixo torque de partida, prováveis problemas de vibração, utilização de tecnologias mais avançadas para o design das pás e conseqüentemente seu elevado custo.

O hub (ou cubo) é o elemento estrutural responsável por conectar o conjunto de pás ao eixo do rotor, transmitindo a energia mecânica oriunda das pás e acionando o gerador, Figura 15 (a). Denomina-se nacele o compartimento onde são abrigados os eixos de baixa e alta velocidade, acoplados a uma caixa de engrenagens para aumento da rotação, gerador, sistemas de controle e de freio. A nacele de turbinas eólicas de grande porte é dotada de sistema de acesso ao compartimento, de maneira a permitir que técnicos realizem a manutenção dos equipamentos.

A torre tem a função de manter o conjunto rotor-nacele em uma altura de projeto adequada, assegurando que a velocidade do vento confira maior eficiência ao processo de captação da energia eólica e melhor desempenho do gerador. A configuração das torres varia em função do tamanho do aerogerador; como exemplos tem-se torres: treliçadas, estaiadas e monocolumnas (tubulares). Atualmente as torres que suportam turbinas eólicas *onshore* de multimegawatts são principalmente do tipo monocolumna, construídas em aço, concreto armado e/ou protendido ou mistas concreto-aço, sendo a escolha do material regida pelas condições locais, tais como fabricação, transporte e montagem, em conjunto com questões econômicas.

As pás são elementos de extrema importância para o desempenho da turbina, sendo a principal responsável pela aerodinâmica do sistema acoplado turbina-torre-fundação,

por meio da interação direta com o vento turbulento. Cada pá é constituída por uma sucessão de diversos aerofólios ao longo de seu eixo longitudinal, cujo posicionamento se dá de maneira que a estrutura final possua a resistência mecânica necessária a suportar as ações que lhes são impostas e conferir melhor desempenho aerodinâmico. São parâmetros importantes para este desempenho, as propriedades aerodinâmicas dos perfis das pás que determinam os coeficientes de sustentação (*lift* – C_l) e arrasto (*drag* – C_d).

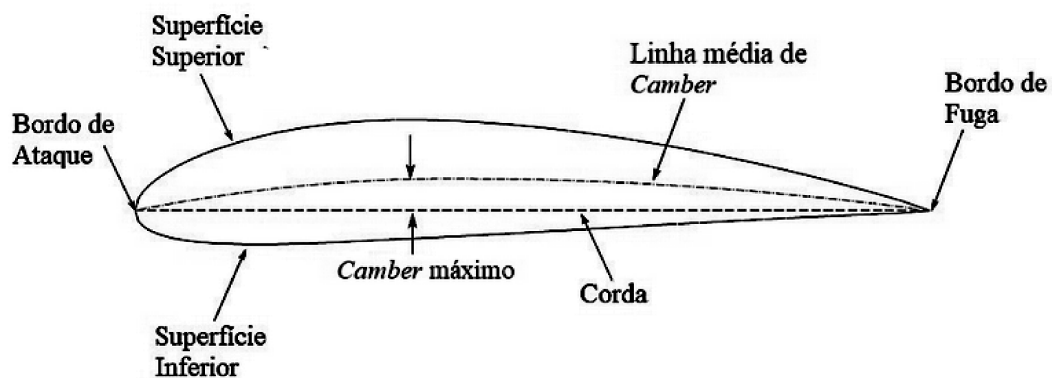
2.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE HÉLICES

As características geométricas de uma hélice podem ser divididas em geometria de perfil aerodinâmico e geometria da hélice propriamente dita. As subseções seguintes abordarão tais tópicos.

2.2.1 Geometria do perfil aerodinâmico

De acordo com Anderson [2010], o perfil aerodinâmico é a forma geométrica na seção da hélice. Uma hélice pode conter apenas um perfil em toda a sua extensão bem como uma combinação de vários perfis. As dimensões utilizadas para se definir um perfil podem ser vistas na Figura 17.

Figura 17 – Geometria de um aerofólio. (Fonte: Wall [2012]).

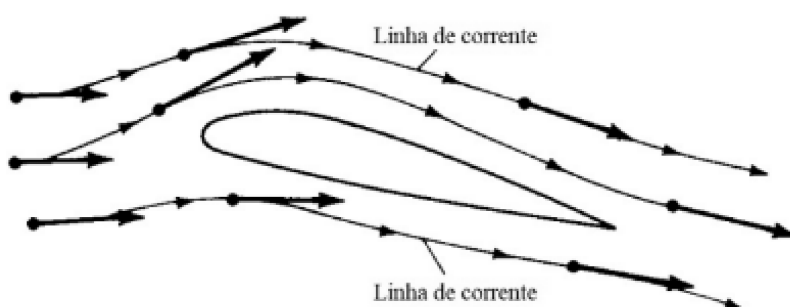


A linha média de arqueamento ou *camber* (*mean camber line*) é a média entre as superfícies inferiores e superiores do aerofólio. O ponto mais a frente é conhecido como bordo de ataque (*leading edge*), enquanto o ponto oposto é conhecido como bordo de fuga (*trailing edge*). A linha reta entre esse dois pontos é a linha de corda (*chord line*). O comprimento da linha de corda é conhecido como corda. A distância máxima entre a linha de corda e a linha de *camber* é conhecida como *camber* máximo e a posição onde se encontra é conhecida como posição de arqueamento máximo. A espessura do perfil é a distância máxima entre as superfícies inferior e superior medida perpendicularmente à linha de corda.

Tanto para as asas como para as hélices, o aerofólio é utilizado na construção da seção transversal de suas superfícies. Este é um dispositivo mecânico destinado à sustentação aerodinâmica por dois meios diferentes. Mecanicamente, pela terceira lei de Newton, o aerofólio pode ser operado com uma inclinação relativa ao fluxo de ar, fazendo com que o ar seja defletido para a parte inferior do aerofólio. Como o aerofólio produziu uma força capaz de mudar a direção do ar, este exercerá sobre o aerofólio uma força de igual intensidade, mas de direção oposta.

Por outro lado, aerofólios podem ainda possuir diferentes perímetros para suas partes inferior e superior, proporcionando sustentação pela Equação de Bernoulli. Segundo Anderson [2010], quando um aerofólio é submetido ao escoamento do ar, a porção que passa por sua parte superior tem maior velocidade do que a porção passante por sua parte inferior, visto que a distância a ser percorrida é maior na parte superior. Este efeito pode ser melhor visualizado através da representação das linhas de corrente do escoamento, como na Figura 18. Essa diferença de velocidades, pela equação de Bernoulli, é compensada com o surgimento de uma região de baixa pressão na superfície superior do aerofólio e alta pressão na superfície inferior do aerofólio.

Figura 18 – Linhas de corrente atuantes em um aerofólio. (Fonte: Anderson [2010]).



Percebe-se que é esta diferença de pressão que contribui significativamente com a sustentação do aerofólio. A sustentação será intensificada para maiores diferenças de pressão, proporcionadas por maiores velocidades de escoamento. Entretanto, para que exista sustentação, é necessário que exista escoamento. Por esta razão, uma aeronave só consegue decolar quando existe velocidade suficiente para proporcionar sustentação pelas asas desta, enquanto um sistema de propulsão à hélice só atinge o estado de deslocamento quando as pás das hélices forem acionadas por um motor.

É perceptível que o desempenho de um aerofólio é determinado exclusivamente pelas características do escoamento em que está inserido e pela geometria adotada em sua construção. Dado que o escoamento na aviação sempre será o ar sob diferentes velocidades, temperaturas e pressões, pesquisadores do início do século XX dedicaram-se a concepção de melhores aerofólios para utilização em aeronaves modernas como

componentes das asas e das pás das hélices. Neste cenário, A NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), predecessora da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), criou um sistema de quatro dígitos para descrever um grande número de perfis aerodinâmicos. Posteriormente foi criado um sistema de cinco dígitos. Algumas das dimensões utilizadas para se definir um perfil podem ser vistas na Figura 17. Os quatro dígitos do perfil aerodinâmico são:

- 1º Dígito: *Camber* máximo em termos percentuais.
- 2º Dígito: Posição de arqueamento máximo em termos percentuais.
- 3º e 4º Dígitos: Espessura em termos percentuais.

Posteriormente serão apresentadas as hélices que foram estudadas neste trabalho. Para hélice/pá da turbina eólica NREL 5MW (Figura 10), constituída por diversos perfis em sua seção transversal, os mesmos podem ser visualizados na Figura 19. Primeiramente, têm-se um perfil cilíndrico (na junção com o *hub*), após encontra-se os perfis DU (*Delft University*) e por fim os perfis NACA, já mencionados anteriormente.

2.2.2 Geometria da hélice

O diâmetro de uma hélice é definido como a distância de ponta a ponta e o raio (R) é definido com a distância entre o centro até uma das pontas da hélice. A corda (c) e o ângulo de torção (β) são definidos como funções da posição radial (r) da hélice. Esses parâmetros podem ser vistos na Figura 20.

Para especificar uma hélice comercialmente, é necessário expor pelo menos duas características desta: seu diâmetro (D) e passo (*pitch*). O primeiro é obtido ao se medir o diâmetro pertencente à circunferência gerada pela ponta da hélice ao girar. Para as hélices bi-pá, o diâmetro é obtido medindo-se a distância entre as duas pontas das pás. O passo é o deslocamento que uma hélice proporcionaria no sentido do seu eixo de rotação, ao completar uma revolução. Esta definição é similar ao avanço proporcionado pelo aperto em uma volta de um parafuso. Na Figura 20 observa-se ainda a existência de um parâmetro geométrico β . Este é o ângulo de torção geométrica da pá, variável ao longo das seções. Sua medida é obtida medindo-se o ângulo formado entre o plano de rotação da hélice e a corda de cada uma das seções. É importante destacar que passo teórico não deve ser confundido com este ângulo β . Em verdade, como as seções internas de uma hélice produzem uma circunferência de giro menor que as seções externas, o ângulo de torção costuma variar para garantir que o passo teórico seja o mesmo, independente da seção transversal analisada (Weick [1930]).

Diz-se passo teórico porque o passo efetivo obtido pela hélice é influenciado por perdas de arrasto aerodinâmico e direção de impacto do ar, principalmente na raiz da hélice,

Figura 19 – (a) aerofólio DU40, (b) aerofólio DU35, (c) aerofólio DU30, (d) aerofólio DU25, (e) aerofólio DU21, e (f) aerofólio NACA 64. (Fonte: Agarwala and Ro [2015]).

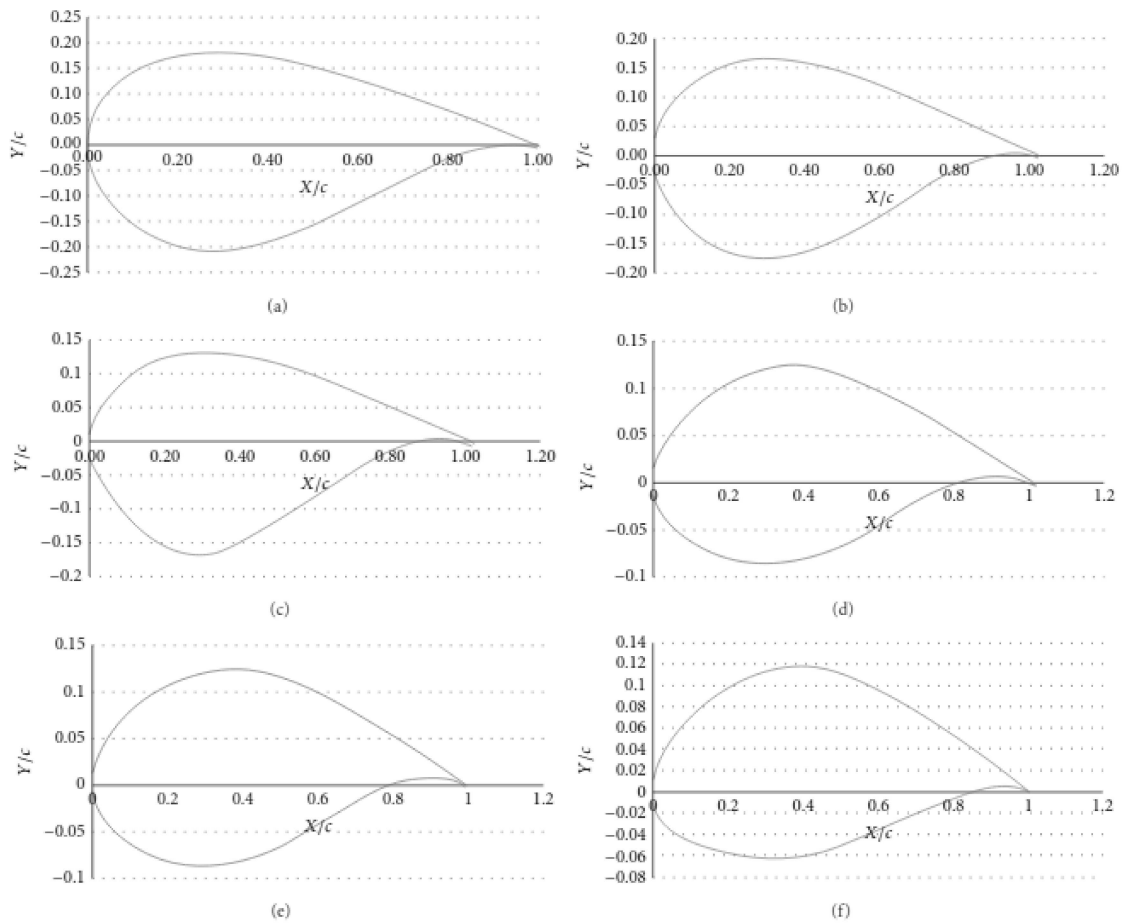
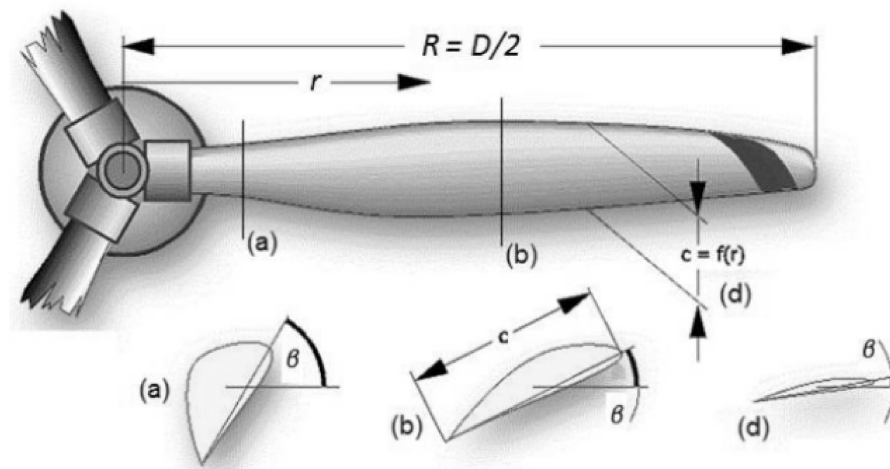


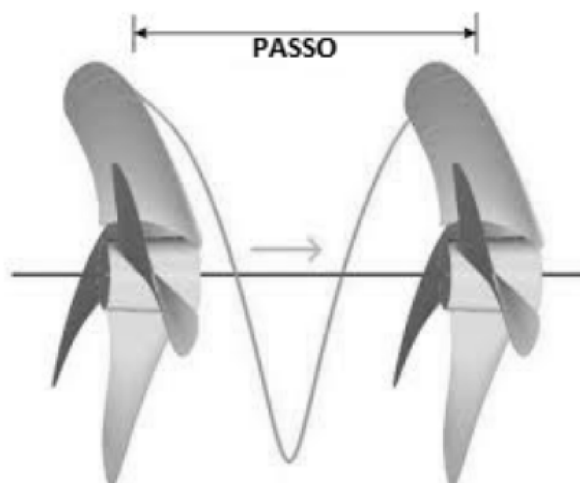
Figura 20 – Parâmetros geométricos de uma hélice. Retirada de <https://mh-aerotoools.de/airfoils/prophist>.



criando-se um recuo entre os dois passos. Apesar do efetivo ser a distância real percorrida (avanço), após uma revolução da hélice, o passo geométrico é o utilizado na especificação

comercial deste dispositivo. Por exemplo, uma hélice comercial de aeromodelos que é vendida com a especificação 6x3, é caracterizada por um diâmetro de 6" e um passo geométrico de 3" a cada volta completada. Definida uma velocidade de rotação ideal, as hélices de velocidade constante são capazes de proporcionar diferentes velocidades de deslocamento alterando-se apenas o passo. A Figura 21 exibe a definição do mesmo.

Figura 21 – Passo de uma hélice. Retirada de <https://propellerpages.com/?c=articlesf=2006-03-08-whatispellerpitch>.



Com os parâmetros especificados, já é possível estimar a ordem de grandeza da tração fornecida pela hélice, com o auxílio de calculadoras específicas disponíveis na internet. Entretanto, não é possível assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos por esta ferramenta, nem obter parâmetros específicos de eficiência, torque, esforços e informações sobre o fluido ou seções específicas da hélice. Têm-se então a necessidade da utilização de métodos analíticos ou computacionais para cálculo de hélices, que forneçam tais informações.

2.2.3 Parâmetros de desempenho

Atualmente, as hélices são analisadas em termos dos coeficientes de desempenho globalmente difundidos e utilizados em pesquisas e publicações, com o objetivo de padronizar a comparação de resultados e facilitar o processo de escolha de elementos aerodinâmicos nas etapas de projeto, além de adimensionalizar os valores de cálculo. Por esta razão, estes parâmetros também serão utilizados neste trabalho.

O primeiro coeficiente e o mais importante quando se analisa a tração fornecida por uma hélice, é o coeficiente de tração K_T . Como o próprio nome indica, seu valor depende diretamente dos valores de tração fornecidos pela hélice, mas são reduzidos para valores maiores de diâmetro e rotação. Seu valor é dado por:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2.1)$$

onde T = tração (empuxo) gerada pela hélice; ρ = densidade específica do ar; n = frequência de rotação da hélice; D = diâmetro da hélice.

O segundo coeficiente apresenta uma forma similar ao de tração, mas avalia em termos da potência necessária para movimentar a hélice. Este é chamado de coeficiente de potência K_P . Como este é definido em termos de uma potência P , é necessário defini-lo em termos do torque atuante na hélice. Esta potência é dada por:

$$P = 2\pi nQ \quad (2.2)$$

onde Q = tração (torque) requerida pela hélice, em N.m.

Desta forma, o coeficiente K_P é dado por:

$$K_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (2.3)$$

Outra terminologia comum é a razão de avanço J , uma variável adimensional que representa a razão entre a distância percorrida pela hélice no sentido axial e o diâmetro da pá. Segue que:

$$J = \frac{\Delta s}{D} = \frac{V\Delta t}{D} = \frac{V(1/n)}{D} = \frac{V}{nD} \quad (2.4)$$

onde V = velocidade de deslocamento (avanço) da hélice, em m/s.

Este coeficiente é comumente utilizado como abscissa em diversos gráficos comparativos, já que sua ordem de grandeza será similar mesmo quando se compara hélices maiores com outras de menor porte. Ademais, este coeficiente transmite uma informação direta de aproveitamento da hélice em determinada condição de uso.

Já a eficiência da hélice, que nas teorias clássicas apresentavam uma formulação menos direta, é a simples razão entre a potência útil fornecida pela hélice e a potência demandada para seu funcionamento. Assim, segundo Brandt and Selig [2011], a eficiência de uma hélice é dada por:

$$\eta = \frac{TV}{P} = \frac{K_T J}{K_P} \quad (2.5)$$

Por fim, o número de Reynolds local em uma seção de escoamento da hélice não é um coeficiente de eficiência, mas defini-lo é primordial em diversas etapas do dimensionamento, principalmente na definição dos parâmetros de um aerofólio. Este é obtido por:

$$Re = \frac{\rho V_t c}{\mu} \quad (2.6)$$

onde V_t = velocidade tangencial de rotação em determinada seção da hélice; c = valor da corda na seção de cálculo, em metros; μ = viscosidade do ar, em Pa.s.

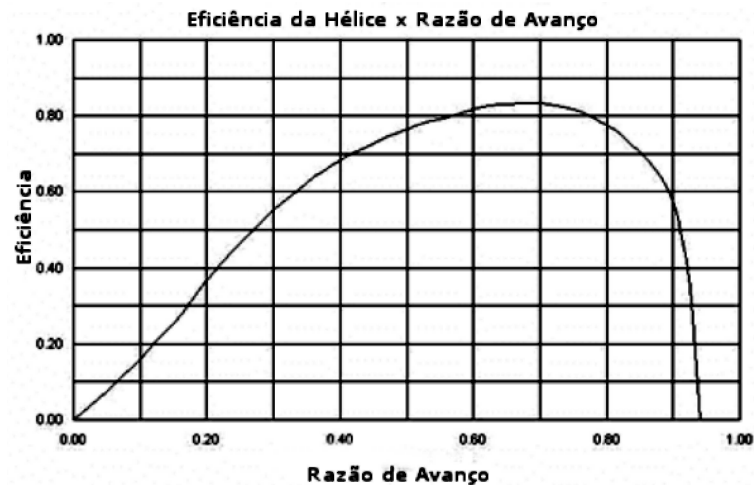
A velocidade V_t presente na Equação 2.6 refere-se à velocidade tangencial de rotação na seção da hélice em que o número de Reynolds será calculado. Pelas deduções de movimento circular uniforme, têm-se que:

$$V_{rot} = \omega r \quad (2.7)$$

onde ω = velocidade angular da hélice, em rad/s; r = valor do raio na seção de cálculo, em metros.

Como já mencionado, usualmente, a eficiência de uma hélice é traçada contra a razão de avanço, como mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Eficiência de uma hélice pela razão de avanço. Adaptada de <https://blackholes.org.uk/PP/e1low>.

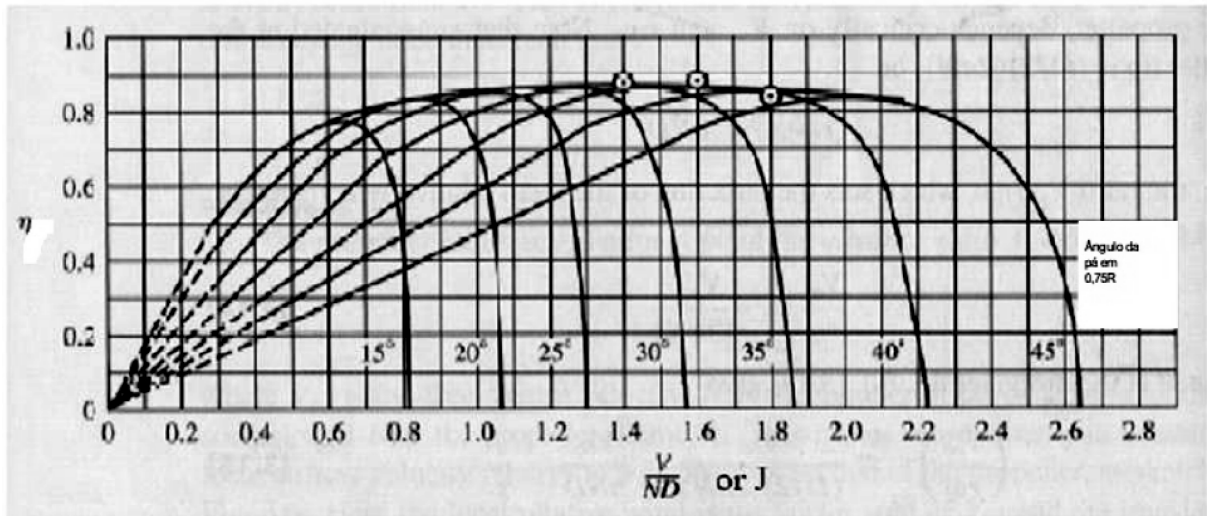


Essa informação é relevante para que se encontre a razão de avanço com maior valor de eficiência. Para que a hélice possa ser considerada adequada, é importante que sua eficiência máxima aconteça numa razão de avanço que corresponda a uma velocidade notável do sistema onde a mesma está inserida, como, por exemplo, a velocidade de cruzeiro em uma aeronave.

O aumento no passo de uma hélice causa um deslocamento para direita da curva de eficiência por razão de avanço, aumentando a razão de avanço para máxima eficiência, como mostrado na Figura 23.

Os valores dos coeficientes de eficiência (Equação 2.5), empuxo (Equação 2.1) e potência (Equação 2.3) em função da razão de avanço são obtidos com informações do empuxo e torque resultantes da hélice em operação. Esses valores são obtidos experimentalmente ou por meio de uma das ferramentas apresentadas na seção 1.2, que são a teoria

Figura 23 – Eficiência de uma hélice pela razão de avanço para diferentes passos. (Fonte: adaptado de McCormick [1979]).



do elemento de pá e suas variações e a dinâmica dos fluidos computacional. Com já dito anteriormente, este trabalho insere-se nesta última tendência.

3 MODELAGEM FÍSICA DE ESCOAMENTOS VISCOSOS E INCOMPRESSÍVEIS

Quando se deseja realizar simulações computacionais, algumas questões relevantes devem ser observadas para a modelagem física e matemática dos problemas.

Neste capítulo, uma descrição das aproximações que permitem a criação de um modelo computacional são discutidos. Para atender à demanda desta pesquisa, apresentam-se na sequência as equações do meio contínuo da dinâmica dos fluidos. Apresentam-se, ainda, as características dos escoamentos turbulentos e alguns modelos que possam representar este comportamento. Finaliza-se o capítulo com uma discussão sobre cinemática do contínuo, onde deve-se observar mudanças de referencial causadas por domínios em movimento.

3.1 NÍVEIS DE MODELAGEM

Quando se deseja formular problemas em mecânica dos fluidos, assim como em qualquer outra ciência, devem ser realizadas algumas aproximações. Tais aproximações qualificam os diversos modelos de escoamento existentes e são realizadas em diferentes níveis hierárquicos. Hirsch [2007] propõe a seguinte classificação hierárquica.

- Nível da realidade

Corresponde às descrições utilizadas para retratar o mundo físico. Isto compreende várias escalas, desde a escala subatômica até a escala astronômica, passando por todas escalas entre elas. Cada nível de descrição tem seu próprio conjunto de variáveis dependentes.

A mecânica dos fluidos e a própria ideia de fluido estão intimamente ligadas à mecânica do contínuo, onde o conceito de partícula do fluido é axiomático, sem necessidade de referência explícita à escala subatômica. A validade da hipótese de meio contínuo restringe-se a situações em que a escala de interesse da análise é muito maior do que o livre caminho médio das moléculas do líquido ou gás considerado.

As quantidades macroscópicas podem, então, ser tratadas como resultados de médias sobre um grande número de interações entre moléculas, que ocorrem no nível microscópico. No entanto, médias causam perda de informação e são necessárias complementações empíricas adicionais a respeito do fluido em estudo. São as chamadas equações constitutivas.

Partindo dessa hipótese e dos princípios de conservação da massa, quantidade de movimento e de energia, é possível descrever matematicamente o comportamento dos fluidos Newtonianos pelas equações de Navier-Stokes. Essas equações originam-se da

descrição básica da dinâmica dos fluidos desenvolvidas por Euler em 1741 e que foi corrigida para incluir as forças de viscosidade por Navier em 1827 e Stokes em 1945.

- **Nível temporal**

Corresponde à resolução temporal requerida do modelo de escoamento. As equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia, que descrevem o sistema de escoamento, podem ser obtidas integrando-se as leis de conservação sobre todas as escalas de tempo menores do que a escala temporal necessária para análise do problema. Mais uma vez, essas médias causam perda de informação de modo que os modelos necessitam de complementação através de dados externos adicionais.

Um exemplo desta classe de aproximação são as equações médias de Reynolds, utilizadas em simulações de escoamento turbulentos. Essas equações são obtidas fazendo-se as médias das equações de Navier-Stokes e necessitam de modelos de fechamento, baseados em dados experimentais.

- **Nível espacial**

O nível espacial está relacionado com o número de variáveis espaciais utilizadas para descrever o escoamento. Todo escoamento é tridimensional e, no entanto, existem modelos simplificados que utilizam a médias das leis de conservação fundamentais ao longo de uma ou duas dimensões espaciais, diminuindo com isso a complexidade do problema.

Um exemplo do uso de modelos bidimensionais vem das equações para águas rasas (Peraire et al. [1986]). Essas equações são aplicadas em escoamentos em baías e portos. O modelo é obtido tomando-se uma média das equações de Navier-Stokes ao longo da profundidade da lâmina da água. Devido à integração envolvida na obtenção das equações, este modelo requer informações externas que levem em conta as forças superficiais do vento e o fator de fricção no fundo do mar.

- **Nível dinâmico**

Este nível de aproximação diz respeito à importância relativa entre as forças que governam o escoamento. Dependendo da importância de uma determinada força, esta pode ser desconsiderada, resultando em uma descrição matemática mais simples.

Em problemas de lubrificação, onde os efeitos viscosos são dominantes, as forças de inércia são normalmente desprezadas. Em outros casos, modelos simplificados são aplicados em diferentes regiões do escoamento. Um exemplo é a aproximação da camada limite de Prandtl para análise de escoamentos viscosos externos. Neste caso, uma aproximação para escoamento invíscido é corrigida para levar em conta os efeitos viscosos em regiões próximas às paredes sólidas (Schlichting and Gersten [2016]).

- Nível da homogeneidade

Este nível é aplicável a escoamentos multifásicos e escoamento em meios porosos. As equações dos modelos são obtidas tomando-se a média das equações de conservação em volumes contendo misturas de diferentes materiais. Dados externos contendo informações sobre as trocas de massa, quantidade de movimento e energia nas interfaces dos materiais são necessários.

Para os escoamentos de interesse da Engenharia é conveniente a descrição no domínio da mecânica do contínuo que pode ser considerada como modelo fundamental. Sub-modelos podem ser derivados através de médias e/ou suposições sobre a importância relativa das várias forças que governam o escoamento (Moreira et al. [1998]). Outro aspecto relevante é que quanto mais aproximações são feitas, mais os modelos tornam-se dependentes de dados empíricos.

Uma aproximação que merece atenção está relacionada à compressibilidade dos escoamentos. A maior parte dos escoamentos em mecânica dos fluidos pode ser classificada em uma dessas duas categorias. Em geral, o escoamento dos líquidos é aproximado com incompressível enquanto que o escoamento dos gases é tomado como compressível. Entretanto, essa classificação não é absoluta pois mesmo líquidos apresentam alguma compressibilidade e o escoamento de gases a baixas velocidades pode ser aproximado com incompressível.

É importante ressaltar que a questão da compressibilidade não limita-se apenas ao aspecto físico, mas repercute diretamente nas características matemáticas das equações que representam o modelo (Moreira et al. [1998]) e (De Sampaio and Moreira [2000]). A compressibilidade do escoamento pode ser inferida a partir do número de Mach definido como:

$$Ma = \frac{v}{c} = \frac{\text{velocidade do fluido}}{\text{velocidade do som}} \quad (3.1)$$

Ressalta-se que para valores do número de Mach inferiores a 0,3 o escoamento pode, em geral, ser considerado incompressível (Simiu and Scanlan [1996]).

3.2 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES PARA ESCOAMENTOS INCOMPRESSÍVEIS

Para escoamentos incompressíveis e com viscosidade constante, o problema é regido pelas equações de Navier-Stokes apresentadas a seguir. Essas equações são apresentadas em uma descrição Euleriana, onde as propriedades características do meio são consideradas função do espaço e tempo. O problema é definido em um domínio Ω com contorno Γ contendo n dimensões de espaço Euclidiano. Na forma não conservativa, ou seja, utilizando variáveis primitivas de pressão e velocidade em coordenadas Cartesianas e usando a convenção de somatório: $a=1, \dots, n$ e $b=1, \dots, n$ essas equações assumem a forma:

- Equação de conservação da quantidade de movimento:

$$\rho \frac{\partial v_a}{\partial t} + \rho v_b \frac{\partial v_a}{\partial x_b} - \frac{\partial \tau_{ab}}{\partial x_b} + \frac{\partial p}{\partial x_a} = f_a \quad (3.2)$$

- Equação de conservação de massa (equação da continuidade):

$$\frac{\partial v_a}{\partial x_a} = 0 \quad (3.3)$$

Tal que:

$$\tau_{ab} = \mu \left(\frac{\partial v_a}{\partial x_b} + \frac{\partial v_b}{\partial x_a} \right) \quad (3.4)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, τ_{ab} é a tensão viscosa, μ é a viscosidade do fluido, v são as componentes de velocidade, p é a pressão, f_a são as componentes das forças por unidade de volume.

O modelo é fechado introduzindo as condições de contorno e as velocidades iniciais. Velocidades e forças de superfície são prescritas, respectivamente, nos contornos Γ_{ua} e Γ_{ta} , tal que $\Gamma_{ua} \cup \Gamma_{ta} = \Gamma$ e $\Gamma_{ua} \cap \Gamma_{ta} = \emptyset$, ou seja:

$$v_a = \bar{v}_a(x, t) \quad \text{onde } x \in \Gamma_{ua} \quad (3.5)$$

$$\bar{t}_a(x, t) = (-p\delta_{ab} + \tau_{ab}) n_b \quad \text{onde } x \in \Gamma_{ta} \quad (3.6)$$

onde δ_{ab} é a função delta de Kronecker e n ($n_b, b = 1, nde$) é o vetor normal externo ao contorno.

As condições de contorno de pressão e de fluxo de massa estão associadas ao balanço de massa. Estas grandezas são prescritas como \bar{p} e \bar{G} nos contornos Γ_p e Γ_G , tal que $\Gamma_p \cup \Gamma_G = \Gamma$ e $\Gamma_p \cap \Gamma_G = \emptyset$, ou seja:

$$p = \bar{p}(x, t) \quad \text{onde } x \in \Gamma_p \quad (3.7)$$

$$\rho v_b n_b = \bar{G}(x, t) \quad \text{onde } x \in \Gamma_G \quad (3.8)$$

3.3 TURBULÊNCIA

3.3.1 Características dos escoamentos turbulentos

Segundo Versteeg and Malalasekera [2007], todos os escoamentos reais tornam-se turbulentos a partir de um determinado valor do número de Reynolds. Neste caso, observa-se um estado caótico e aleatório de movimento em que as velocidades e pressões mudam

continuamente com o tempo. O número de Reynolds fornece uma medida da importância relativa das forças de inércia (associada ao termo convectivo) e as forças viscosas.

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (3.9)$$

onde v é a velocidade do escoamento, L uma dimensão característica e ν a viscosidade cinemática.

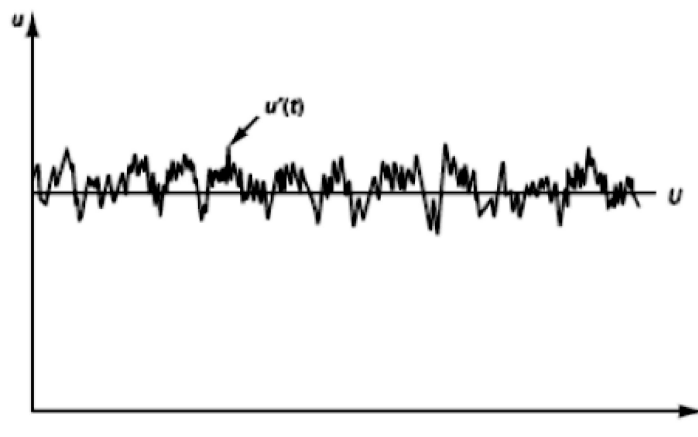
Em muitos experimentos é observado que valores abaixo dos denominados Re crítico (Re_c) o escoamento é laminar e camadas adjacentes do fluido deslizam entre si de forma ordenada. Se a condição de contorno não mudar com o tempo o escoamento é estável. Esse regime é denominado de regime laminar. Escoamentos laminares são completamente descritos pela equação de Navier-Stokes.

Para valores do número de Reynolds maiores que Re_c , surgem eventos complexos que alteram a natureza do escoamento, tornando-o caótico e aleatório. O movimento, denominado turbulento, se torna instável mesmo que lhe sejam impostas condições de contorno constantes.

A aleatoriedade de escoamentos turbulentos impossibilita a descrição das partículas de maneira simples e a velocidade (bem como qualquer outra variável de interesse) é decomposta em um valor médio U com flutuações $u'(t)$. A Figura 24, extraída de Versteeg and Malalasekera [2007] é um exemplo de um sinal aleatório que pode ser decomposto na sua média e nas flutuações em torno desta. A soma das duas parcelas é denominada decomposição de Reynolds:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (3.10)$$

Figura 24 – Exemplo de um sinal aleatório de velocidade em um escoamento turbulento. (Fonte: Versteeg and Malalasekera [2007]).



Mesmo em escoamentos uni ou bi dimensionais, as flutuações turbulentas sempre tem características espaciais tridimensionais. Além disso, as visualizações de escoamentos turbulentos revelam estruturas de escoamentos rotacionais, denominadas turbilhões com ampla variedade de escalas. Partículas de fluido que no instante inicial estão separadas por uma longa distância podem se aproximar pelos movimentos dos turbilhões em escoamentos turbulentos. Como consequência, calor, massa e quantidade de movimento mudam consideravelmente.

Os maiores turbilhões interagem entre si e extraem energia do escoamento médio por um processo denominado alargamento de vórtices. A presença de gradientes médios de velocidade em escoamento cisalhante distorce os turbilhões. Os redemoinhos adequadamente alinhados são esticados porque uma extremidade é forçada a se mover mais rápido do que a outra.

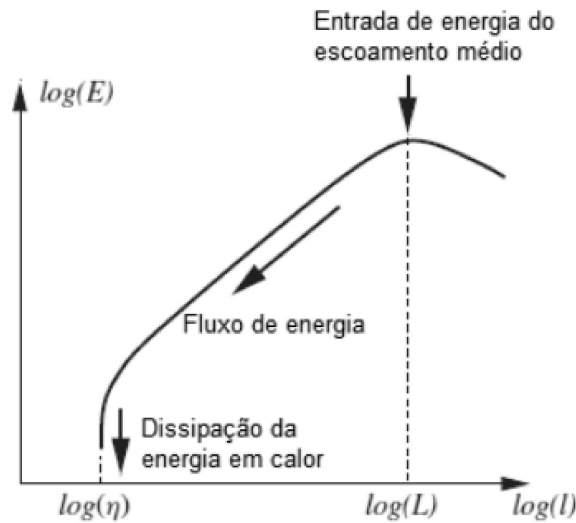
A velocidade característica u e o comprimento característico l dos maiores turbilhões são da mesma ordem de grandeza da velocidade v e da escala de comprimento L do escoamento médio. Assim, define-se o número de Reynolds do maior turbilhão como ul/ν que é formado pela combinação dessas escalas de turbilhões com a viscosidade cinemática. Esta será a maior escala do escoamento, que é dominada pelas forças de inércia, sendo insignificantes os efeitos viscosos.

Os grandes turbilhões são, portanto, efetivamente invíscidos e conservam a quantidade de movimento angular durante o estiramento dos vórtices. Isso faz com que a taxa de rotação aumente e o raio de sua seção transversal diminua. Todo esse processo cria movimentos em escalas de comprimento transversal menores e também em escalas de tempo menores. O trabalho de alongamento realizado pelo escoamento médio nos maiores turbilhões durante esses eventos fornece a energia que alimenta a turbulência. Pequenos turbilhões são eles mesmos esticados fortemente por redemoinhos maiores. Desta forma, a energia cinética é transferida dos grandes turbilhões para os progressivamente menores e menores turbilhões, em um processo de cascata, onde finalmente é dissipada em forma de calor pela viscosidade.

Essas escalas são denominadas de microescalas de Kolmokolov, em homenagem ao pesquisador russo Andrei Kolmokolov que desenvolveu pesquisas sobre a estrutura da turbulência em meados da década de 40. Nessas escalas trabalho é desenvolvido contra a ação das tensões viscosas, de tal forma que a energia associada com o movimento das pequenas escalas dos turbilhões é dissipada na forma energia térmica interna. Essa dissipação resulta em maiores perdas energia associada com a turbulência. A Figura 25 mostra uma representação esquemática da distribuição de energia das flutuações da velocidade em várias escalas de comprimento.

As razões entre escalas de menor comprimento, tempo e velocidade $(\delta; \tau; \nu)$ e as escalas de maior comprimento, tempo e velocidade $(l; T; \theta)$ são:

Figura 25 – Distribuição de energia das flutuações de um sinal de velocidade em escoamento turbulento. (Fonte: Zikanov [2010]).



- Razão de escala de comprimento

$$\frac{\delta}{l} = Re_l^{-3/4} \quad (3.11)$$

- Razão de escala de tempo

$$\frac{\tau}{T} = Re_l^{-1/2} \quad (3.12)$$

- Razão de escala de velocidade

$$\frac{\nu}{\theta} = Re_l^{-1/4} \quad (3.13)$$

O comportamento dos maiores turbilhões deve ser independente da viscosidade e deve depender das escalas de velocidade θ e do comprimento l . Assim, em termos de análises dimensionais, espera-se que o espectro de energia contendo esses turbilhões se comporte proporcionalmente a $E(k) \propto \theta^2 l$ (sendo $k=1/l$). Como a escala de comprimento l é relacionada a escala de comprimento dos processos de produção de turbulência (ex: espessura da camada limite, largura do obstáculo, etc), espera-se uma estrutura anisotrópica dos maiores turbilhões (flutuações diferentes em diferentes direções), fortemente influenciada pelas condições de contorno.

Segundo Kolmogorov a estrutura dos pequenos turbilhões e sua energia espectral devem depender somente da razão da taxa de dissipação da energia turbulenta ϵ (m^2/s^3) pela viscosidade cinemática do fluido ν . Isso resulta, pela análise dimensional, a seguinte relação de proporcionalidade da energia espectral:

$$E\left(k\frac{1}{\delta}\right) \propto \nu^{5/4}\epsilon^{1/4} \quad (3.14)$$

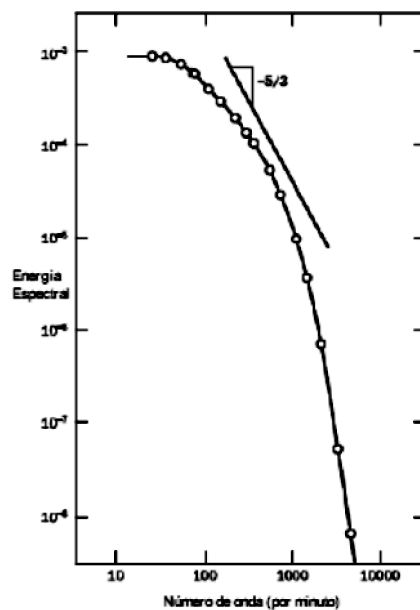
Desta forma, a energia espectral $E(k)$ dos pequenos turbilhões depende somente da taxa de dissipação de energia e de mais nenhuma outra variável. Os efeitos difusivos da viscosidade tende a uniformizar a distribuição da pequenas escalas em todas as direções e, portanto, as pequenas escalas em um escoamento turbulento são isotrópicas.

Finalmente, Kolmogorov derivou propriedades espectrais universais para os turbilhões de tamanhos intermediários, suficientes grandes devido ao seu comportamento de não ser afetado pelos efeitos viscosos (como os maiores turbilhões), mas suficientemente pequeno tal que as características do seu comportamento possam ser expressas como função da taxa de dissipação de energia (como nos menores turbilhões). A escala de comprimento apropriada para esses turbilhões é $1/k$. Kolmogorov observou que a energia espectral desses turbilhões satisfaz a relação:

$$E(k) = \alpha k^{-5/3}\epsilon^{2/3} \quad (3.15)$$

O valor da constante $\alpha \approx 1.5$ inclui a linha com declive de $-5/3$, indicando que, para o experimento mostrado, a escala de separação é insuficiente uma sub faixa inercial clara. Sobreposição entre a maiores e menores escalas está localizada em um ponto em torno de $k \approx 1000$. A Figura 26 relaciona a energia espectral como o número de onda turbulento.

Figura 26 – Espectro de energia da turbulência. (Fonte: Zikanov [2010]).



3.3.2 Modelos de turbulência

A turbulência, como exposto na seção 3.3.1, corresponde a um estado caótico de movimento das partículas e envolve uma vasta amplitude de escalas temporais e espaciais. Dada a complexidade de simular todas as escalas, há diversas propostas para a modelagem da turbulência. Basicamente, estes modelos propõem a separação das variáveis nas suas médias e nas suas flutuações.

Esta separação é feita ao se aplicar a decomposição 3.10 a todas as variáveis do conjunto de equações de Navier-Stokes apresentadas na seção 3.2 surgem termos que acumulam as informações das flutuações. O processo para obtê-los podem ser facilmente acompanhados nas referências sobre o tema (Versteeg and Malalasekera [2007], Zikanov [2010], Pope [2001], Wilcox et al. [1998]), sendo importante destacar que estes termos adicionais resultam em um tensor de tensões adicional denominado tensor de Reynolds. Os termos deste tensor representam:

- Tensões normais

$$\tau_{xx} = -\rho \overline{v_1'^2} \quad \tau_{yy} = -\rho \overline{v_2'^2} \quad \tau_{zz} = -\rho \overline{v_3'^2} \quad (3.16)$$

- Tensões cisalhantes

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \overline{v_1'v_2'} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho \overline{v_1'v_3'} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho \overline{v_2'v_3'} \quad (3.17)$$

Os modelos de turbulência podem ser agrupados em três grandes grupos, de acordo com a forma como é feita a decomposição do escoamento e o tratamento destes termos adicionais. Em linhas gerais, os modelos são classificados em três categorias, que são:

- Modelos de turbulência para as equações médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* - RANS): o principal foco desses modelos é o escoamento médio e os efeitos da turbulência nas propriedades do escoamento médio. Primeiramente, antes da aplicação de algum método numérico, é feita as médias temporais das equações de Navier-Stokes. Termos extras aparecem devido as interações entre as várias flutuações turbulentas. Esses termos extras são modelados com modelos de turbulência clássicos, como o modelo k- ϵ e k- ω , dentre outros. Os recursos computacionais necessários para cálculos razoavelmente precisos são modestos, portanto, esta abordagem tem sido o principal suporte de engenharia nas últimas três décadas.
- Simulação das grandes escalas (*Large Eddy Simulation* - LES): forma intermediária dos modelos de turbulência que acompanha o comportamento dos maiores turbilhões. O método aplica um filtro espacialmente as equações de Navier-Stokes, que

passam os maiores turbilhões e rejeitam os menores. Os efeitos de escoamento "resolvido" (escoamento médio mais a solução dos maiores turbilhões) devido aos menores, que não são resolvidos são incluídos por meio dos denominados modelos de escala sub-malha.

As demandas em recursos de computação em termos de armazenamento e volume de cálculos são grandes, mas esta técnica está começando a resolver problemas de CFD com geometria complexa.

- Simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation* - DNS): Estas simulações computam o escoamento médio e todas as flutuações de velocidade. Na solução espacial das equações de Navier-Stokes utilizam-se malhas espaciais que são suficientemente refinadas de tal forma que resolvem as escalas de comprimento de Kolmogorov onde a dissipação de energia são resolvidas. Os passos de tempo são também suficientemente pequenos para resolver as flutuações mais rápidas. Esses cálculos são computacionalmente custosos e, por isso, não é muito utilizado.

Por ser de interesse neste trabalho, na seção subsequente descrevem-se, sucintamente, os modelos RANS $k-\epsilon$ e $k-\omega$ (além de sua variação $k-\omega$ SST).

3.3.3 Modelos de turbulência de duas equações

Para a maioria dos propósitos de engenharia, não há a necessidade de se resolver todos os detalhes das flutuações turbulentas. Assim, nestas aplicações em CFD, quase sempre há o interesse em se obter as informações sobre as propriedades médias do escoamento (por exemplo, velocidades médias, pressões médias, tensões médias etc.) (Versteeg and Malalasekera [2007]). Para poder calcular os fluxos turbulentos com as equações RANS, é necessário desenvolver modelos de turbulência para prever as tensões de Reynolds e os termos de transporte escalar e fechar o sistema de equações do escoamento médio.

Os modelos de turbulência RANS mais comuns são classificados com base no número de equações de transporte adicionais que precisam ser resolvidas juntamente com as equações do escoamento médio. Os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ são, portanto, denominados modelos com duas equações pois resolvem as equações relacionadas a energia cinética turbulenta das flutuações k , a taxa de dissipação por unidade de massa ϵ e a taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta ω .

Estes utilizam a hipótese de que o gradiente de difusão k é relacionado às tensões de Reynolds, aos gradientes de velocidade média e à viscosidade turbulenta μ_t . A viscosidade turbulenta, por sua vez, é modelada como o produto de uma velocidade turbulenta e escala de comprimento turbulenta. Nos modelos de duas equações, com os discutidos nesta seção, a escala de velocidade turbulenta é calculada pela energia cinética turbulenta, que é obtida da solução de suas equações de transporte. A “escala de comprimento” turbulenta

é estimada a partir de duas propriedades do campo turbulento, usualmente a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação, que é obtida da solução de suas equações de transporte. Os modelos de turbulência de duas equações são amplamente utilizados, já que oferecem bom equilíbrio entre custo computacional e acurácia. Nesses modelos, velocidade e escala de comprimento são resolvidos através de equações de transporte separadas.

3.3.3.1 Modelo k - ϵ

Após a decomposição de Reynolds (equação 3.10), tem-se as seguintes equações de continuidade e de quantidade de movimento para os termos médios:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0 \quad (3.18)$$

- Equação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (3.19)$$

onde S_M é a soma das forças dos corpos, μ_{eff} é a viscosidade efetiva e p' é a pressão modificada, definida por:

$$p' = p + \frac{2}{3}pk + \frac{2}{3}\mu_{eff} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \quad (3.20)$$

O modelo k - ϵ é baseado no conceito de viscosidade turbulenta. Desta forma, a viscosidade é considerada a soma da viscosidade do fluido μ e a viscosidade turbulenta μ_t , logo:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.21)$$

O modelo k - ϵ considera que a viscosidade turbulenta é relacionada à energia cinética e sua dissipação através da relação:

$$\mu_t = C\rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.22)$$

onde C é uma constante de valor 0,09.

Os valores de k e ϵ são obtidos diretamente das equações diferenciais de transporte para a energia cinética turbulenta e taxa de dissipação:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho\epsilon + P_{kb} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_\omega) \quad (3.24)$$

onde $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k e σ_ϵ são constantes empíricas no valor de 1.44, 1.92, 1 e 1.3, respectivamente.

P_{kb} e $P_{\omega b}$ representam a influência das forças de flutuabilidade. P_k é a produção de turbulência devido às forças viscosas e é modelada como:

$$P_k = \sigma_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (3.25)$$

Para problemas incompressíveis, $(\partial v_k / \partial x_k)$ é pequeno e o segundo termo da equação acima não contribui de maneira significativa. Para problemas compressíveis, $(\partial v_k / \partial x_k)$ é grande apenas em regiões com velocidades altamente divergentes, como em ondas de choque. O termo $3\mu_t$ é baseado na suposição de *Frozen Stress*, que previne que os valores de k e ϵ se tornem muito grande em zonas de choque.

3.3.3.2 Modelo k - ω

Uma das vantagens da formulação do modelo k - ω é o tratamento próximo à parede para problemas com baixos números de Reynolds. O modelo não envolve complexas funções de amortecimento necessárias ao modelo k - ϵ e, portanto, é mais acurado e robusto. O modelo k - ω considera que a viscosidade turbulenta, energia cinética turbulenta e frequência da turbulência são conectadas através da relação:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.26)$$

A primeira formulação do modelo k - ω foi desenvolvido por Wilcox et al. [1998]. A formulação resolve duas equações de transporte:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (3.28)$$

A densidade, ρ , vetor de velocidades, v , são obtidas através do método de Navier-Stokes. P_k é calculado da mesma maneira que no modelo k - ϵ . As constantes do modelo são dadas por:

$$\beta' = 0.09 \quad (3.29)$$

$$\alpha = 5/9 \quad (3.30)$$

$$\beta = 0.075 \quad (3.31)$$

$$\sigma_k = 2 \quad (3.32)$$

$$\sigma_w = 2 \quad (3.33)$$

O tensor tensão de Reynolds é calculado por:

$$-\rho \overline{v_i v_j} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (3.34)$$

3.3.3.3 Modelo $k-\omega$ SST

O ponto de partida para o desenvolvimento do modelo SST (*Shear Stress Transport*) foi a necessidade de uma previsão precisa dos fluxos com gradientes fortes de pressão adversa e separação (Menter [1993]). Ao longo de décadas, os modelos de turbulência disponíveis consistentemente falharam ao calcular esses fluxos. Em particular, o popular modelo $k-\epsilon$ foi incapaz de capturar o comportamento adequado das camadas limite turbulentas até a separação (Wilcox et al. [1998]).

O modelo $k-\omega$ é substancialmente mais preciso que o $k-\epsilon$ nas camadas próximas da parede e, portanto, usado com sucesso para fluxos com gradientes moderados de pressão adversa, mas falha em fluxos com pressão induzida de separação (Menter [1993]). Além disso, a equação de ω mostra uma forte sensibilidade aos valores de ω nas linhas de corrente (*freestream*) fora da camada limite (Menter [1992]). A sensibilidade do *freestream* impediu amplamente a equação de ω de substituir a equação de ϵ como a equação de escala padrão na modelagem de turbulência, apesar de seu desempenho superior na região da parede próxima.

Essa foi uma das principais motivações para o desenvolvimento do método de mistura $k-\omega$ SST. Na proximidade das paredes o modelo $k-\omega$ SST usa a abordagem $k-\omega$, em regiões distantes da parede ele usa o modelo padrão $k-\epsilon$ de turbulência. A alternância entre esses modelos é controlada por uma função de mesclagem.

Como já mencionado, foi projetado para fornecer previsões altamente precisas do início e da quantidade de separação do fluxo sob gradientes de pressão adversa pela inclusão de efeitos de transporte na formulação da viscosidade turbulenta. Por outro lado, o modelo pode ser considerado mais complexo e, portanto, requer mais tempo computacional do que simples modelos de duas equações (Dose [2013]).

A relação entre a viscosidade turbulenta do turbilhão ν_t com a energia cinética turbulenta k e a taxa de dissipação específica ω é:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (3.35)$$

onde α_1 e a_1 são constantes, F_2 uma função de mesclagem, S é o tensor de deformação.

As equações de transporte para a energia cinética turbulenta k e para a taxa de dissipação específica ω são caracterizadas pela equação de transporte do modelo de turbulência $k - \omega$ (Wilcox et al. [1998]). Observe que, para a equação de ω , o modelo usa a função de mistura F_1 para alternar entre os modelos $k - \omega$ e $k - \epsilon$.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma^* \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma^* \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.37)$$

Mais detalhes sobre as funções de mesclagem F_1 , F_2 e as constantes do modelo podem ser encontradas em Menter [1993, 1994, 2009]. Uma das vantagens da formulação é o tratamento próximo à parede, para cálculos com baixo número de Reynolds, onde é mais preciso e mais robusto.

3.4 MODELO CINEMÁTICO PARA MOVIMENTO DO SÓLIDO

Em algumas aplicações onde tem-se domínios que possuem movimento relativo entre si, faz-se necessária a utilização de ferramentas para descrever todo o movimento do sistema e suas compatibilidades. Este é o caso desta pesquisa, onde há uma hélice acoplada a um eixo em rotação. Para tal, o sistema de equações descrito na seção 3.2 deve acomodar o movimento do fluido ao da fronteira sólida.

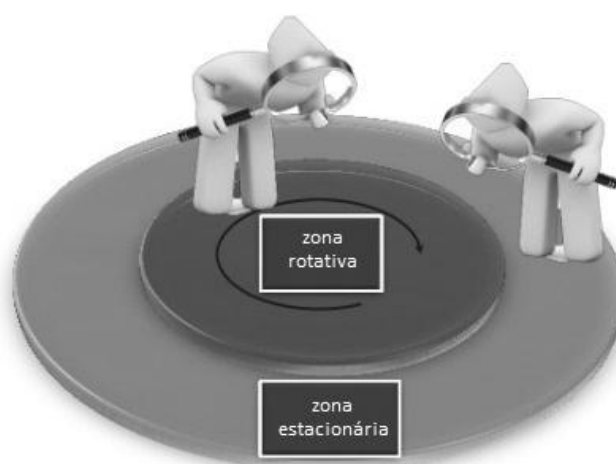
Existem na literatura diversas técnicas que abordam o movimento rotativo, cada qual com suas particularidades. É necessário saber de antemão algumas características do modelo estudado, para que seja feita a escolha da técnica que melhor se adapta ao estudo. Entre essas características podem ser citadas: domínio computacional, se é apenas rotativo ou não; e dependência do tempo, se o resultado obtido será através de solução transiente ou estacionária. Na seção subsequente é detalhada a metodologia utilizada neste trabalho, denominada na literatura de *Arbitrary Mesh Interface* (AMI).

3.4.1 Arbitrary Mesh Interface (AMI)

A Interface de Malha Arbitrária (AMI) é uma técnica de malha deslizante, na qual a zona de rotação ao redor do objeto se move a cada passo e os valores contidos

na interface são interpolados para atualizar a malha a cada passo. Ela permite simular *patches* (regiões) desconectados e não conformes, entre domínios de malhas adjacentes que foram desenvolvidos com base no algoritmo descrito em Farrell and Maddison [2011]. Na Figura 27 observa-se a zona de rotação (rotor), a zona estática (estator) e a interface, responsável por transmitir informações de uma zona para a outra e que está localizada na fronteira entre as duas.

Figura 27 – Rotor e estator de uma malha móvel. Retirada de <https://slideshare.net/fumiyanozaki/96/cfd-for-rotating-machinery-using-openfoam>.



A malha deslizante é uma técnica computacional transiente para modelar os problemas de CFD em que a interação entre o estator e o rotor é forte e é necessária uma computação mais precisa em comparação com modelos anteriores (Mehdipour [2014]). A conexão entre as diferentes regiões é tratada por uma interface de malha. As interfaces arbitrárias de malha (AMI) são comumente usadas neste contexto (Figura 28 (a)). Aqui, a interface entre a parte estacionária e a parte de rotação da geometria computacional é exclusivamente necessária para a simulação numérica e não tem significado físico, vide Figura 28 (b) (Wilhelm [2015]).

A abordagem da AMI baseia-se na criação de uma "super malha". Essa super malha é definida pelos elementos de interseção de dois passos de tempo consecutivos da malha. Esta abordagem é aplicada para interpolação de malhas adaptativas, tende a reduzir erros de continuidade, melhorando sua eficiência numérica (Carneiro et al. [2019]). Com a criação da super malha os problemas de interseção e sobreposição de áreas possuem um procedimento mais robusto, que otimiza a precisão da interpolação e, conseqüentemente, melhora a conservação das propriedades (Farrell and Maddison [2011]). A Figura 29, ilustra a idéia dessa super malha.

A troca de valores das propriedades do fluido ocorre através da fronteira externa do domínio interno e da fronteira interna do domínio externo, usando um método de

Figura 28 – (a) Interface de malha arbitrária (AMI) entre domínio fixo (estator) e domínio móvel (rotor). (Fonte: Wilhelm [2015]). (b) Subdomínio de malha rotativa com AMI. (Fonte: Wilhelm [2015]).

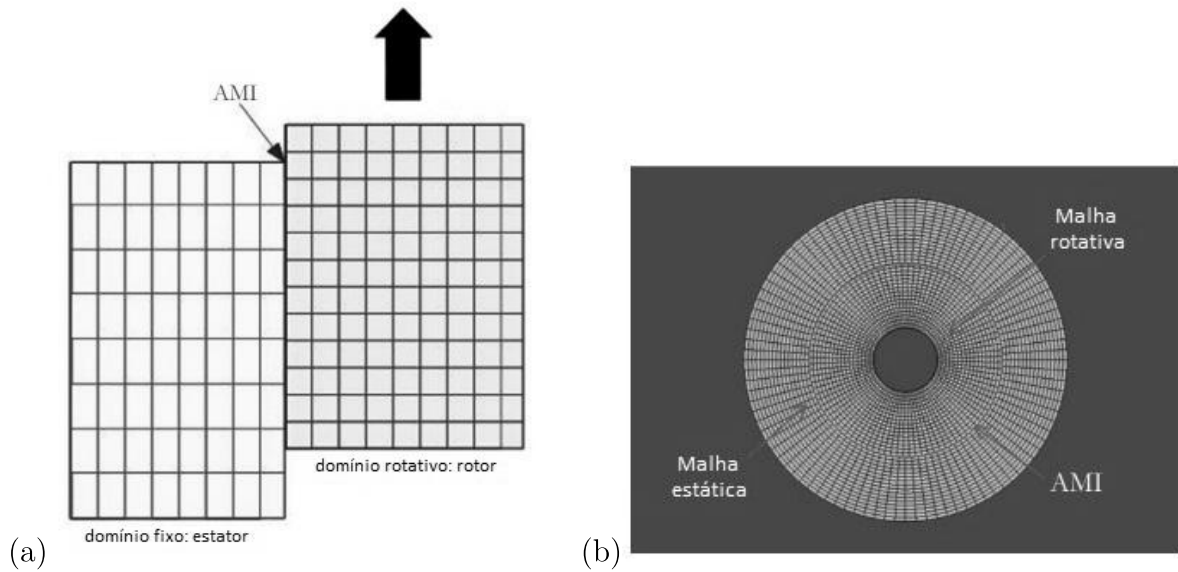
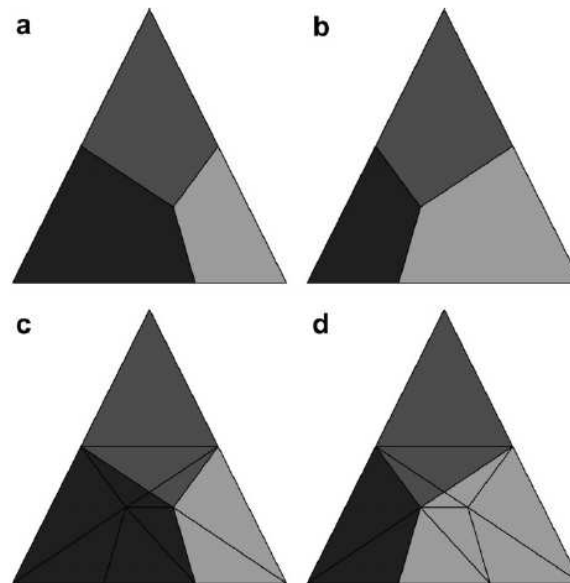


Figura 29 – (a) e (b) Duas malhas quadrilaterais. (c) Uma super malha triangular de (a) e (b), colorida para mostrar os elementos de (a). (d) A mesma super malha de (a) e (b), colorida para mostrar os elementos de (b). (Fonte: Farrell and Maddison [2011]).



interpolação conservativo por projeção local de Galerkin proposta em Farrell and Maddison [2011]. Os pesos da AMI definem a contribuição como uma fração das áreas que se cruzam. Para cada face, a soma dos pesos deve ser igual a 1. Os erros de conservação são introduzidos à medida que a soma dos pesos se desvia de 1, onde as geometrias da malha não são bem correspondentes. Embora esses erros sejam localizados e não causem falha no método, os usuários podem especificar um limite mais baixo para a soma dos pesos. Quando a soma

dos pesos fica abaixo desse limite, a interpolação nas células da interface AMI para e uma condição de fronteira de Dirichlet é imposta às faces específicas que estão sendo analisadas (Mishra et al. [2015]).

4 TRATAMENTOS NUMÉRICOS

O objetivo desta seção é o de descrever, sucintamente, alguns dos métodos numéricos empregados no trabalho. Na primeira parte apresenta-se a plataforma computacional utilizada. Na sequência, as técnicas numéricas são sumarizadas, abordando os pontos de maior relevância.

4.1 PROGRAMA CFD UTILIZADO

A caixa de ferramentas computacionais OpenFOAM (OpenFOAM [2011]) foi criada por Henry Weller em Londres e teve seu lançamento em 2004. É um pacote de software livre e de código aberto capaz de simular uma ampla variedade de processos de escoamento que atende a um vasto grupo de áreas da ciência e das engenharias, tanto para finalidades comerciais quanto acadêmicas. A caixa de ferramentas padrão inclui mais de 80 módulos solucionadores, cada um adaptado a fluxos que variam de fluxos incompressíveis e compressíveis simples a reações químicas e interações estrutura-fluido. Além disso, mais de 170 utilitários estão disponíveis para geração de malha, pré e pós-processamento.

A popularidade do OpenFOAM para várias aplicações está crescendo rapidamente. Nos últimos anos, os usuários do OpenFOAM em todo o mundo publicaram vários estudos notáveis nos campos da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) (Robertson et al. [2015]), transferência de calor computacional, interação estrutura-fluido e fluxo multifásico. Os estudos têm se concentrado em uma ampla gama de áreas de aplicação, como modelagem da camada limite atmosférica para estudos de turbinas eólicas, modelagem de combustão de propulsores e ignição por *spray* de motores diesel, turbomáquinas e difusores industriais, cavitação no fluxo em torno de um casco submarino e fluxo 2D em torno de um convés de ponte (para citar alguns). Os leitores são encaminhados para Choudhury [2014] para revisão e referências detalhadas.

4.2 TÉCNICAS NUMÉRICAS

- **Discretização**

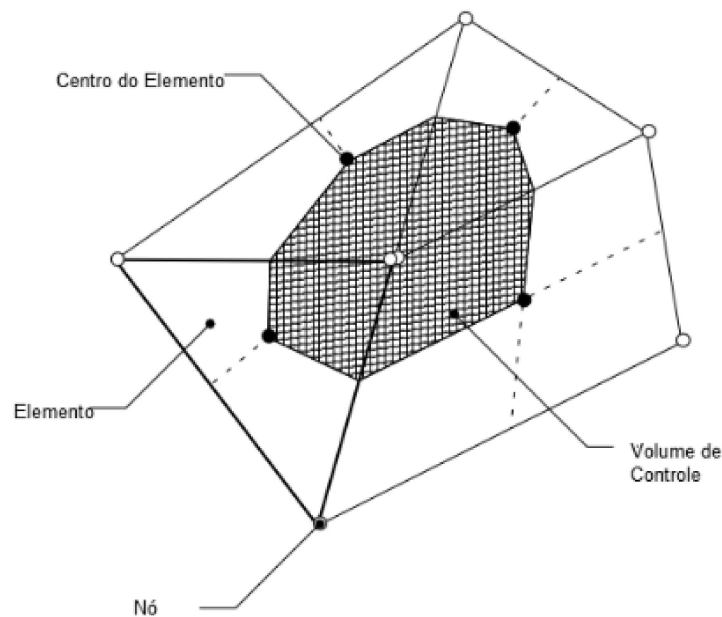
A transformação das equações diferenciais do meio contínuo em um sistema discreto de equações algébricas (equações discretizadas) é feito, no programa referido na seção 4.1, pelo método dos volumes finitos (MVF). Tal método (*Finite Volume Method*) foi introduzido na década de 1970 por McDonald, MacCormack e Paullay e historicamente tem sido o método preferido pelos cientistas e engenheiros que trabalham com a mecânica de fluidos.

Uma importante propriedade do MVF é que os princípios de conservação (massa, momento e energia), que são a base da modelagem matemática para a mecânica

do contínuo, por definição, são respeitadas pelas equações deduzidas por método de volumes finitos. O método não se limita somente a problemas de mecânica de fluidos, e, de forma geral, sua discretização envolve os seguintes passos:

- decomposição do domínio em volume de controle, como na Figura 30, onde a variável de interesse fica situada no seu centroide;
- formulação das equações integrais de conservação para cada volume de controle;
- aproximação numérica das integrais para cada volume de controle. Nesta etapa, as integrais no volume de controle são transformadas, pelo Teorema da Divergência, em informações nas faces do volume;
- aproximação dos valores das variáveis nas faces e as derivadas com a informação das variáveis nodais (diferença central);
- montagem e solução do sistema algébrico obtido.

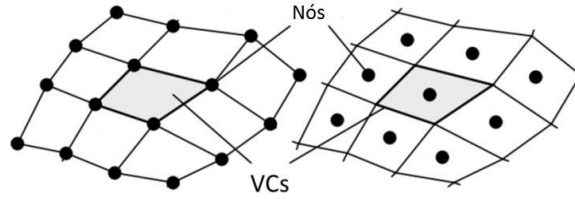
Figura 30 – Definição de volume de controle. (Fonte: Rezende [2009]).



O ponto de partida do método de volumes finitos é a decomposição do domínio em pequenos volumes de controle (VCs), onde as variáveis vão alojar os nós. Usualmente, os volumes de controle e os nós são definidos com uma grade numérica, a malha. Os nós, onde se guardam as variáveis a serem resolvidas, se localizam nos vértices desta malha ou nos centros dos volumes (Figura 31), e é a referência com a que se conta para aproximar a solução no resto do domínio.

Depois de ter definido os VCs, as equações de conservação são descritas em sua forma integral para cada volume. Neste processo, o teorema da divergência de Gauss é

Figura 31 – Nós nos vértices dos VCs (esquerda) e nós nos centros dos VCs (direita) para uma malha quadrilátera. Retirada de <https://esss.co/blog/o-metodo-de-volumes-finitos/>.



usado para converter integrais de volume sobre operadores de divergência e gradiente às integrais de superfície. Por exemplo, a equação de transporte geral.

$$\left[\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_p} \Phi dV}_{\text{tempo}} + \underbrace{\int_{V_p} \nabla \cdot (\vec{U}\phi) dV}_{\text{divergente}} - \underbrace{\int_{V_p} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \Phi) dV}_{\text{Laplaciano}} \right] = \text{FONTE} \quad (4.1)$$

ou

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (4.2)$$

Sendo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \mathbf{v} \phi \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (4.3)$$

onde ϕ é a variável transportada através de um meio de densidade ρ e constante de difusão Γ que se move a uma velocidade V com um termo fonte S_ϕ . Para obtenção final do sistema algébrico de equações, as integrais são aproximadas, as volumétricas fazem um cálculo simples baseado nas variáveis nodais, as superficiais são aproximadas pelos balanços através das faces dos VCs. Neste processo, as aproximações das variáveis nas faces e dos gradientes são feitas em função das variáveis nodais:

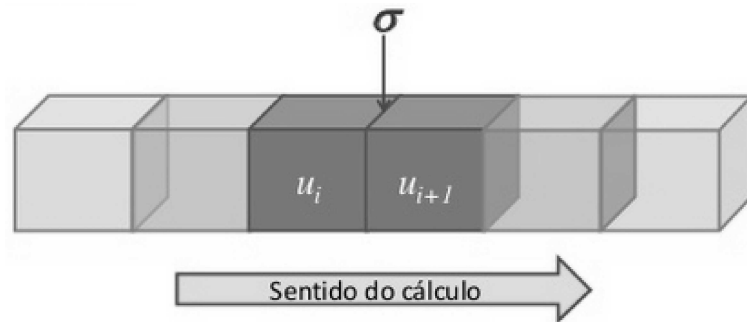
$$V_{cen} \cdot \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \mathbf{V}_f \phi_f \cdot \mathbf{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_f \nabla \phi_f \cdot \mathbf{A}_f + S_\phi \cdot V_{célula} \quad (4.4)$$

Finalmente, o sistema de equações é resolvido através de métodos segregados ou acoplados. Um aspecto fundamental nos algoritmos de solução é o processo de investimento de matrizes onde diversas técnicas têm sido desenvolvidas para aumentar a eficiência do uso de recursos computacionais e a velocidade da obtenção de resultados.

- **Tratamento do termo convectivo - Esquema *upwind***

Upstream ou *upwind* é uma escolha clássica para as equações de transporte, que pode ser entendida, do ponto de vista mecânico, como a escolha da "informação prévia" com relação à localização da borda σ , comum entre dois volumes de controle. A Figura 32 representa essa ideia.

Figura 32 – Esquema *upwind*. Retirada de <https://slideshare.net/edpackness/cfd-aula-3>.



O desenvolvimento de métodos numéricos para aproximar termos convectivos (em geral não lineares) em EDP de caráter predominantemente convectivo tem sido assunto de intensas pesquisas nos últimos anos. No processo de solução numérica dessas equações, a precisão dos resultados é, significativamente, afetada pela escolha do esquema de convecção (*upwind*). Por exemplo, esquemas de primeira ordem, tais como FOU (*First Order Upwind*), são estáveis incondicionalmente, mas produzem um caráter difusivo que, em geral, suaviza a solução. Aproximações *upwind* clássicas de alta ordem, tais como QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics*), SOU (*Second Order Upwind*) e CENTRAL, são boas estratégias para melhorar a precisão do método numérico, porém, estas introduzem oscilações não físicas que comprometem a convergência.

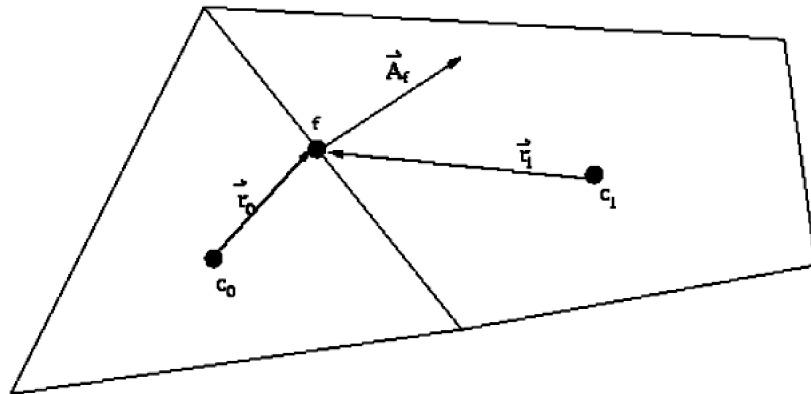
O esquema *upwind* (Patankar [1980]) é baseado no fato de que as variáveis transportadas são convectadas na direção do escoamento, ou seja, o valor da face ϕ_f é influenciado pela quantidade ϕ_{up} da célula que está a montante, relativo à direção da velocidade principal do escoamento, ou seja:

$$\phi_f = \phi_{c0} + \beta(\nabla\phi \cdot \vec{r})_{up} \quad (4.5)$$

onde ϕ é a quantidade transportada, $c0$ refere-se a célula central, *up* é o elemento a montante (*upwind*) da face, \vec{r} é o vetor de *up* até *ip*. A Figura 33 mostra melhor estas definições.

O segundo termo do lado direito da equação 4.5 é uma correção numérica da convecção e pode ser visto como uma correção anti-difusiva aplicada ao esquema de *upwind*.

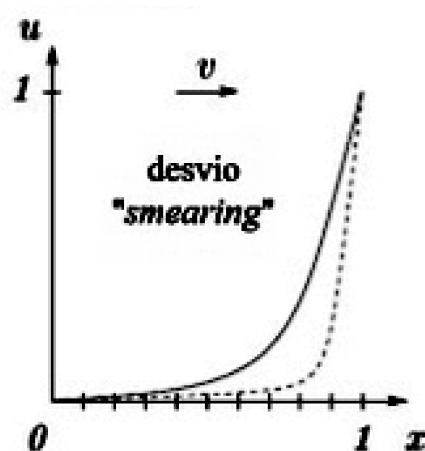
Figura 33 – Volume de controle para a definição da equação de transporte. (Fonte: adaptado de Rezende [2009]).



Na expressão 4.5, β pode ser entendida como uma variável de interpolação. O seu valor define o esquema a ser adotado. Para $\beta = 0$, tem-se o esquema de primeira ordem; para $\beta = 1$, tem-se esquemas linear de segunda ordem. Este último esquema *upwind* é o padrão do OpenFOAM e foi o empregado na pesquisa.

Na Figura 34 tem-se um gráfico que representa a solução de um termo convectivo através do esquema *upwind* (linha contínua), em comparação com a solução exata (linha tracejada). Percebe-se que o esquema *upwind* não apresenta oscilações em sua solução, o que é uma vantagem. Contudo, se não forem usados parâmetros corretos na sua utilização, o desvio da solução exata aumenta e sua precisão diminui. Outro detalhe é que a aproximação é feita sempre sobre a curva da solução exata.

Figura 34 – Solução *upwind* versus solução exata. Retirada de <https://slideshare.net/edpackness/cfd-aula-3>.



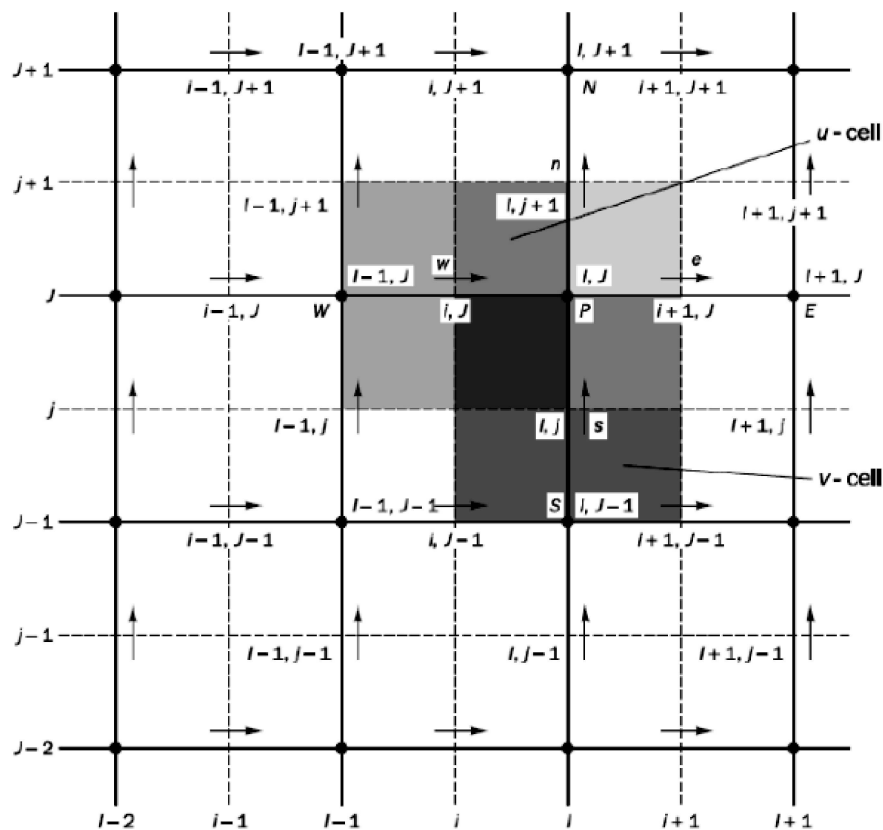
- **Acoplamento pressão velocidade**

As equações 3.2 e 3.3 são intrinsecamente acopladas pois cada componente de velocidade aparece em cada equação de quantidade de movimento e também na de

continuidade. A questão mais complexa para se resolver é o papel desempenhado pela pressão, que só aparece nas equações de conservação de quantidade de movimento. Para o caso de escoamentos incompressíveis, não há nenhuma outra equação adicional. Para o acoplamento de pressão e velocidade, há um algoritmo proposto por Patankar [1980] denominado SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*). A ideia básica deste autor é propor uma malha escalonada para pressão e velocidade e evitar o problema denominado por muitos autores (Versteeg and Malalasekera [2007]) de tabuleiro de xadrez. Desta forma, pressão e velocidades são calculados em pontos distintos da malha.

A Figura 35 mostra uma malha escalonada, a título de ilustração. As variáveis de pressão ficam estocadas nos nós cheios, enquanto as velocidades são definidas nas faces das células entre nós e são indicadas por setas.

Figura 35 – Malha escalonada. (Fonte: adaptado de Versteeg and Malalasekera [2007]).



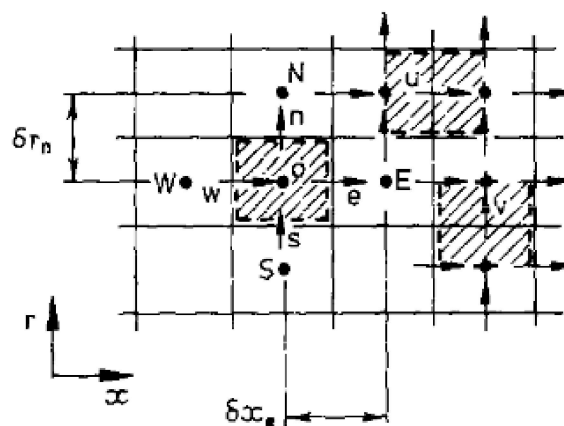
Não é o objetivo aqui detalhar esta técnica, mas vale ressaltar que o algoritmo proposto inicia-se por uma estimativa dos campos de pressão e velocidade. Correções são feitas iterativamente, até que o campo de velocidade obtido obedeça à equação de continuidade 3.3 discretizada e todas as quantidades são conservadas no interior dos volumes de controle.

Outro método é citado para lidar com o acoplamento pressão-velocidade das equações de fluxo de fluido implicitamente discretizadas através da divisão de operações. O método baseia-se no uso de pressão e velocidade como variáveis dependentes e, portanto, é aplicável às versões compressível e incompressível das equações de transporte. O mesmo se encontra descrito nos parágrafos seguintes.

O método não iterativo proposto por Issa [1986] denominado PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) utiliza a divisão de operações na solução discretizada do momento e das equações de pressão, de modo que os campos obtidos em cada etapa do tempo sejam aproximações da solução exata das equações diferenciais, com uma ordem formal de precisão da ordem de potências de δ_t (passo de tempo). Em virtude disso, é possível dispensar a iteração, resultando em um esquema implícito eficiente, mantendo a simplicidade da implementação em relação aos métodos simultâneos de "blocos" contemporâneos. Além disso, evitar as iterações resulta em uma redução substancial no esforço de computação em relação ao exigido pelos métodos iterativos. Portanto, em princípio, o PISO deve ser eficiente para cálculos dependentes do tempo, uma vez que a iteração é descartada sem pagar a penalidade de ter que reduzir δ_t para reduzir os erros de divisão. Ao mesmo tempo, devido à capacidade de lidar com δ_t grandes, o método também deve ser útil para aplicações que enfrentam problemas em estado estacionário. Mesmo assim, o algoritmo PISO não é vantajoso sobre o algoritmo SIMPLE em soluções de escoamentos em regime permanente, mas em geral é mais eficiente para escoamentos em regime transiente.

A seguir, é apresentada na Figura 36 a incorporação da metodologia PISO em um procedimento de volume finito. O esquema emprega uma grade escalonada para o armazenamento de velocidade e pressão e usa diferenciação inversa (*backward*) para a representação das variações temporais (isto é, o esquema implícito de Euler).

Figura 36 – Volumes de controle para escalares e velocidades. (Fonte: Issa et al. [1986]).



Por fim, será mencionado o algoritmo PIMPLE, que é uma combinação dos dois

acima descritos, PISO e SIMPLE. A maioria das aplicações de dinâmica de fluidos no OpenFOAM usa um dos três solucionadores (PISO, SIMPLE ou PIMPLE). Esses algoritmos são procedimentos para o acoplamento de equações para momento e conservação de massa, onde, PISO e PIMPLE são usados para problemas transitórios e SIMPLE para estado estacionário. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo PIMPLE, por ser o mais versátil entre os aqui descritos.

Dentro de cada instante de tempo, ou etapa (passo) da solução, ambos os algoritmos resolvem uma equação de pressão, para reforçar a conservação da massa, com uma correção explícita da velocidade para satisfazer a conservação do momento. Opcionalmente, eles começam cada etapa resolvendo a equação do momento - o chamado preditor de momento. Mesmo que todos os algoritmos resolvam as mesmas equações de governo (embora de formas diferentes), os algoritmos diferem principalmente na forma como fazem o *loop* sobre as equações.

A melhor maneira de pensar sobre o algoritmo PIMPLE é imaginá-lo como um algoritmo SIMPLE para cada etapa do tempo, onde os corretores externos são as iterações e, uma vez convergidos, passará para a próxima etapa até a solução ser concluída. É obtida uma melhor estabilidade do PIMPLE sobre o PISO por esse motivo, especialmente ao lidar com grandes intervalos de tempo (δ_t) em que o número máximo de Courant pode estar consistentemente acima de 1 ou quando a natureza da solução é inerentemente instável.

5 EXEMPLOS E RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os exemplos e os resultados obtidos empregando-se a CFD a alguns casos de estudo, visando a obtenção de parâmetros aerodinâmicos que caracterizam tais hélices.

Primeiramente, mostram-se os casos que serão analisados e a metodologia utilizada para as análises. Um estudo sobre a influência dos modelos de turbulência adotados é apresentado. Além disso, outro estudo acerca de refinamento de malha é também mostrado. Nestes, o vento de incidência (quando ocorre) é frontal, como é feito usualmente na literatura.

Por fim, apresentam-se os resultados obtidos com a modelagem e técnicas numéricas descritas nos capítulos 3 e 4. Em alguns resultados é apresentado o empuxo e o torque das hélices, e em outros, parâmetros relacionados a eficiência das mesmas.

5.1 METODOLOGIA

O processo de criação e execução de todas as simulações pode ser dividido pelas seguintes etapas:

- Inicialmente, faz-se necessária a obtenção de dados geométricos acerca das hélices para sua prototipagem. Essas informações ou até mesmo a própria geometria podem ser encontradas em referências, em repositórios de peças 3D (<https://grabcad.com/>) ou através de *scanners* 3D.
- Após isso, por se tratar de uma simulação de caráter rotativo, dois domínios devem ser criados:
 - Domínio 3D rotativo: é modelado como um cilindro a partir da geometria da hélice, com dimensões pouco maiores que o diâmetro da hélice. Tal peça é exportada com o formato *.STEP*, que pode ser importado pelo OpenFOAM (como formato intermediário), para posteriormente ser transformado para formato *.stl*.
 - Domínio 3D estacionário: é modelado também como um cilindro, mas a partir da geometria do domínio rotativo. Suas dimensões são mais avantajadas, porém, ainda seguem um padrão em relação ao diâmetro da hélice. Tal como para o domínio rotativo, no domínio estacionário também se faz necessária a passagem da peça pelo formato *.STEP* para depois ser transformada para formato *.stl*, requisitado pelo *software*.
- No próximo passo tem-se a geração das malhas. Para cada simulação, são geradas duas malhas, sendo uma delas para o domínio rotativo e outra para o estacionário. As

malhas podem ser geradas tanto pelo OpenFOAM, quanto por um software gerador de malha que consiga exportar o arquivo em formato aceito pelo OpenFOAM. Informações mais precisas acerca das malhas serão descritas nas seções correspondentes à cada caso de estudo.

- Feito isso, passa-se para a parte das configurações das simulações. Nesta etapa, são definidas as características de cada caso, como: condições de contorno do problema; modelos de turbulência e seus parâmetros; modelo cinemático para movimento da hélice; tratamento do termo convectivo; acoplamento pressão-velocidade; viscosidade do meio; tempo de simulação; paralelização do código; e outras especificidades que serão descritas no decorrer deste capítulo, se for oportuno.
- Por último têm-se o tratamento dos resultados. Os arquivos de saída das simulações são tração (em N) e torque (em N.m). Com esses resultados podem ser feitas manipulações algébricas através do uso de planilhas eletrônicas para se obter outros parâmetros que sejam de interesse ou usar diretamente os resultados dos arquivos de saída.

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Com o objetivo de validar os modelos das simulações no OpenFOAM, foram realizados estudos para três diferentes tipos de hélices. A primeira se trata de uma hélice de seis pás, a segunda uma hélice APC 14x7 e a terceira uma hélice da turbina eólica NREL 5MW. Os resultados obtidos ora em termos de eficiência, coeficiente de tração e coeficiente de potência, ora em termos de tração (empuxo) e torque foram comparados com os das respectivas referências ou com outros métodos numéricos.

Alguns dos resultados com outros modelos apresentados nesta seção, que foram utilizados para as comparações com os obtidos com a metodologia desta pesquisa, são contribuições das pesquisas de alunos de graduação e de pós graduação da UFJF, a saber:

- As simulações em CFD com o programa Ansys CFX e o modelo de interface *frozen rotor* foram realizadas pelo aluno Nicolas Lima de Oliveira do PGMG no âmbito de seu projeto de doutoramento intitulado "Otimização Multiobjetivo de Hélices baseada no Grupo Motopropulsor e Verificação em CFD e MEF".

Faz-se, nesta etapa do texto, uma breve descrição da técnica *frozen rotor* que é a empregada no código Ansys para o tratamento das informações nas interfaces dos domínios rotativo e estacionário. Esta técnica não leva em consideração o movimento relativo de uma zona móvel em relação às zonas adjacentes (que podem ser móveis ou estacionárias); a malha permanece fixa para a computação. Em outras palavras, é semelhante ao congelamento do movimento da parte móvel em uma posição específica

e à observação do campo de fluxo instantâneo com o rotor nesta posição. Portanto, ao contrário da técnica empregada nesta pesquisa, o *frozen rotor* considera o movimento em regime permanente e estacionário (*steady state*), que independente do tempo de simulação (Fluent [2009]).

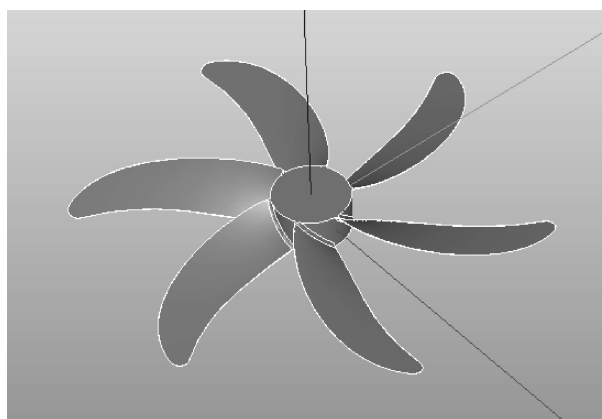
- As simulações realizadas com programa QPROP estão relacionadas ao projeto de pesquisa "Estudo e dimensionamento de hélices" do aluno de iniciação científica Rafael Grande Pancini Delmonte, do curso de graduação em Engenharia Mecânica e membro da equipe Microraptor-Aerodesign ¹. O programa QPROP é um código livre desenvolvido pelo Prof Mark Drela do MIT e emprega a metodologia BEMT descrita na seção 1.2.1.

Ao final de cada estudo específico, quando pertinente, há comentários particulares para cada caso. No último capítulo faz-se uma análise global dos resultados.

5.2.1 Hélice de seis pás

O primeiro estudo de caso se trata de uma hélice de 6 pás, comumente encontrada em ventiladores domésticos. Nestes equipamentos, na maioria deles encontra-se um seletor de velocidade, com normalmente três diferentes níveis de rotação. Um detalhe que é necessário ser dito é que, em se tratando de um ventilador doméstico, que geralmente se encontra em lugares sem incidência de vento, o mesmo foi modelado desta maneira. Na Figura 37 pode-se observar o modelo geométrico desta hélice.

Figura 37 – Geometria da hélice de seis pás.



As características geométricas mais importantes e as condições de operação são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2. Para este estudo de caso, o número de Reynolds é definido pela velocidade de rotação (ω) e pela corda (c) a 75% do comprimento da pá (r). O número de Reynolds é definido como:

¹ Equipe de estudantes da Engenharia da UFJF que elaboram projetos voltados para a competição de Aerodesign da SAE.

$$Re = \frac{2\pi\omega(0.75r)c}{\nu} \quad (5.1)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido (ar a 20°C).

Tabela 1 – Parâmetros geométricos.

Especificações	Valores
Velocidades de rotação (rpm)	1170 1270 1370
Diâmetro do rotor D (m)	0,44m
Diâmetro do flange do <i>hub</i> (m)	0.066m
Comprimento da pá (m)	0,4
Ângulo de curvatura (graus)	73,3

Tabela 2 – Condições de operação.

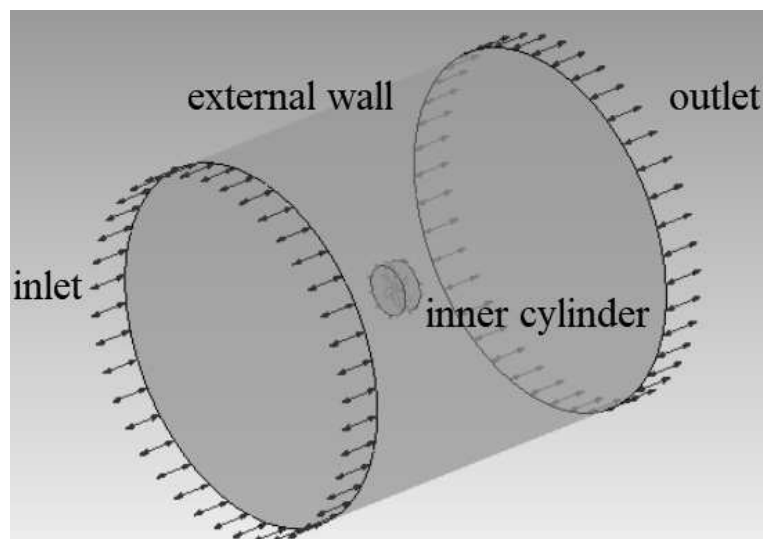
Velocidades de rotação (rpm)	Número de Reynolds
1170	51.749
1270	56.172
1370	60.595

Um aspecto importante de ser observado aqui são os valores para o número de Reynolds, tendo em vista que esse parâmetro indica o regime do fluxo. Fluxos com número de Reynolds abaixo de 10^5 são categorizados como baixo nível de turbulência. Dentro desse regime, há predominância de um gradiente forte e adverso no campo de pressão (Miley [1982]). Por esse motivo, justifica-se a necessidade da utilização de modelos de turbulência.

A Figura 38 apresenta a geometria do domínio computacional do problema. Nela, pode-se perceber a presença de dois cilindros, um interno ao outro. O cilindro interno é a fronteira do domínio rotativo, é chamado de rotor e engloba a superfície da hélice. Já o cilindro externo, que é composto pelo *inlet* (face frontal), *outlet* (face oposta ao *inlet*) e uma parede, é chamado de estator, e é a fronteira do domínio estático. Suas dimensões seguem o estudo de Kutty and Rajendran [2017], onde é considerado D como o diâmetro da hélice, e são mostradas a seguir:

- diâmetro cilindro interno $D_i = 1,1D$
- altura cilindro interno $h = 0,4D$
- diâmetro cilindro externo $D_e = 8D$
- altura cilindro externo $H = 8D$

Figura 38 – Geometria domínio computacional.



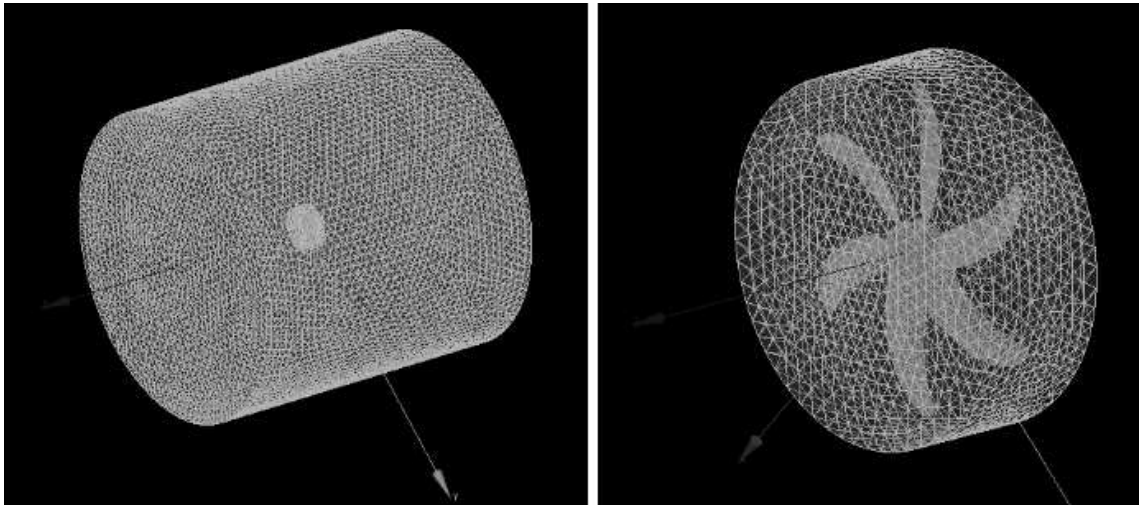
Neste ponto do estudo, para as condições de contorno, algumas informações já podem ser mencionadas sobre as superfícies. A seguir são apresentadas essas informações de forma um pouco mais detalhada.

- Para o *inlet* tem-se sua velocidade prescrita como um caso estático, ou seja, sem vento incidente.
- Para a parede externa e para a superfície da hélice, tem-se uma condição de contorno conhecida como *no slip*, aplicada a paredes com uma condição de não escorregamento (velocidades nulas).
- Para o *outlet* a condição de contorno de Dirichlet foi prescrita para a pressão.
- Para às interfaces comuns aos domínios rotativo e estacionário é aplicada a condição de *cyclicAMI*, a qual informa que o tratamento numérico será feito pelo método AMI e que se trata de um movimento cíclico.

Passando para a geração das malhas, neste caso em específico, foi utilizado um *software* a parte. O mesmo se chama SALOME e é um software livre que fornece uma plataforma genérica para pré e pós-processamento para simulação numérica. Na Figura 39 é mostrada, a esquerda, a malha completa, totalizando 89641 nós e 474382 elementos. À direita, tem-se o detalhe da malha apenas para o domínio rotativo, a qual possui 44484 nós e 254591 elementos.

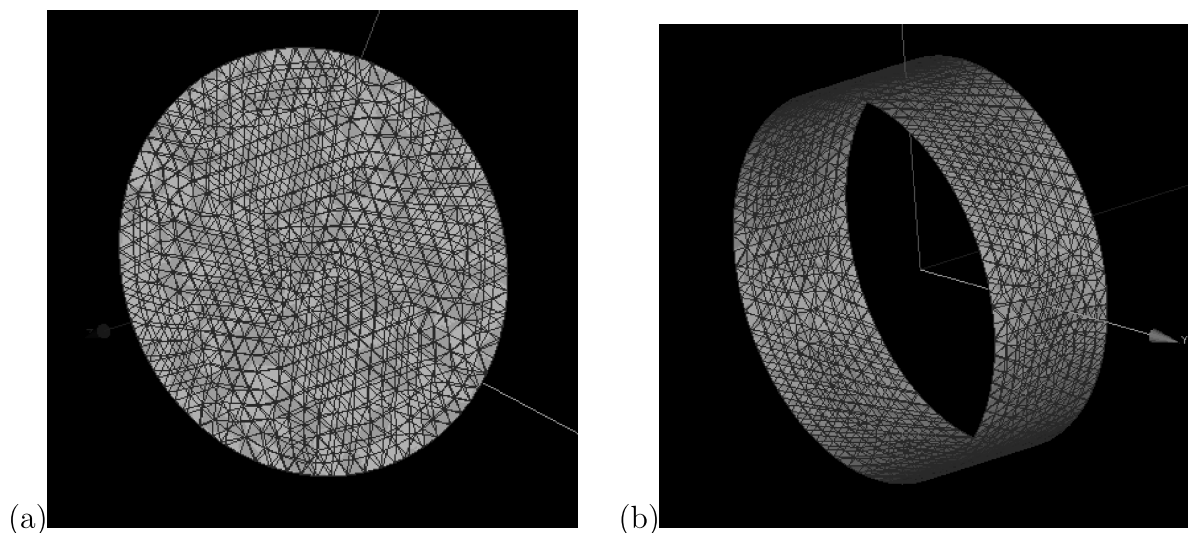
O *inlet* e o *outlet*, na interface entre os dois domínios, têm 996 e 923 elementos respectivamente na superfície do domínio rotativo; e 1056 e 990 elementos na superfície do domínio estacionário. Na superfície lateral que delimita os domínios, existem 1589

Figura 39 – Malha para estudo de caso da hélice de seis pás.



elementos na interface rotativa e 1542 na interface estacionária. Embora esses valores estejam próximos, as malhas não são necessariamente coincidentes. No entanto, a abordagem AMI permite uma melhor troca de informações entre cada malha de maneira consistente. Detalhes sobre malhas na interface são mostradas nas Figuras 40 (a) e (b). É interessante perceber pelas imagens o fato da malha realmente não ser coincidente, visto que existem duas cores, uma da interface estacionária e outra da rotativa, além do detalhe dos nós não estarem sobrepostos, como pode ser observado.

Figura 40 – (a) *Inlet* da interface do rotor. (b) Parede da interface do rotor.



Se tratando agora das configurações da simulação, tem-se a parte da discretização, a qual inclui os esquemas de tempo, esquemas convectivos e solucionadores pressão-velocidade. Além disso, é requisitado qual modelo de turbulência será adotado e alguns parâmetros iniciais referentes à cada modelo.

- Esquemas de tempo

No OpenFOAM, os solucionadores de esquema de tempo geralmente são configurados para simular estado transiente ou estado estacionário. Alterar o esquema de tempo de um estado estacionário para transiente, ou vice-versa, não afeta a natureza fundamental do solucionador e, portanto, não falha em atingir seu objetivo, produzindo uma solução sem sentido. Algumas possibilidades no *software* são Euler, steadyState, backward, CrankNicolson e localEuler, cada uma com suas próprias características. Neste trabalho, Euler foi usado para casos em que o modelo de turbulência era $k-\omega$ SST e CrankNicolson para casos em que o modelo de turbulência era $k-\epsilon$. Aqui estão algumas informações sobre eles:

- Euler: transiente, de primeira ordem implícito, limitado;
- CrankNicolson: transiente, de segunda ordem implícito, limitado; requer um coeficiente descentralizado ψ em que:

$$\psi = \begin{cases} 1 & \text{corresponde a puro CrankNicolson,} \\ 0 & \text{corresponde a Euler;} \end{cases} \quad (5.2)$$

onde geralmente $\psi = 0.9$ é usado para vincular/estabilizar o esquema para problemas práticos de engenharia. Esse foi o valor adotado neste trabalho.

Qualquer segundo termo derivado ($\partial^2/\partial t^2$) é especificado no sub-dicionário *d2dt2Schemes*. Somente o esquema de Euler está disponível para *d2dt2Schemes*.

Foi utilizado um esquema adaptativo, ou seja, um esquema que ajusta o intervalo de tempo a cada instante para sempre trabalhar dentro dos limites de um número de Courant predeterminado. Embora o esquema seja adaptável, o tempo decorrido durante toda a simulação ficou sempre mantido em torno de (1×10^{-5}). Por ser uma simulação cara/custosa (tempo de processamento de 200 horas em média), um cluster foi usado para simular todos os casos. Cada caso rodou em uma máquina, com as mesmas especificações, CPU Intel Xeon modelo E5620 com 16 núcleos *hyperthreading*, 250 GB de RAM e sistema operacional Linux Ubuntu.

- Esquemas convectivos

O tratamento de termos advectivos é um dos principais desafios em códigos numéricos de CFD e, portanto, as opções são mais amplas. No OpenFOAM, o identificador de palavra-chave para os termos advectivos geralmente tem a forma $\text{div}(\text{phi}, \dots)$, onde phi geralmente denota o fluxo (volumétrico) de velocidade nas faces da célula para fluxos de densidade constante e o fluxo de massa para escoamentos compressíveis, por exemplo $\text{div}(\text{phi}, U)$ para advecção de velocidade, $\text{div}(\text{phi}, e)$ para advecção de energia interna, $\text{div}(\text{phi}, k)$ para energia cinética turbulenta, etc. Os esquemas são todos baseados na integração de Gauss, usando o fluxo phi e o campo advectado

sendo interpolado nas faces da célula por um dos esquemas a ser selecionado, por exemplo linear, linearUpwind, etc. Existe uma abundante variação de esquemas de discretização. Neste trabalho, foram utilizados os seguintes métodos:

- linear: segunda ordem, ilimitado;
 - linearUpwind: segunda ordem, tendencioso para o upwind, sem limites (mas muito menos que linear), requer a discretização do gradiente de velocidade a ser especificado;
 - upwind: de primeira ordem, geralmente impreciso demais para ser recomendado.
- Solucionadores pressão velocidade

A discretização da equação do momento, abordada em capítulos anteriores, se torna:

$$a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p A \cdot \hat{i} + S \quad (5.3)$$

onde o subscrito nb se refere ao vizinho da célula p ; a_p e a_{nb} são coeficientes linearizados para o campo de velocidade u ; S o termo fonte; A a área da face.

Existem questões importantes com relação ao armazenamento de pressão e à discretização do termo gradiente de pressão, uma vez que os campos velocidade e pressão são desconhecidos. Para fazer isso, o OpenFOAM usa o algoritmo PIMPLE segregado. Esse algoritmo, como já explicado anteriormente, é uma combinação do PISO e do SIMPLE. Todos esses algoritmos são solucionadores iterativos, mas PISO e PIMPLE são usados para casos transientes, enquanto SIMPLE é usado para casos em estado estacionário. As características principais desse algoritmo são as malhas segregadas para armazenar pressões e velocidades.

- Modelos de turbulência

Foram usados dois modelos de turbulência ($k-\epsilon$ e $k-\omega$ SST) para este caso. Tais modelos já foram descritos em subseções do capítulo 3, sendo necessário neste ponto do estudo apenas a apresentação dos cálculos das condições iniciais para k e ϵ de um modelo, e k e ω do outro. Além disso, têm-se também o cálculo de outra variável imprescindível para o correto funcionamento das simulações, a viscosidade turbulenta (ν_t). Ela é responsável por relacionar as duas variáveis de cada modelo de turbulência e caracteriza como se dará a turbulência do escoamento. A inicialização dessas variáveis é descrita a seguir.

- $k-\epsilon$

*

$$k = \frac{3}{2} (I |\mathbf{u}_{ref}|)^2 \quad (5.4)$$

onde I é a intensidade turbulenta [%] (valor típico adotado para casos de escoamentos como esse é de 1%, devido a esse motivo, tal valor foi utilizado); u_{ref} é a velocidade do fluxo de referência [m/s] (devido a velocidade do fluxo para este estudo ser nula, funções de parede próprias do *software* OpenFOAM foram necessárias para este caso).

$$* \quad \epsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{L} \quad (5.5)$$

onde C_μ é uma constante do modelo de valor igual a 0,09 por padrão; L um comprimento de referência [m] (para hélices esse valor adotado é o seu diâmetro).

$$* \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5.6)$$

onde C_μ é o mesmo coeficiente acima mencionado; ν_t é a viscosidade turbulenta [m^2/s].

– k- ω SST

$$* \quad k = \frac{3}{2} (I |\mathbf{u}_{ref}|)^2 \quad (5.7)$$

onde I é a intensidade turbulenta [%] (valor típico adotado para casos de escoamentos como esse é de 1%, devido a esse motivo, tal valor foi utilizado); u_{ref} é a velocidade do fluxo de referência [m/s] (devido a velocidade do fluxo para este estudo ser nula, funções de parede próprias do *software* OpenFOAM foram necessárias para este caso).

$$* \quad \omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu L} \quad (5.8)$$

onde C_μ é a mesma constante de valor igual a 0,09 do outro modelo de turbulência; L um comprimento de referência [m] (para hélices esse valor adotado é o seu diâmetro).

$$* \quad \nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (5.9)$$

onde ν_t é a viscosidade turbulenta [m^2/s].

Por fim, têm-se a etapa de análise dos resultados obtidos com as simulações, que será dividida em duas partes. Os resultados que foram usados para fim de comparação são do estudo de Nicolas, e pelo fato destes resultados terem sido obtidos por um outro programa (Ansys), daqui em diante serão mencionados apenas o nome do *software* que gerou os dados de saída. Na primeira parte, é realizada uma comparação entre os resultados obtidos com o

modelo de turbulência $k-\epsilon$ e $k-\omega$ SST. Na segunda, é apresentada uma análise comparativa do desempenho de modelos para domínios rotativos.

- Modelos de turbulência

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados de empuxo e torque obtidos com as simulações de Ansys e OpenFOAM, respectivamente. O modelo de turbulência também é relatado.

Conforme descrito em capítulos anteriores, o modelo $k-\omega$ SST tende a ser mais robusto e preciso. Dito isso, nas duas últimas colunas, nomeados de *Diferença empuxo %* e *Diferença torque %*, são a diferença percentual de $k-\epsilon$ para $k-\omega$ SST. O sinal de menos significa que os valores previstos no modelo ϵ são maiores que no modelo ω SST. A fim de comparação, na Figura 41 pode-se observar como cada modelo de turbulência trabalha até chegar ao resultado esperado. Esses resultados se referem às simulações do OpenFOAM para a velocidade de rotação de 1170rpm. É interessante perceber que enquanto não ocorre a estabilização os dois modelos funcionam de forma completamente distinta, contudo estabilizam em valores muito próximos.

Tabela 3 – Empuxo(T) e torque(Q) - Resultados do Ansys.

Velocidade de rotação (rpm)	T(N) Q(Nm)		T(N) Q(Nm)		Dif. % empuxo	Dif. % torque
	$k-\epsilon$		$k-\omega$ SST			
1170	1.53	0.063	1.55	0.058	1,29	-8.62
1270	1.80	0.074	1.83	0.068	1.64	-8.82
1370	2.09	0.086	2.13	0.079	1.88	-8.86

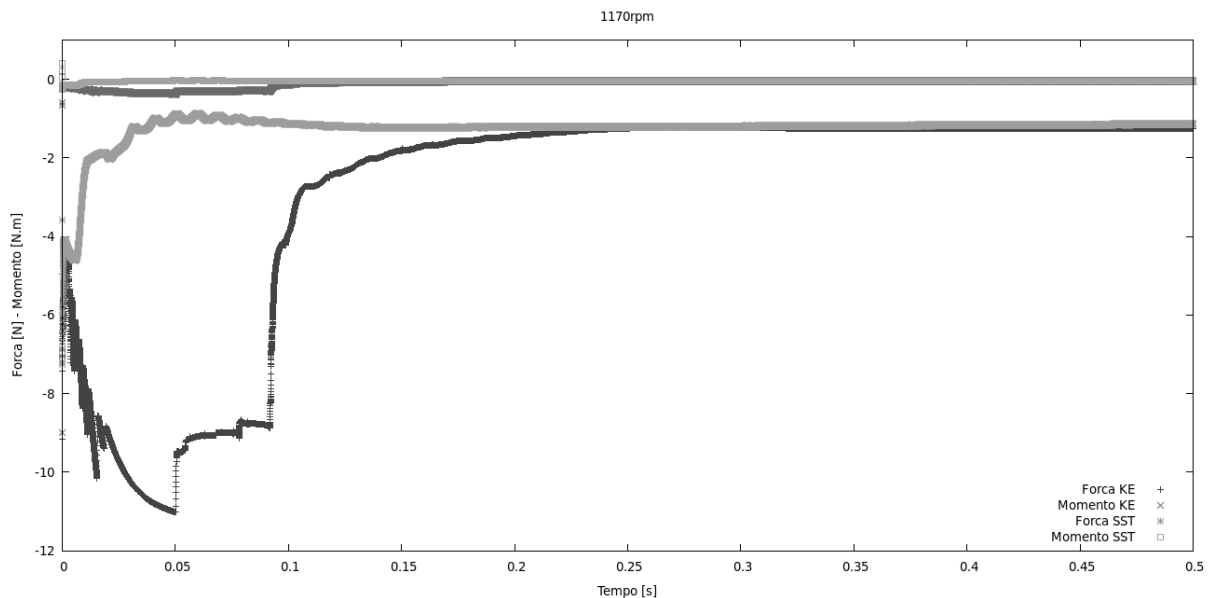
Tabela 4 – Empuxo(T) e torque(Q) - Resultados do OpenFOAM.

Velocidade de rotação (rpm)	T(N) Q(Nm)		T(N) Q(Nm)		Dif. % empuxo	Dif. % torque
	$k-\epsilon$		$k-\omega$ SST			
1170	1.23	0.044	1.31	0.0478	6.10	6.38
1270	1.61	0.059	1.54	0.056	-4.54	-5.35
1370	1.97	0.071	1.79	0.065	-10.05	-9.23

Antes de conduzir a análise sobre esses resultados, os leitores devem ter em mente que os códigos empregados para solucionar a troca de informações entre o domínio rotativo e o estacionário em cada análise, que geraram os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, eram bastante diferentes. Ansys empregou uma técnica para as interfaces denominada *frozen rotor*, sem considerar os efeitos transientes. Por outro lado, OpenFOAM empregou uma análise transiente. A diferença entre as duas técnicas será investigada posteriormente.

A Tabela 3, Ansys, mostra uma ligeira variação nos valores de empuxo. A diferença no torque atinge quase -9%. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que

Figura 41 – Gráfico empuxo/torque OpenFOAM 1170rpm.



ϵ falha ao prever o ponto de separação e, portanto, falha na previsão da distribuição da força resultante ao longo da pá.

Por outro lado, a diferença de empuxo mostrada na Tabela 4 é mais acentuada e atinge um máximo de -10% em sua maior velocidade de rotação. Já o torque tem sua diferença atenuada. Novamente, a diferença nos dois resultados é atribuída à fraqueza do modelo ϵ para prever a distribuição de pressão ao redor das pás.

Na maioria dos casos, o modelo ϵ superestima os parâmetros aerodinâmicos. Conforme relatado na seção teórica sobre modelos de turbulência, o modelo $k-\omega$ SST foi desenvolvido para resolver fluxos com fortes gradientes de pressão adversa, pois o modelo $k-\epsilon$ não conseguia capturar o comportamento adequado de camadas limite turbulentas até a separação (Wilcox et al. [1998]). Este é o caso relatado aqui, onde o número de Reynolds indicado na Tabela 2 está abaixo de 10^5 , indicando uma predominância de um gradiente forte e adverso no campo de pressão (Miley [1982]).

- Modelos para domínio rotativo

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos com a técnica de *frozen rotor* (Ansys) e a técnica AMI (OpenFOAM), para o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Da mesma forma, a Tabela 6 retrata os resultados para o modelo de turbulência $k-\omega$ SST.

Como o AMI incorpora os efeitos transientes, foi utilizado como referência nas comparações entre as duas técnicas. Nas duas últimas colunas, nomeadas de *Diferença empuxo %* e *Diferença torque %*, são a diferença percentual do *frozen rotor* para a

AMI. O sinal de menos significa que os valores previstos com a técnica de *frozen rotor* são maiores do que com o AMI.

Tabela 5 – Empuxo(T) e torque(Q) - Resultados do modelo k- ϵ .

Velocidade de rotação (rpm)		T(N)	Q(Nm)		T(N)	Q(Nm)	Dif. % Empuxo	Dif. % Torque
1170	Ansys	1.53	0.063	Open	1.23	0.044	-24.39	-43.18
1270		1.80	0.074	FOAM	1.61	0.059	-11.80	-25.42
1370		2.09	0.086		1.97	0.071	-6.09	-21.13

Tabela 6 – Empuxo(T) e torque(Q) - Results do modelo k- ω SST.

Velocidade de rotação (rpm)		T(N)	Q(Nm)		T(N)	Q(Nm)	Dif. % Empuxo	Dif. % Torque
1170	Ansys	1.55	0.058	Open	1.31	0.0478	-18.32	-23.40
1270		1.83	0.068	FOAM	1.54	0.056	-18.83	-21.43
1370		2.13	0.079		1.79	0.065	-19.00	-21.54

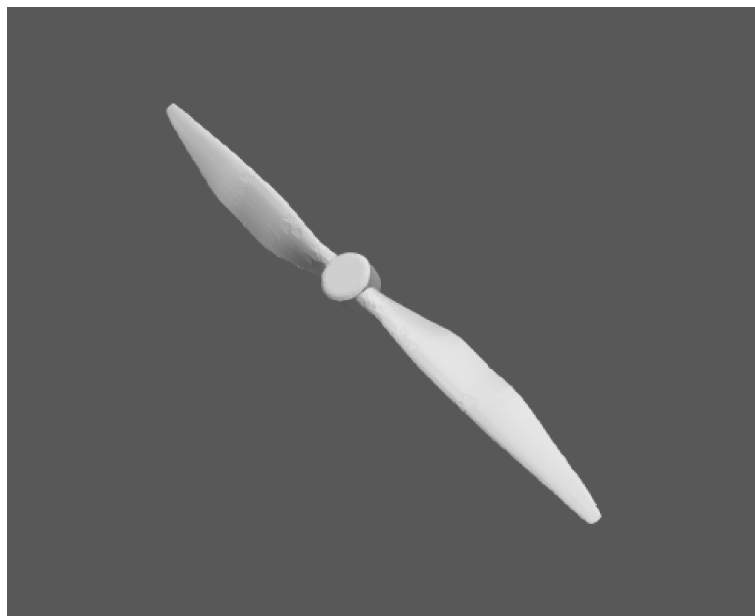
A diferença observada para k- ϵ na Tabela 5 é a mais alta observada entre todos os resultados e atinge os valores máximos de $-24,39\%$ para comparação de empuxo e $-43,18\%$ para comparação de torque usando a análise k- ϵ . Esses valores foram observados para o menor valor do número de Reynolds (velocidade rotacional mínima). Reforça-se a fraqueza do modelo k- ϵ nessa situação.

Além da diferença observada em relação aos modelos de turbulência, analisada anteriormente, é possível destacar a grande diferença entre as técnicas de *frozen rotor* e AMI. É importante ressaltar que o AMI incorpora efeitos transientes e pode ser entendido como a técnica com maior fidelidade e precisão. Apoiado por esta observação, neste exemplo, o *frozen rotor* superestima os parâmetros aerodinâmicos. Os efeitos transientes foram determinantes para calcular o empuxo e o torque e devem ser levados em consideração nesse tipo de análise.

5.2.2 Hélice APC 14x7

Para esta análise foi selecionada a hélice APC 14x7. Trata-se de uma hélice bipá, ou seja, apenas duas pás, muito utilizada no meio de aerodelismo. Possui perfis variados na sua composição e, conforme já explicado, possui 14" (0,3556m) de diâmetro e um passo fixo de 7" (0,1778m). As simulações para este estudo de caso foram realizadas para velocidade de rotação de 7900 rpm, um valor relativamente alto para este tipo de hélice. No entanto, como seu uso é destinado à equipe de competição de aerodelismo da UFJF, é necessária tal velocidade para melhores resultados. A Figura 42 mostra o modelo geométrico desta hélice.

Figura 42 – Geometria da hélice APC 14x7.



Para obtenção dos coeficientes de potência e de tração procurados para o cálculo da eficiência foram utilizadas as velocidades e seus valores de razão de avanço respectivos. Esses valores são exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Velocidades e razão de avanço para hélice APC 14x7.

Velocidade do fluido (m/s)	Razão de avanço
0	0
2,083	0,04395
4,167	0,08791
6,25	0,13186
8,33	0,17574
10,417	0,21977
12,5	0,26371
14,583	0,30766
16,667	0,35162
18,75	0,39557
20,833	0,43951
22,917	0,48348
25	0,52743

Os valores da Tabela 7 correspondem aos valores em que ocorreram os ensaios experimentais em túnel de vento da hélice APC 14x7. Por se tratarem de muitos ensaios, seria muito custoso para simular todos estes casos, com várias velocidades de incidência, ainda mais pelo fato de haver um estudo de malha, o que ocasionaria o dobro de simulações. Por esse motivo, para as simulações via CFD no OpenFOAM, foram utilizados os valores de velocidade e razão de avanço mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Velocidades e razão de avanço no OpenFOAM.

Velocidade do fluido (m/s)	Razão de avanço
0	0
4,167	0,08791139
8,33	0,1757384
12,5	0,26371308
16,667	0,35162447
20,833	0,43951477
25	0,52742616

Todas simulações para este estudo de caso foram realizadas utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, que se faz necessário pelo fato do número de Reynolds estar em uma faixa de escoamentos turbulentos (por volta de 2×10^5 para maioria dos casos). A geometria do domínio computacional segue a mesma "regra" utilizada pela hélice de seis pás. As dimensões dos domínios (rotativo e estacionário) e algumas condições de contorno para as superfícies e interfaces deste modelo são descritas a seguir:

- Domínio rotativo: cilindro de diâmetro 39,12cm e altura 14,22cm;
- Domínio estacionário: cilindro de diâmetro e altura igual a 284,48cm;
- *Inlet*: velocidade normal à face de entrada do domínio estacionário. Os valores das velocidades incidentes seguem Tabela 8;
- *Outlet*: aplicada uma condição de contorno de gradiente zero para pressão;
- Parede externa e hélice: *no slip wall* foi utilizado nessas faces da geometria. Condição de não escorregamento nas paredes (velocidades nulas);
- Interfaces comuns aos domínios rotativo e estacionário: *cyclicAMI* foi usada, informando que o tratamento numérico será feito via AMI e que possui movimento rotacional.

Passando-se agora para talvez a parte mais importante deste estudo de caso, a geração das malhas, têm-se duas qualidades de malha que foram geradas: uma mais refinada e outra nem tanto. O motivo desta análise é perceber o quão é afetado um resultado com um refino melhor ou pior de determinadas superfícies da malha. Neste caso, o "malhador" utilizado foi o do próprio *software* OpenFOAM. É necessário seu uso quando as geometrias das hélices utilizadas são muito rebuscadas, onde é necessário captar todos os detalhes. Sua utilização é um pouco mais complicada do que quando são usados programas destinados para esse fim, visto que o OpenFOAM não apresenta interface gráfica e todas modificações devem ser feitas através de arquivos no formato (.txt) na linguagem

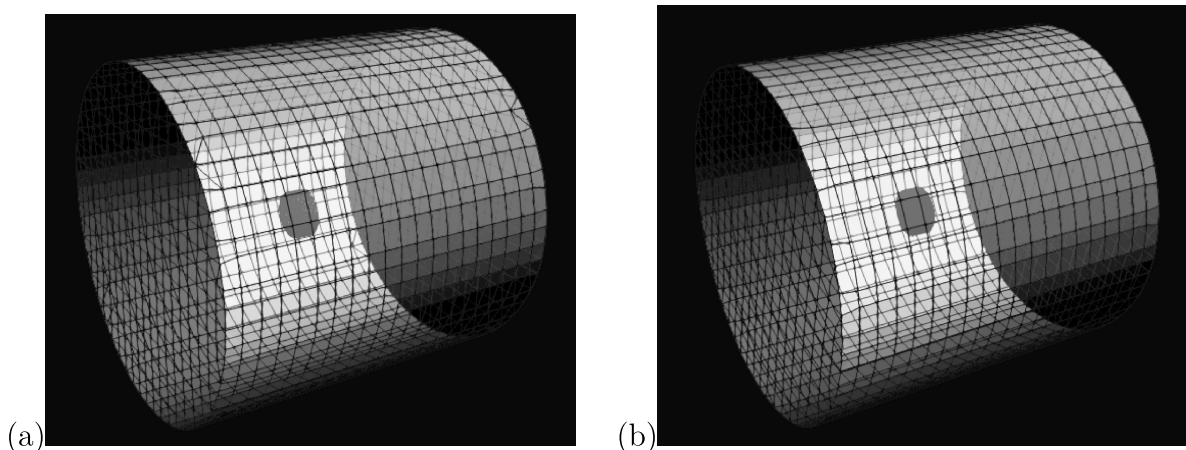
de programação C++. Para visualização das malhas é usado o *software* ParaView, de código aberto, comum em visualizações científicas interativas.

O princípio por trás do "malhador" do OpenFOAM é decompor primeiramente a geometria do domínio em um conjunto de 1 ou mais blocos hexaédricos tridimensionais. As arestas dos blocos podem ser linhas retas, arcos ou *splines*. A malha é ostensivamente especificada como um número de células em cada direção do bloco, informações suficientes para serem gerados os dados da malha. Esta é uma malha inicial (bruta) que ainda passará por um refino especial.

A segunda etapa gera malhas tridimensionais contendo hexaedros (*hex*) e hexaedros divididos (*split-hex*) automaticamente a partir de geometrias de superfície trianguladas ou tri-superfícies, nos formatos Stereolithography (STL) ou Wavefront Object (OBJ). Aproximadamente, o processo se dá conforme o refino iterativo vai ocorrendo sobre a superfície de uma malha inicial (comentada anteriormente) e a posterior transformação da malha hexadecimal (*split-hex*) resultante na superfície. Uma fase opcional reduzirá a malha resultante e inserirá as camadas celulares (*layers*). A especificação do nível de refinamento da malha é muito flexível e o manuseio da superfície é robusto com uma qualidade de malha final pré-especificada. É executado em paralelo com uma etapa de balanceamento de carga a cada iteração.

Nas Figuras 43 (a) e (b) tem-se a comparação entre as malhas completas utilizando dois tipos de refinamentos diferentes. A da esquerda se trata da malha menos refinada, que totaliza 149679 pontos e 268516 células. Já a malha mais robusta, totalizando 479521 pontos e 817046 células, se encontra a direita.

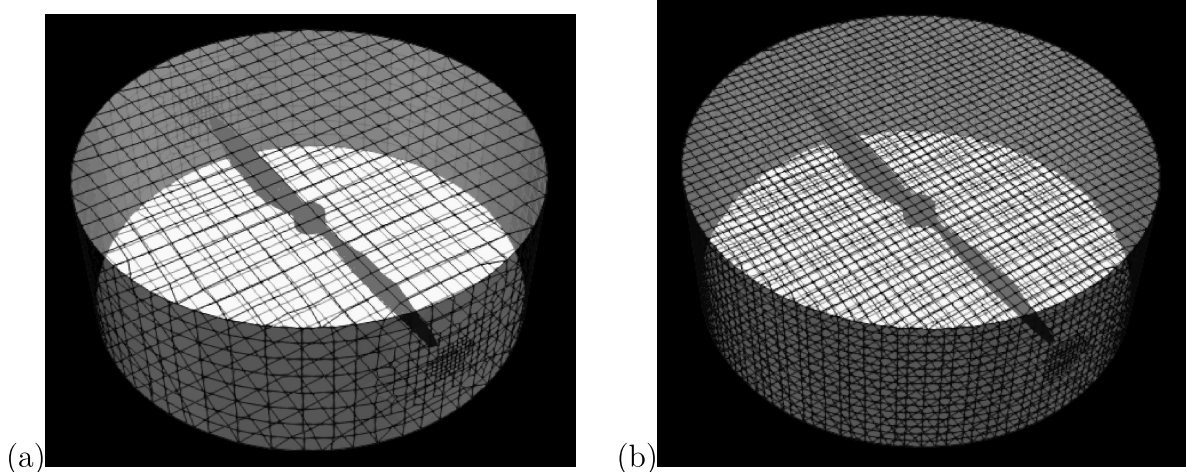
Figura 43 – (a) Malha completa menos refinada. (b) Malha completa mais refinada.



Aparentemente pela Figura 43 não se nota diferença alguma. Isso acontece devido ao fato de que o refino mais intenso ocorre apenas em regiões onde se é realmente necessário esse aumento de qualidade, ou seja, onde de fato ocasionam-se as mudanças no fluxo do escoamento. Na Figura 44 apresentam-se os domínios rotativos, onde já é perceptível a

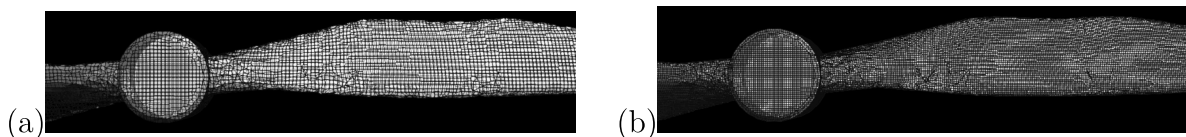
mudança na qualidade das malhas. A imagem de legenda (a) se refere à menos refinada, onde os pontos e células na sua superfície do domínio têm valores respectivos de 15310 e 14596; enquanto a de legenda (b), a mais refinada, possui 57859 pontos e 55471 células em sua superfície.

Figura 44 – (a) Domínio rotativo menos refinado. (b) Domínio rotativo mais refinado.



Contudo, a maior diferença entre as malhas se dá na superfície da hélice, o que é de se esperar, já que ela é o objeto de estudo e análises. Na Figura 45 é possível ver nitidamente a diferença na quantidade de elementos das duas malhas na superfície da APC 14x7.

Figura 45 – (a) Hélice menos refinada. (b) Hélice mais refinada.



Passando para etapa de configurações das simulações, têm-se toda aquela metodologia da abordagem do estudo de caso anterior: esquemas de tempo, esquemas convectivos, solucionadores pressão velocidade e modelos de turbulência. Não será repetida aqui todas as informações que já foram apresentadas. A Tabela 13 mostra resumidamente algumas das configurações mais importantes.

Tabela 9 – Configurações das simulações no OpenFOAM.

Esquema de tempo	Euler; adaptativo
Esquemas convectivos	linear; linearUpwind; upwind
Solucionador pressão velocidade	PIMPLE
Modelo de turbulência	k- ω SST
Paralelização	openMPI

O esquema adaptativo, como já dito, ajuda a manter a simulação trabalhando sempre dentro dos limites de um número de Courant predeterminado; os esquemas *upwind* tratam dos termos advectivos; algoritmo PIMPLE é o mais completo para estes casos; modelo $k-\omega$ SST com as condições iniciais anteriormente descritas; método de computação paralela openMPI para agilizar o processo de simulação.

Ainda não havia sido mencionado o fato da paralelização de códigos. Neste parágrafo, mostra-se brevemente como é feita a execução em paralelo em processadores distribuídos pelo OpenFOAM. O método de computação paralela usado pelo OpenFOAM é conhecido como decomposição do domínio, no qual a geometria e os campos associados a ela são divididos em pedaços e alocados a processadores separados para solução. O processo de computação paralela envolve: decomposição da malha e de campos associados; executar o comando em paralelo; pós-processamento do caso decomposto. A execução paralela usa a implementação openMPI de código aberto do padrão MPI (*Message Passing Interface*), embora outras bibliotecas possam ser usadas.

Estando todos os dados configurados, passa-se para etapa de análise dos resultados obtidos com as simulações. Para este estudo de caso (hélice APC 14x7), os resultados que são de posse do autor para ser feita uma análise comparativa com os dados de saída do OpenFOAM são: resultados advindos do *software* Ansys (como no caso da hélice de seis pás), resultados de outro programa chamado QPROP (programa de análise para prever o desempenho de combinações de hélice-motor ou turbinas eólicas-gerador, mas que não utiliza técnicas de CFD, conforme já explicado na seção 5.2) do estudo de Rafael e, por fim, os resultados experimentais advindos de túnel de vento. Todos os resultados são empuxo [N] e torque [N.m], porém com a ajuda de uma planilha eletrônica esses dados foram convertidos em coeficiente de tração (K_t), coeficiente de potência (K_p) e eficiência da hélice (η). Tais resultados estão dispostos graficamente nas Figuras 46, 47 e 48, respectivamente, onde J representa a razão de avanço.

É possível observar, na análise das Figuras 46 a 48, que os resultados computacionais, de uma forma geral, acompanharam a tendência das curvas do ensaio experimental. Alguns dos resultados que vieram do *software* QPROP, principalmente nos gráficos de coeficiente de potência e eficiência, é perceptível que os métodos utilizados pelo programa não conseguem prever corretamente o padrão de funcionamento de hélices, visto que para K_p , a partir de certa razão de avanço (ou velocidade de vento incidente), onde era de se esperar um decaimento da curva, as mesmas continuaram crescentes. Já para eficiência, o QPROP também apontou resultados impossíveis de ocorrerem, como η superior a 1, o que é inviável de acontecer. Neste caso, tem-se uma eficiência superior a 100%. Os dois casos advindos do QPROP, 7P e 2P, referem-se à quantidade de seções/perfis da hélice APC 14x7 que foram *scaneados* para poder ser feita a análise no programa. De certa maneira, isso pode ser entendido como um modo de refino, dado que mais informações a respeito da geometria foram informadas/inseridas no *software*.

Figura 46 – Coeficiente de tração APC 14x7.

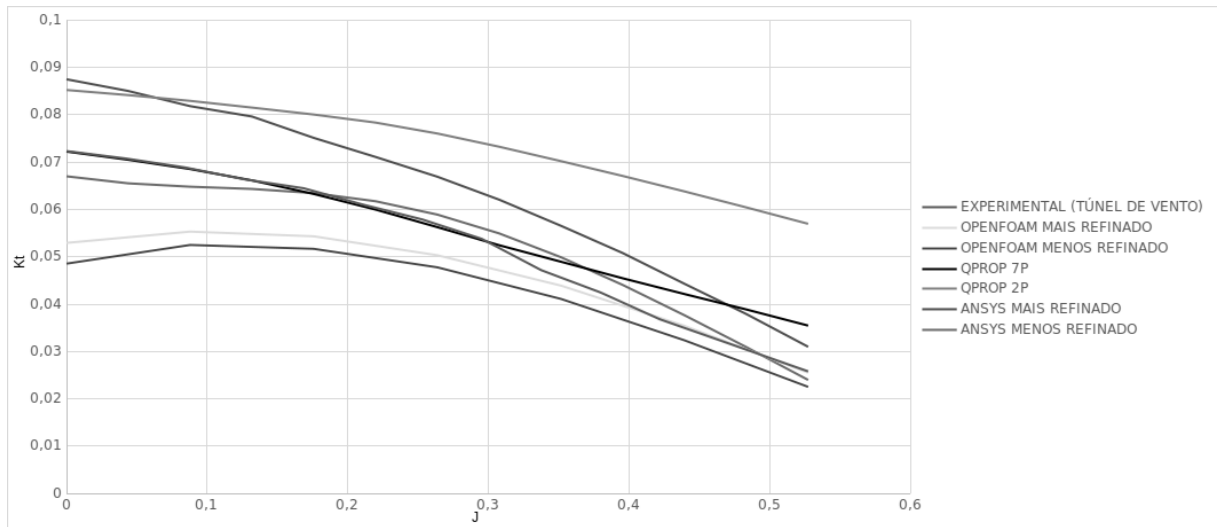
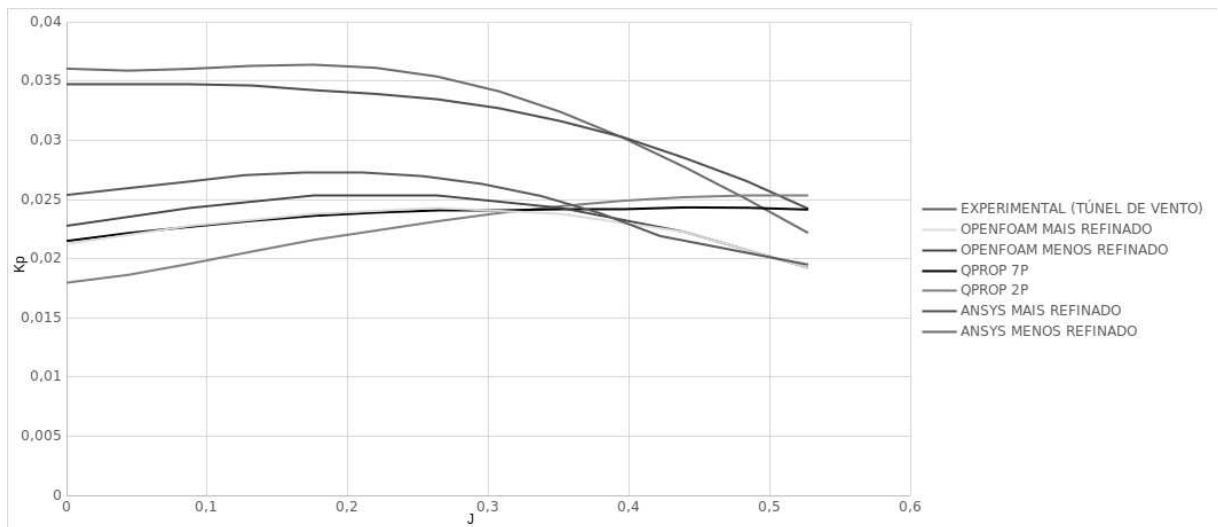


Figura 47 – Coeficiente de potência APC 14x7.



Para uma melhor visualização, foram plotados os mesmos gráficos anteriores, com o detalhe de apresentar apenas os resultados das simulações via CFD e túnel de vento (experimental). As Figuras 49, 50 e 51 mostram, respectivamente, coeficiente de tração (K_t), coeficiente de potência (K_p) e eficiência (η).

Como era de se esperar, os resultados provenientes de técnicas CFD, conseguem reproduzir com mais fidelidade o real funcionamento de uma hélice. Por isso é conhecida como sendo uma técnica *high fidelity*, ou seja, uma técnica que possui mais acurácia em seus resultados, capaz de prever toda a dinâmica existente por trás do problema. Para este

Figura 48 – Eficiência APC 14x7.

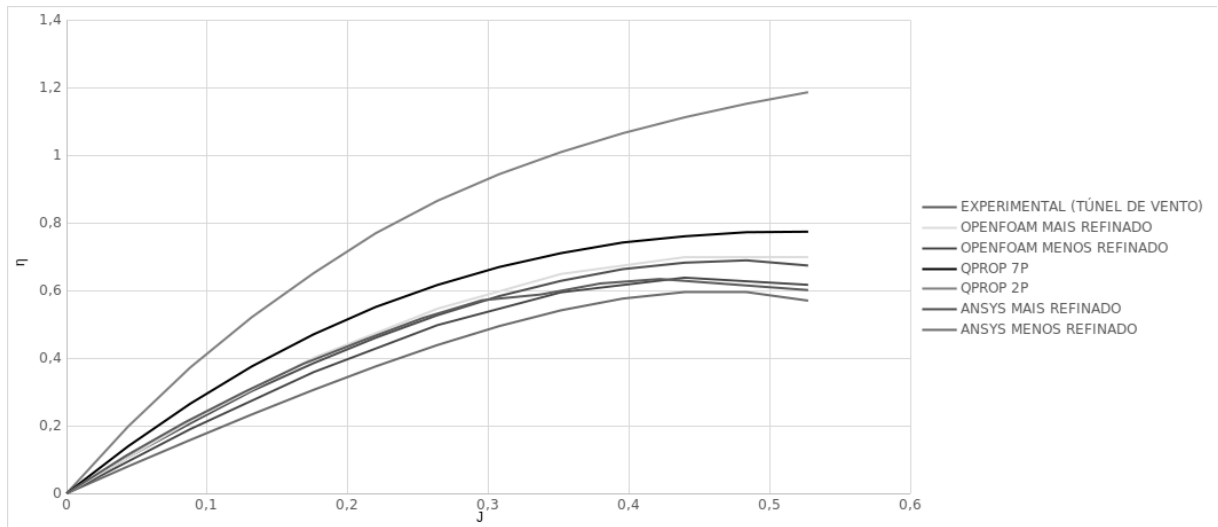
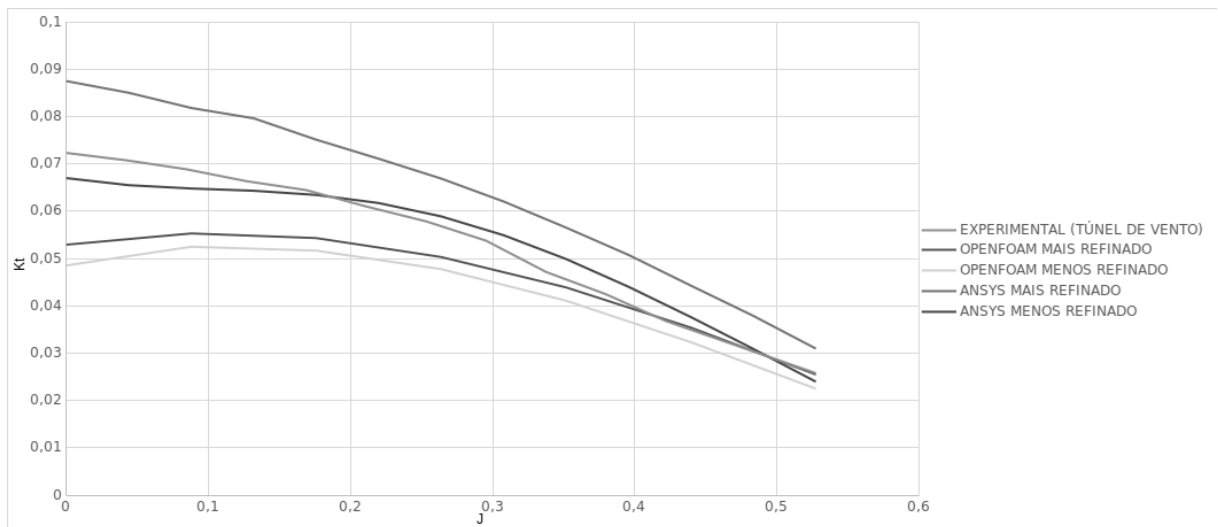


Figura 49 – Coeficiente de tração APC 14x7 de apenas alguns casos.



estudo de caso é possível notar que o OpenFOAM atingiu resultados melhores que o Ansys, se comparado aos resultados experimentais em túnel de vento. Outro fato importante é que, para maiores razões de avanço (J aproximadamente igual a 0,4), os métodos computacionais foram mais eficazes, atingindo resultados mais coerentes à realidade. No geral, a análise para a hélice APC 14x7 mostra que a metodologia utilizada neste trabalho tende a estar correta, sendo plausível de ser usada à diversos casos dessa área/ramo do conhecimento.

Figura 50 – Coeficiente de potência APC 14x7 de apenas alguns casos.

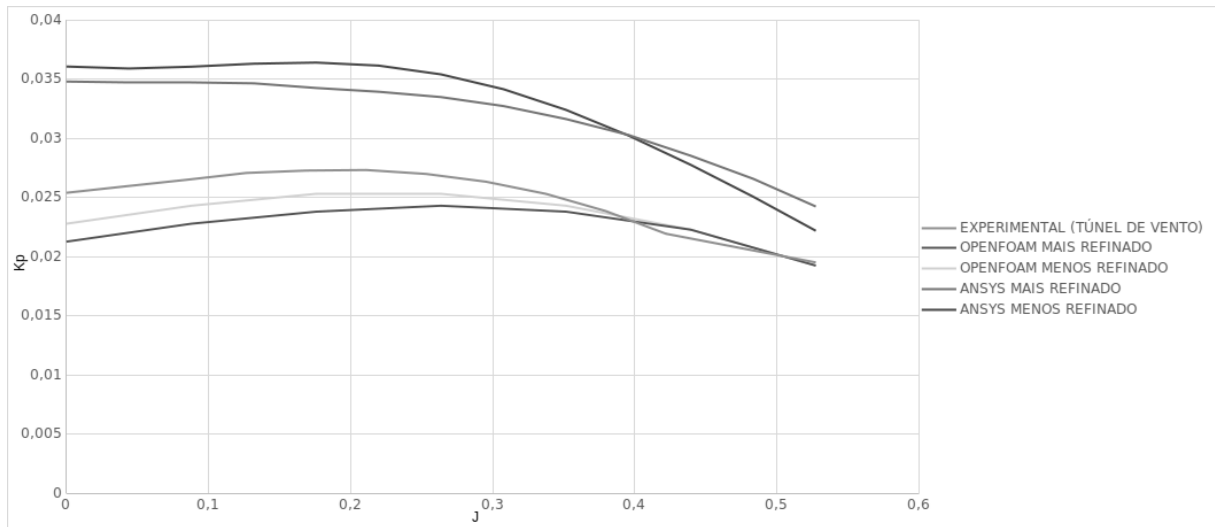
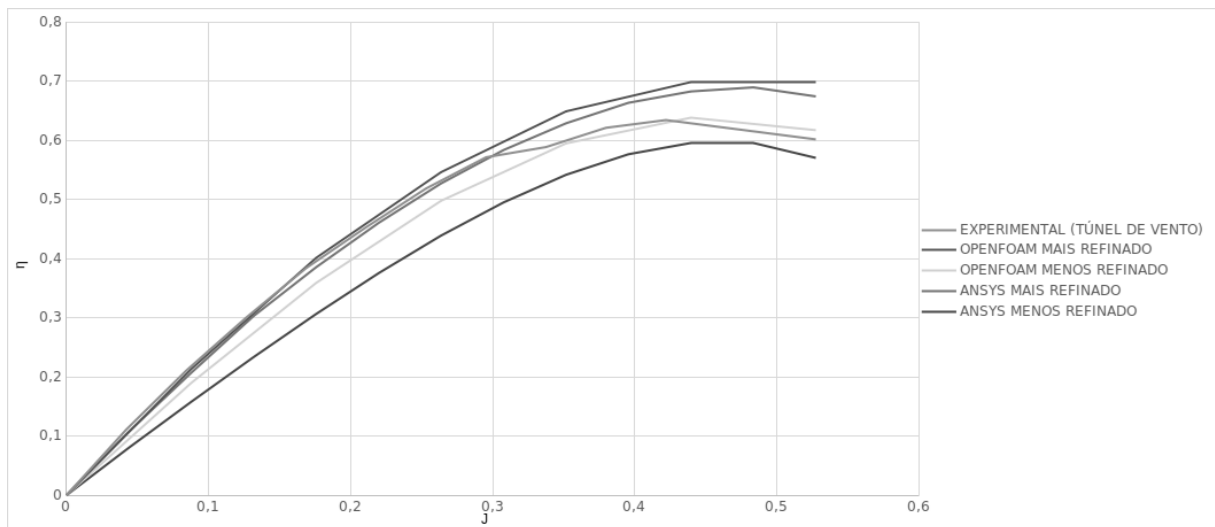


Figura 51 – Eficiência APC 14x7 de apenas alguns casos.



5.2.3 Hélice turbina NREL 5MW

O terceiro e último estudo de caso se baseia na hélice da turbina eólica NREL 5MW. O Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) do Departamento de Energia dos EUA (DOE), através do Centro Nacional de Tecnologia Eólica (NWTC), patrocinou estudos conceituais destinados a avaliar a tecnologia eólica *offshore* adequada nas águas rasas e profundas da plataforma continental *offshore* dos EUA (OCS - *Offshore Construction Specialists*) e de outras plataformas *offshore* em todo o mundo. Para obter informações úteis de tais estudos, é necessário o uso de dados de entrada realísticos e padronizados.

Devido a isso, foi criado um relatório que documenta as especificações de uma turbina que é agora chamada de "turbina eólica de linha de base *offshore* de 5 MW da NREL" e a lógica por trás de seu desenvolvimento. O objetivo é estabelecer as especificações detalhadas de uma grande turbina eólica que é representativa das turbinas típicas de multimegawatt terrestres e marítimas em escala de utilidade pública e adequadas para a implantação em águas profundas.

Antes de estabelecer as especificações detalhadas, no entanto, têm-se a necessidade de escolher o tamanho básico e a classificação de potência da máquina. Devido à grande porção dos custos em um sistema como esse ser destinada a estrutura de suporte de um sistema eólico *offshore*, é previsto desde o início que, para que um sistema eólico em águas profundas seja econômico, cada turbina eólica individual deve ser classificada em 5 MW ou mais (Musial et al. [2004]). As classificações consideradas para a linha de base variaram de 5 MW a 20 MW, tendo sido escolhida a de 5MW. Já o tamanho médio para casos como esse, tem-se, de acordo com alguns estudos de custo *offshore* não publicados da DOE, que um tamanho representativo de uma turbina eólica de 5 a 6 MW, seria baseado em um diâmetro do rotor de aproximadamente 128m.

Querendo obter um raio do rotor e a menor altura razoável possível para minimizar o momento de "capotagem" que atua em uma subestrutura *offshore*, foi decidido que a altura do *hub* da turbina eólica de linha de base deve ser de 90m. Isso daria uma folga de ar de 15m entre as pontas das pás no ponto mais baixo quando a turbina eólica não for desviada, e uma altura de onda individual extrema de 30m (ou seja, amplitude de 15m) estimada em 50 anos. As propriedades brutas adicionais que foram escolhidas para a turbina eólica de linha de base NREL de 5 MW são apresentadas na Tabela 10. As coordenadas (x, y, z) da localização geral do centro de massa (CM) da turbina eólica são indicadas em um sistema de coordenadas na base da torre, que se origina ao longo da linha central da torre no solo ou no nível médio do mar (MSL). O eixo x desse sistema de coordenadas é direcionado nominalmente *downwind*, o eixo y é direcionado transversalmente à direção nominal do vento e o eixo z é direcionado verticalmente da base da torre para o rolamento do *yaw*.

As turbinas eólicas atuais usam pás com pré-curvatura incorporada como um meio de aumentar a folga da torre sem um grande aumento do rotor (*overhang*). Como muitas das ferramentas de simulação disponíveis e códigos de projeto não suportam pás com pré-curvatura embutida, o que se faz é escolher uma inclinação das pás (*precone*) de 2.5° e uma inclinação do eixo de rotação (*shaft tilt*) de 5.0° na turbina eólica de linha de base para representar a menor quantidade de pré-vento e a maior quantidade de pré-curvatura incorporadas na atual NREL 5MW. A Figura 52 mostra com mais clareza os termos acima descritos.

O diâmetro do rotor indicado na Tabela 10 ignora o efeito do pré-vento da pá, o que reduz o diâmetro real e a área varrida. O diâmetro exato do rotor nas especificações

Tabela 10 – Propriedades brutas escolhidas para a turbina eólica da linha de base NREL de 5 MW.

Classificação	5 MW
Orientação do rotor, Configuração	<i>Upwind</i> , 3 pás
Controle	Velocidade variável, Passo coletivo (adaptativo)
Transmissão	Alta velocidade, Caixa de engrenagens múltiplo estágio
Rotor, Diâmetro <i>hub</i>	126 m, 3 m
Altura do <i>hub</i>	90 m
Velocidade do vento (partida, nominal, máxima)	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Velocidade do rotor (partida, nominal/máxima)	6.9 rpm, 12.1 rpm
Velocidade nominal na ponta	80 m/s
<i>Overhang</i> , <i>Shaft Tilt</i> , <i>Precone</i>	5 m, 5°, 2.5°
Massa do rotor	110000 kg
Massa da nacele	240000 kg
Massa da torre	347460 kg
Localização das coordenadas do CM geral	(-0.2m, 0.0 m, 64.0 m)

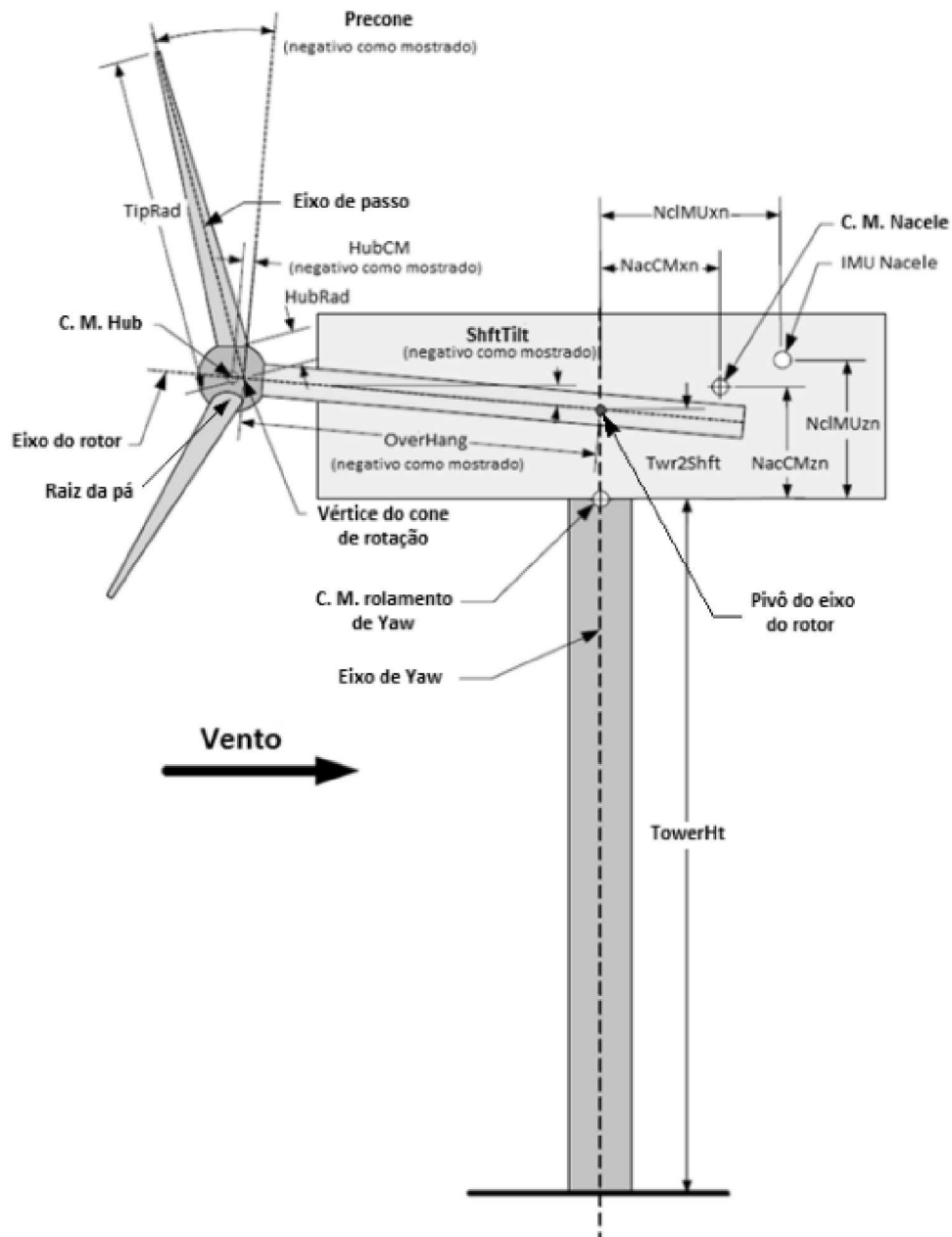
da turbina (assumindo que as pás não sejam afetadas) é na verdade $(126m) \times \cos(2.5^\circ) = 125.88m$ e a área varrida real é $(\pi/4) \times (125.88m)^2 = 12445.3m^2$. A geometria do rotor pode ser visualizada na Figura 53.

Para ser feita a análise deste estudo, seriam simulados dez casos, onde seria variada a velocidade do vento incidente na pá, a velocidade de rotação da turbina correspondente e o ângulo de *pitch* quando necessário. Tais informações se encontram disponibilizadas na Tabela 11. Porém, conforme já mencionado, os *softwares* atuais têm a dificuldade de aceitarem a inserção de dados referentes a curvatura das pás. Dito isso, para os casos 5, 6 e 7 da Tabela 11, onde se tem uma variação do ângulo de *pitch* (passo), a solução para contornar tal problema seria redesenhar toda a geometria da hélice (o que ocasionaria um esforço que não se insere no escopo deste trabalho); ou decompor a velocidade incidente do vento, que é normal à pá, em outras coordenadas de acordo com o ângulo de curvatura (o que não costuma ser entendido pelos programas computacionais de maneira correta, acarretando dados de saída equivocados). Por esses motivos, foram simulados sete casos que são mostrados na Tabela 12.

A fim de evitar ficar repetindo comentários que já foram ditos nos demais estudos de caso, a Tabela 13 reúne diversas informações a respeito de dimensões dos domínios (estacionário e rotativo), condições de contorno para superfícies e interfaces, modelo de turbulência adotado, esquema de tempo e convectivos utilizados, solucionador pressão velocidade, biblioteca para paralelização do código e *software* que gerou as malhas.

Para efeito de visualização a Figura 54 apresenta o domínio estacionário com a hélice interior à ele, para que se tenha uma noção do tamanho da geometria do domínio

Figura 52 – *Layout* de uma turbina com rotor *upwind* e 3 pás. (Fonte: adaptado de Jonkman et al. [2005]).



computacional, cujas unidades de dimensionamento são da casa de 10^3 metros (km). Outro detalhe importante se trata do refino que teve que ser utilizado para esta análise, como visto na Figura 55 onde têm-se o domínio rotativo com a hélice dentro dele e que pode ser observado um nível altíssimo na qualidade da malha. Por fim, a Figura 56 mostra uma das pás da hélice, onde foi necessário um refino que acompanhasse fielmente o desenho da geometria, visto que, devido as dimensões da hélice, qualquer cálculo computacional que não fosse perto da exatidão acarretaria uma mudança razoável no resultado. Por isso, apenas na superfície da hélice existem 615391 células e 686531 pontos. A quantidade de elementos e nós em todo domínio computacional é da casa de dezenas de milhões.

Figura 53 – Modelo geométrico rotor NREL 5MW.

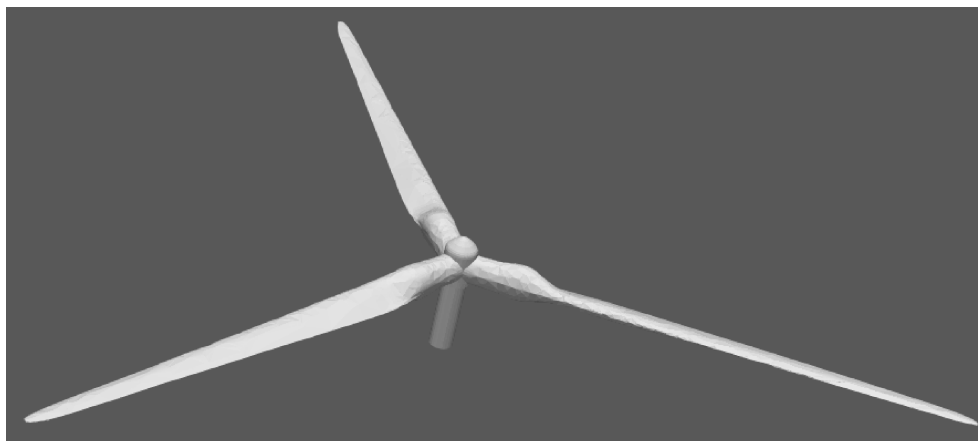


Tabela 11 – Casos de estudo para a turbina eólica NREL de 5 MW.

Caso	Velocidade vento (m/s)	Velocidade rotação (rpm)	Ângulo <i>pitch</i> (°)
1	5	7.39	0
2	8	9.16	0
3	9	10.3	0
4	11	11.89	0
5	15	12.1	10.45
6	20	12.1	17.47
7	25	12.1	23.47
8	15	12.1	0
9	20	12.1	0
10	25	12.1	0

Tabela 12 – Casos de estudo para a NREL de 5 MW no OpenFOAM.

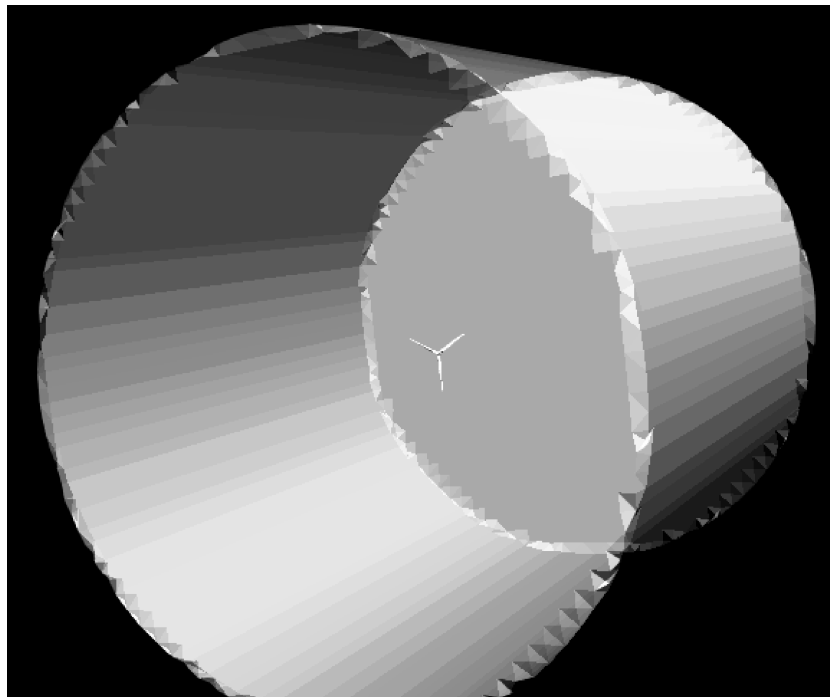
Caso	Velocidade vento (m/s)	Velocidade rotação (rpm)
1	5	7.39
2	8	9.16
3	9	10.3
4	11	11.89
5	15	12.1
6	20	12.1
7	25	12.1

Adentrando à parte dos resultados, encontra-se na literatura alguns estudos que utilizaram a mesma turbina (NREL 5 MW) para se fazer análises aerodinâmicas. O primeiro deles se trata do relatório oficial que documenta as especificações da turbina eólica em estudo (Jonkman et al. [2009]). O segundo resultado é do trabalho desenvolvido por de Araújo et al. [2018]. Ambos utilizaram o *software* FAST com o módulo AeroDyn acoplado. Note-se que as simulações no programa FAST são de natureza aeroelástica, de modo que as forças do vento afetam o movimento dos elementos, influenciando o empuxo

Tabela 13 – Configurações para simulação hélice NREL 5 MW no OpenFOAM.

Dimensões domínio rotativo	Diâmetro=1.1D / Altura=0.4D
Dimensões domínio estacionário	Diâmetro=8D / Altura=8D
Condição contorno <i>inlet</i>	Velocidade vento (Tabela 12)
Condição contorno <i>outlet</i>	Gradiente zero pressão (Dirichlet)
Condições de contorno parede externa e hélice	Não escorregamento (<i>no slip</i>) e funções turbulentas de parede
Interfaces comuns aos dois domínios	Tratamento numérico AMI com movimento cíclico de rotação
Modelo de turbulência	$k-\omega SST$
Esquema de tempo	Euler adaptativo
Esquemas convectivos	linear / linearUpwind / upwind
Solucionador pressão velocidade	PIMPLE
Biblioteca paralelização	openMPI
<i>Software</i> malhador	OpenFOAM

Figura 54 – Domínio computacional NREL 5MW.



e o torque no rotor. No módulo AeroDyn, os cálculos são de natureza aerodinâmica. As simulações para estes dois estudos foram feitas utilizando a teoria BEM (descrita na seção 1.2.1) para uma série de velocidades de vento dadas, constantes e uniformes. A duração das simulações foi longa o suficiente para garantir que todo o comportamento transitório tivesse desaparecido, registrando os valores de saída no estado estacionário. Foram tomados intervalos discretos de velocidade do vento a cada 2.0 m/s, desde o acionamento (3 m/s) até o desligamento (25 m/s). As respostas para potência do rotor (RotPwr) e do gerador (GenPwr), torque (RotTorq) e empuxo (RotThrust) do rotor, além da velocidade do gerador

Figura 55 – Malha domínio rotativo NREL 5MW.

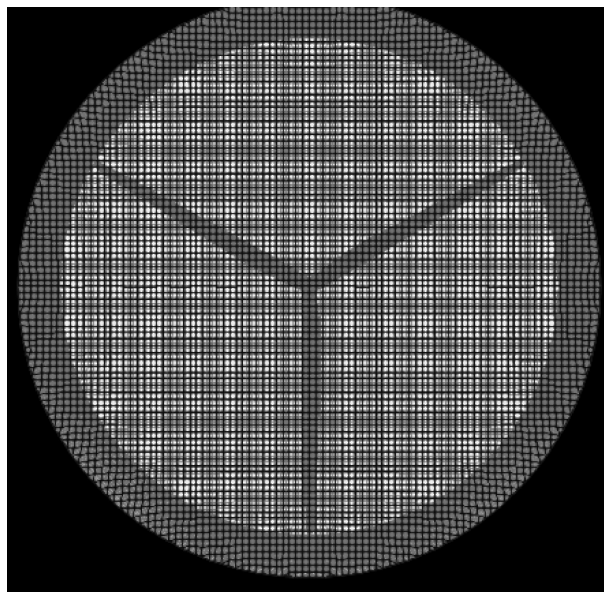
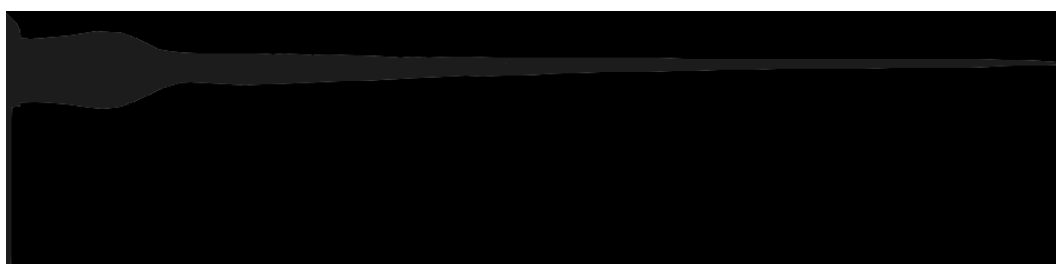


Figura 56 – Malha de uma das pás da NREL 5MW.



(GenSpeed – referente ao eixo de alta velocidade, ou seja, após a caixa de engrenagens) podem ser vistas nas Figuras 57 e 58, para primeiro e segundo trabalho respectivamente. Os resultados obtidos nos dois estudos são praticamente idênticos.

Outro estudo pode ser aqui mencionado. Trata-se do trabalho de Zhao et al. [2014], onde o rotor da turbina eólica NREL 5 MW foi simulado de acordo com a Tabela 11, ou seja, foram levados em conta os ângulos de *pitch*. Neste caso foram utilizadas técnicas CFD com modelo de turbulência $k-\omega$ SST integrado, no programa OpenFOAM, abordando o método MRF (*Multi Reference Framework*). O MRF é um tratamento das interfaces onde não são contabilizados os efeitos transientes. Infelizmente não se tem mais informações acerca de configurações para este caso, o que dificulta uma análise/comparação. No entanto, tem-se os resultados para empuxo e torque para algumas velocidades de incidência de vento, como mostrado na Tabela 14, onde foram usados tanto o ângulo de inclinação das pás (*precone*), quanto o de inclinação do eixo de rotação (*shaft tilt*) para as simulações. A partir desta tabela (Tabela 14) foi gerado um gráfico (Figura 59) para que fique mais fácil o entendimento e a visualização das respostas para o leitor. Ainda na Figura 59 é possível perceber a diferença que um controle de passo pode gerar em um sistema como

Figura 57 – Parâmetros de saída NREL 5MW. (Fonte: Jonkman et al. [2009]).

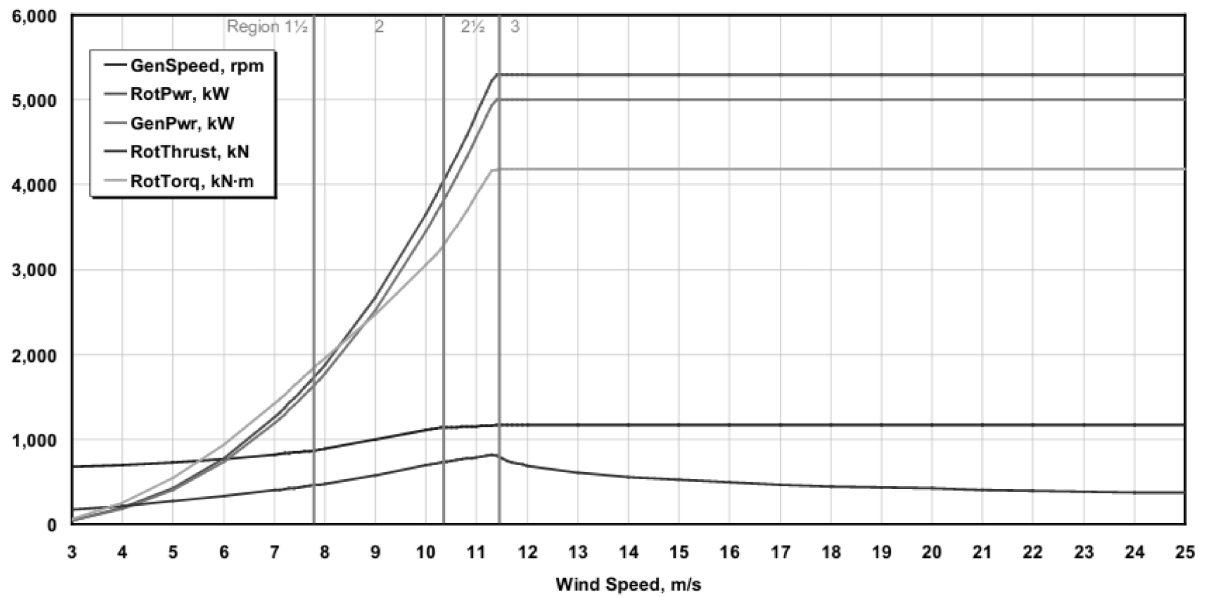
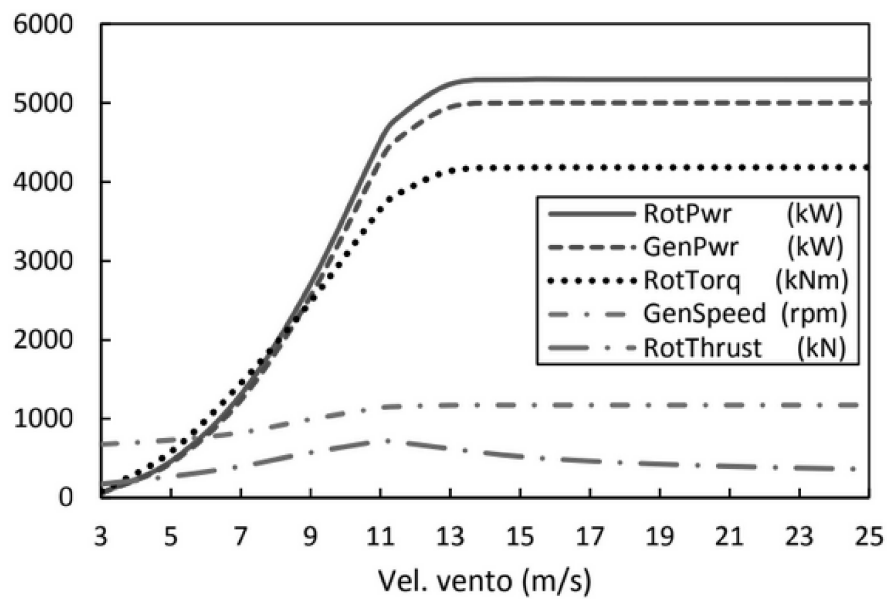


Figura 58 – Parâmetros de saída NREL 5MW. (Fonte: de Araújo et al. [2018]).



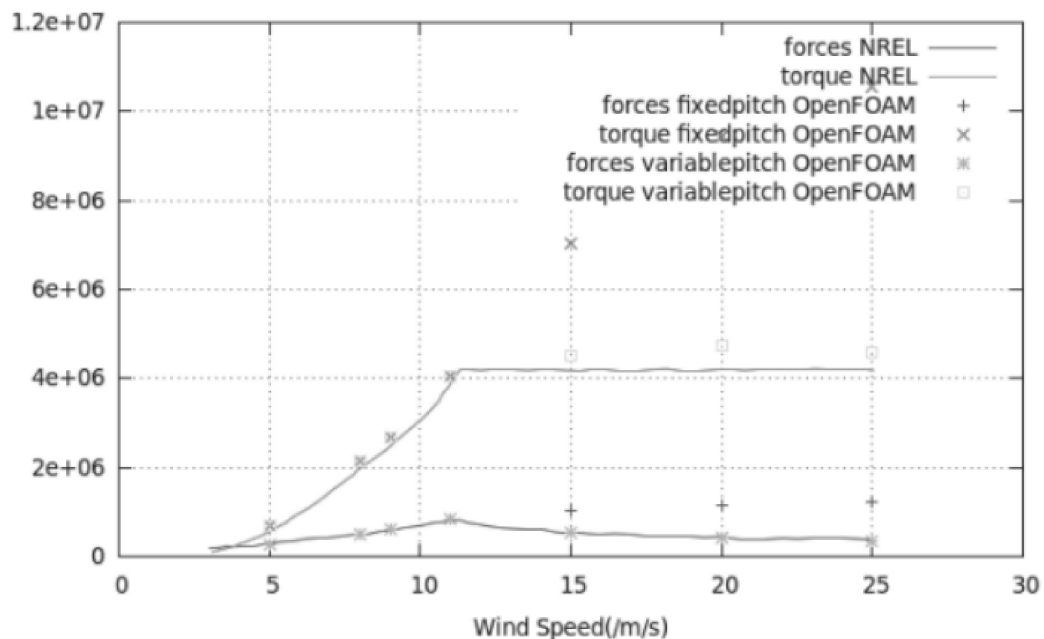
esse, além de ser feita uma análise comparativa com o estudo de Jonkman et al. [2009], para validação do trabalho desenvolvido.

Para finalizar, os resultados obtidos com a metodologia proposta por este trabalho estão apresentados na Figura 60. Nela é visto que os parâmetros força, em N, e torque, em N.m, acompanham a tendência das curvas das literaturas já expostas anteriormente. No entanto, os valores ficaram muito aquém do esperado, tendo como principal justificativa a ausência na mudança da geometria, seja pelo não uso do *precone* (vide Figura 52) de 2.5°

Tabela 14 – Respostas para a turbina eólica NREL de 5 MW. (Fonte: Zhao et al. [2014]).

Caso	Velocidade vento (m/s)	Empuxo ($\times 10^5$ N)	Torque ($\times 10^6$ N.m)
1	5	2.44	0.670
2	8	4.718	2.117
3	9	5.977	2.682
4	11	8.232	4.064
5	15	5.244	4.497
6	20	4.190	4.744
7	25	3.533	4.57
8	15	10.27	7.026
9	20	11.29	9.430
10	25	12.14	10.53

Figura 59 – Força (N) e torque (N.m) NREL 5MW. (Fonte: Zhao et al. [2014]).

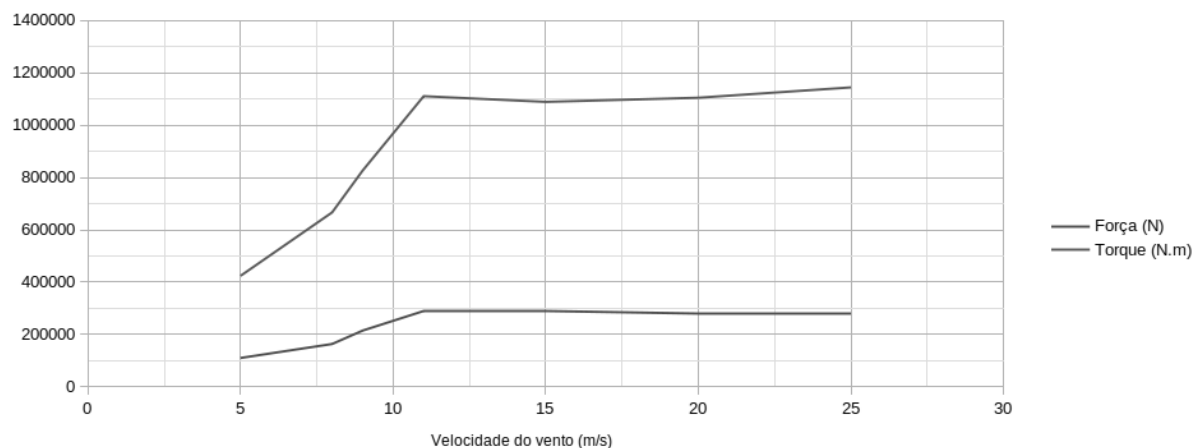


e do *shaft tilt* (vide Figura 52) de 5.0° , ou pela falta de um controle de *pitch* para algumas velocidades de vento incidente.

Além disso, por se tratar de uma estrutura de grande porte, sua velocidade de rotação é muito baixa (máxima de 12.1 rpm), fazendo com que demore mais para todo o sistema entrar em um regime estacionário. Neste caso em específico, pelo motivo da malha ter sido muito refinada, o tempo de simulação aumentou demais (aproximadamente 10 vezes), pelo fato do passo de tempo (δ_t) ter que diminuir, para que seja mantida a relação do número de Courant. Dito isso, acredita-se que tais valores apresentados ainda se encontram em um regime transiente de escoamento.

Um detalhe que pode ser mencionado como justificativa é que as velocidades de vento incidente são colocadas no *inlet* do domínio estacionário, que fica a uma distância

Figura 60 – Força (N) e torque (N.m) NREL 5MW no OpenFOAM.



razoável da hélice da turbina (vide Tabela 13 para dimensão do domínio computacional). Dessa forma, é necessário que se decorra um tempo de simulação suficiente para que a velocidade do vento percorra o caminho (espaço) até encontrar a hélice. Nas simulações aqui apresentadas não foi possível manter os cálculos computacionais até o ponto acima descrito por motivos de estourar a memória das máquinas do cluster utilizado.

De qualquer maneira, as características/princípios de funcionamento de uma turbina eólica podem ser acompanhados pela Figura 60, sem levar em conta os valores mostrados, conforme já justificado.

Vale ressaltar que, para todas simulações (das três hélices aqui apresentadas e outras que são de posse do autor), a metodologia proposta que está sendo utilizada neste trabalho, sempre atinge valores de saída um pouco menores, se comparado a outras metodologias e ensaios experimentais. É como se tal metodologia subestimasse os resultados, apresentando respostas mais conservadoras para todos os estudos de caso.

6 CONCLUSÕES

A hélice é um componente de fundamental importância para aeronaves, turbinas eólicas, submarinos, ventiladores e diversos outros objetos de extrema importância para nosso cotidiano. A previsão de seu desempenho é uma disciplina chave para obtenção de um conjunto hélice/objeto eficiente. O projeto de hélices foi aperfeiçoado ao longo da história e sempre acompanhou os requisitos técnicos das tendências mundiais.

Atualmente, o projeto de hélices tem sido colocado em pauta de pesquisa devido à busca por eficiência nas hélices. Tal efeito pode ser atribuído à crescente utilização de VANTs para as mais variadas tarefas: operações militares, monitoramento, agricultura, entretenimento. Outro motivo que deve ser comentado é o de que quão maior for uma turbina eólica, mais energia será gerada. No entanto, uma hélice com uma geometria mais eficiente e com dimensão menor, pode gerar a mesma quantidade de energia de uma hélice maior que teve seu perfil mal formulado. Um erro de projeto como esse pode ser muito custoso.

A determinação da resposta aerodinâmica de turbinas eólicas é um problema complexo e as restrições referentes ao detalhamento dessas estruturas sempre dificultaram o desenvolvimento de pesquisas no setor. Neste contexto, o presente trabalho se propôs a estudar os comportamentos de coeficientes de empuxo, de potência e de eficiência para diferentes hélices em diferentes velocidades de avanço, compatíveis com sua faixa de operação. Através de dinâmica dos fluidos computacionais (CFD - Computational Fluid Dynamics), foram realizados experimentos numéricos que exploraram tais comportamentos. Apesar do custo computacional elevado da CFD, tal ferramenta permite o estudo de situações que não são possíveis em abordagens matemáticas clássicas, como o BEMT.

Neste trabalho, nas análises aerodinâmicas de um ventilador doméstico, duas técnicas para malhas rotativas foram comparadas, a abordagem do *frozen rotor* e a abordagem AMI. Enquanto o primeiro manteve o movimento congelado (estacionário), o segundo levou em consideração efeitos transientes. Além disso, dois modelos de turbulência também foram investigados. O modelo de turbulência $k-\epsilon$ superestima o parâmetro aerodinâmico, uma vez que não foi capaz de prever a pressão do gradiente como o $k-\omega$. Com relação aos efeitos transientes, foi possível verificar que a análise transitória subestima os parâmetros aerodinâmicos e é determinante para avaliar o desempenho aerodinâmico das hélices.

No segundo caso, uma hélice de aeromodelismo foi simulada de modo a obter seus coeficientes de potência, empuxo e eficiência para diversas razões de avanço. Foi possível perceber que os resultados advindos de técnicas que utilizam a CFD obtiveram resultados melhores que as abordagens matemáticas clássicas, como a utilizada no *software* QPROP. Além disso, o programa OpenFOAM atingiu valores de resposta mais condizentes

com a realidade se comparado ao Ansys, visto que na comparação com os resultados experimentais em túnel de vento, o OpenFOAM acompanhou melhor as curvas. No mais, uma análise de refino de malha foi desenvolvida, mostrando que, para certas condições, quanto mais refinada a malha, mais próximo do resultado real estará.

O último estudo abordou a hélice da turbina eólica NREL de 5 MW. Neste caso, ficou evidente como o tempo de simulação interfere de modo crucial nas simulações transientes. Como já dito, TEEHs com TSR alto têm como característica o baixo torque de partida. Levando isso em conta e o fato da velocidade rotacional também ser baixa, e devido as simulações para este caso terem sido muito custosas computacionalmente falando (δ_t pequeno), acredita-se que a discrepância nos valores dos dados de saída apresentados se dá por motivos do escoamento ainda não ter chegado a um estado estacionário, ou seja, os valores ainda variam bastante com o tempo decorrido. Contudo, a forma da curva dos resultados garante que o princípio de funcionamento de uma turbina eólica foi capturado.

Por fim, pode-se dizer que os objetivos propostos por este trabalho foram alcançados e que, de certa maneira, por comparação, se encontram corretos. Conclui-se também que, os tratamentos numéricos utilizados neste estudo podem sim fazer parte de uma nova metodologia para análises aerodinâmicas de hélices.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento da pesquisa e os resultados alcançados permite que o autor aponte algumas sugestões para trabalhos futuros. Citam-se:

- Investir nas análises em CFD da turbina eólica de 5 MW com o intuito de aproximar os resultados aos da literatura.
- Aplicar a metodologia desta pesquisa a outros modelos de turbinas e realizar comparações com outras metodologias.
- Realizar estudos sobre o comportamento estrutural das pás das hélices e dos demais componentes estruturais da turbina eólica. Estes devem levar em conta os efeitos aeroelásticos decorrentes da interação fluido estrutura.

REFERÊNCIAS

- C. Adkins and R. Liebeck. Design of optimum propellers. In *21st Aerospace Sciences Meeting*, page 190, 1983.
- C. N. Adkins and R. H. Liebeck. Design of optimum propellers. *Journal of Propulsion and Power*, 10(5):676–682, 1994.
- R. Agarwala and P. I. Ro. Separated pitch control at tip: innovative blade design explorations for large mw wind turbine blades. *Journal of Wind Energy*, 2015, 2015.
- J. Anderson, JD. Fundamentals of aerodynamics, forth edittion, 2010.
- A. O. Araújo. Aerodinâmica de turbinas eólicas de eixo horizontal. *COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil*, 2017.
- M. Beaudoin and H. Jasak. Development of a generalized grid mesh interface for turbomachinery simulations with openfoam. In *Open source CFD International conference*, 2008.
- J. Brandt and M. Selig. Propeller performance data at low reynolds numbers. In *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, page 1255, 2011.
- F. Carneiro, L. Moura, P. C. Rocha, R. P. Lima, and K. Ismail. Application and analysis of the moving mesh algorithm ami in a small scale hawt: Validation with field test’s results against the frozen rotor approach. *Energy*, 171:819–829, 2019.
- V. Choudhury. *A validation study of openfoam for hybrid rans-les simulation of incompressible flow over a backward facing step and delta wing*. Mississippi State University, 2014.
- A. O. de Araújo, L. T. de Souza, M. S. Pfeil, and R. C. Battista. Aspectos do comportamento de torres de turbinas eólicas. 2018.
- M. S. de Matos Melo. *ENERGIA EÓLICA: ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- P. De Sampaio and M. d. L. Moreira. A new finite element formulation for both compressible and nearly incompressible fluid dynamics. *International journal for numerical methods in fluids*, 32(1):43–67, 2000.
- R. dos Santos Custódio. *Energia eólica para produção de energia elétrica*. Eletrobrás, 2009.
- B. Dose. *CFD Simulations of a 2.5 MW wind turbine using ANSYS CFX and OpenFOAM*. PhD thesis, MSc Thesis, UAS Kiel and FhG IWES, Germany, 2013.

- F. Driscoll, J. Jonkman, A. Robertson, S. Srinivas, B. Skaare, and F. G. Nielsen. Validation of a fast model of the statoil-hywind demo floating wind turbine. *Energy Procedia*, 94: 3–19, 2016.
- F. R. Eldridge. *Wind Machines: Report*, volume 75. The Foundation, 1975.
- L. Eliassen, J. Jakobsen, and J. Krokstad. The effect of turbulent wind field on loads of a wind turbine rotor of increasing size. In *14th International Conference on Wind Engineering, Porto Alegre, Brazil*, 2015.
- P. Farrell and J. Maddison. Conservative interpolation between volume meshes by local galerkin projection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(1-4): 89–100, 2011.
- B. Fitzgerald and B. Basu. Cable connected active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades. *Journal of Sound and Vibration*, 333(23): 5980–6004, 2014.
- P. Fleming and S. Probert. The evolution of wind-turbines: an historical review. *Applied energy*, 18(3):163–177, 1984.
- A. Fluent. 12.0 theory guide. *Ansys Inc*, 5(5), 2009.
- H. Glauert. Airplane propellers. In *Aerodynamic theory*, pages 169–360. Springer, 1935.
- W. E. C. GLOBAL. Global wind statistics 2017 [eb/ol]. 2018.
- G. W. S. GWEC. Global wind energy council. *FEBRUARY*, 2013.
- M. O. Hansen. *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge, 2015.
- E. Hau. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- C. Hirsch. *Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics*. Elsevier, 2007.
- IEA. Iea, 2013. international energy agency. energy technology perspectives: Technology roadmap wind. <https://iea.org.br>, 2013. URL <https://iea.org.br>.
- R. I. Issa. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of computational physics*, 62(1):40–65, 1986.
- R. I. Issa, A. Gosman, and A. Watkins. The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme. *Journal of Computational Physics*, 62(1):66–82, 1986.

- H. Jasak and M. Beaudoin. Openfoam turbo tools: From general purpose cfd to turbomachinery simulations. In *ASME-JSME-KSME 2011 joint fluids engineering conference*, pages 1801–1812. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2011.
- J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott. Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- J. M. Jonkman, M. L. Buhl Jr, et al. Fast user’s guide. *Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory*, 365:366, 2005.
- S. S. D. S. Junior. *AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE AEROGERADORES*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- B.-s. Kim, J.-w. Jin, O. Bitkina, and K.-w. Kang. Ultimate load characteristics of nrel 5-mw offshore wind turbines with different substructures. *International Journal of Energy Research*, 40(5):639–650, 2016.
- S. Krohn. Danish wind turbines: an industrial success story. *Available at the www-site of the Danish Wind Industry Association: www.windpower.org*, 2002.
- H. A. Kutty and P. Rajendran. 3d cfd simulation and experimental validation of small apc slow flyer propeller blade. *Aerospace*, 4(1):10, 2017.
- R. A. Lopes. Energia eólica. *Energia Eólica e Solar*, 2012.
- M. R. Luhur, A. L. Manganhar, K. Solangi, A. Q. Jakhrani, K. C. Mukwana, and S. R. Samo. A review of the state-of-the-art in aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine. *Wind and Structures*, 22(1):1–16, 2016.
- J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- D. Matha. Model development and loads analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform with a comparison to other floating turbine concepts: April 2009. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2010.
- B. W. McCormick. Aerodynamics. *Aeronautics, and Flight Mechanics*, 1979.
- R. Mehdipour. Simulating propeller and propeller-hull interaction in openfoam, 2014.
- F. Menter. Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In *23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference*, page 2906, 1993.

- F. R. Menter. Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions. *AIAA journal*, 30(6):1657–1659, 1992.
- F. R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8):1598–1605, 1994.
- F. R. Menter. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International journal of computational fluid dynamics*, 23(4):305–316, 2009.
- S. J. Miley. Catalog of low-reynolds-number airfoil data for wind-turbine applications. Technical report, Rockwell International Corp., Golden, CO (USA). Rocky Flats Plant; Texas A . . . , 1982.
- V. Mishra, S. Beatty, B. Buckham, P. Oshkai, and C. Crawford. Application of an arbitrary mesh interface for cfd simulation of an oscillating wave energy converter. In *Proc. 11th Eur. Wave Tidal Energy Conf*, pages 07B141–07B1410, 2015.
- M. d. L. Moreira et al. Simulação computacional de escoamentos viscosos compressíveis/quase incompressíveis. 1998.
- W. Musial, S. Butterfield, and A. Boone. Feasibility of floating platform systems for wind turbines. In *42nd AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*, page 1007, 2004.
- R. OpenFOAM. The open source cfd toolbox. *The OpenFOAM Foundation homepage: <http://openfoam.com>*, 2011.
- S. V. Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow, hemisphere publ. *Corp., New York*, 58, 1980.
- J. Peraire, O. Zienkiewicz, and K. Morgan. Shallow water problems: a general explicit formulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 22(3):547–574, 1986.
- S. B. Pope. Turbulent flows, 2001.
- A. L. T. Rezende. Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada. *PUC, Rio de Janeiro*, 2009.
- M. A. A. Ribeiro. *Análise de fadiga em estrutura de fundação de torre de turbina eólica*. PhD thesis, Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de . . . , 2014.
- E. Robertson, V. Choudhury, S. Bhushan, and D. Walters. Validation of openfoam numerical methods and turbulence models for incompressible bluff body flows. *Computers & Fluids*, 123:122–145, 2015.

- P. C. Rocha, H. B. Rocha, F. M. Carneiro, M. V. da Silva, and A. V. Bueno. $k-\omega$ sst (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine. *Energy*, 65:412–418, 2014.
- H. Schlichting and K. Gersten. *Boundary-layer theory*. Springer, 2016.
- P. J. Schubel and R. J. Crossley. Wind turbine blade design. *Energies*, 5(9):3425–3449, 2012.
- G. B. Silva. Desenvolvimento de uma turbina eólica de eixo vertical. *Instituto Superior Técnico–Universidade Técnica de Lisboa*, 2011.
- L. Silva da Purificação. Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica darrieus para aplicação em edifícios. *Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória*, 2012.
- E. Simiu and R. H. Scanlan. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. 1996.
- T. Theodorsen. *Theory of propellers*. McGraw-Hill Book Company, 1948.
- H. K. Versteeg and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, 2007.
- Q. R. Wald. The aerodynamics of propellers. *Progress in Aerospace Sciences*, 42(2):85–128, 2006.
- D. Wall. *Optimum propeller design for electric UAVs*. PhD thesis, 2012.
- Q. Wang, H. Zhou, and D. Wan. Numerical simulation of wind turbine blade-tower interaction. *Journal of Marine Science and Application*, 11(3):321–327, 2012.
- F. E. Weick. *Aircraft propeller design*. McGraw-Hill Book Company, inc., 1930.
- D. C. Wilcox et al. *Turbulence modeling for CFD*, volume 2. DCW industries La Canada, CA, 1998.
- D. Wilhelm. Rotating flow simulations with openfoam. *International Journal of Aeronautical Science & Aerospace Research*, 1(001), 2015.
- R. Wilson. Wind-turbine aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 5(3-4):357–372, 1980.
- W. Zhao, P. Cheng, D. Wan, et al. Numerical computation of aerodynamic performances of nrel offshore 5-mw baseline wind turbine. In *The Eleventh ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2014.

- O. Zikanov. Essential computational fluid dynamics. joh wiley & sons, 2010.
- H. Zuo, K. Bi, and H. Hao. Dynamic analyses of operating offshore wind turbines including soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 157:42–62, 2018.