



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE CFD DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Felipe Féres Ferreira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Gustavo Rabello dos Anjos

Rio de Janeiro
Novembro de 2020

ANÁLISE CFD DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM AEROGERADOR DE
EIXO HORIZONTAL

Felipe Féres Ferreira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Examinado por:

Prof. Gustavo Rabello dos Anjos, Ph.D.

Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, Ph.D.

Prof. Gabriel Lisboa Verissimo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2020

Féres Ferreira, Felipe

Análise CFD do escoamento ao redor de um aerogerador de eixo horizontal/Felipe Féres Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2020.

XIV, 105 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Gustavo Rabello dos Anjos

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 104 – 105.

1. CFD. 2. Aerogerador. 3. Mecânica dos Fluidos. I. Rabello dos Anjos, Gustavo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Título.

*Dedico este trabalho para a
minha filha Alícia que me motiva
a ser melhor todos os dias.*

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador Gustavo Rabello por todo o apoio que me forneceu durante todo o processo de construção desse trabalho. Sem ele esse trabalho não seria possível.

Também quero agradecer aos meus padrinhos Alvimar e Denize que sempre me apoiaram e se mostraram orgulhos de cada etapa de meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal. Sou grato também a minha avó Dilene que mesmo a distância sempre me acompanhou e se orgulhou de mim.

Preciso agradecer também a minha namorada Lorryne por estar presente nos meus piores momentos. Não sei se seria possível chegar até aqui sem ela para me fazer sentir seguro mesmo diante de tantas inseguranças.

Finalmente, não posso deixar de agradecer aos meus pais Antonio e Andrea e minha irmã Carolina que são a minha base. Eu devo tudo a eles.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

ANÁLISE CFD DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Felipe Féres Ferreira

Novembro/2020

Orientador: Gustavo Rabello dos Anjos

Curso: Engenharia Mecânica

Apresenta-se, neste trabalho, um estudo sobre o comportamento do escoamento ao redor de um aerogerador de eixo horizontal através da metodologia de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Esse estudo tem como objetivo permitir avanços tecnológicos nestes equipamentos, proporcionando uma maior produção de energia sustentável. Primeiramente, gerou-se uma geometria através de perfis de aerofólio já utilizados em turbinas eólicas e considerando um modelo simplificado de cubo. Na etapa seguinte, malhas foram geradas, realizando-se testes a fim de avaliar a malha que apresenta a melhor relação entre a acurácia dos resultados e o custo computacional. O método numérico utilizado para a resolução do escoamento foi o Método dos Volumes Finitos. Além dele, também foram utilizados modelos de turbulência de duas equações para a obtenção dos resultados. Finalmente, avaliou-se a influência do perfil do aerofólio e do comprimento das pás no escoamento. Ademais, também simulou-se considerando um regime transiente a fim de validar a consideração de que o sistema estudado estava em regime permanente.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

CFD ANALYSIS OF THE FLOW AROUND A HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE

Felipe Féres Ferreira

November/2020

Advisor: Gustavo Rabello dos Anjos

Course: Mechanical Engineering

This study focusses on the behavior displayed by the flow around a horizontal axis wind turbine using the Computational Fluid Dynamics methodology (CFD). It aims to allow technological advances in the aforementioned equipment, which in turn produces sustainable energy on a large scale. First of all, a geometry was created taking into consideration both the airfoil profiles that had been already used at wind turbines and a simplified model of the wind turbine hub. After that, computational meshes were created and tests were carried out in order to identify the mesh that provided the best result concerning accuracy and computational cost. The numerical method applied to solve the flow properties was the Finite Volume Method. Besides that, two-equation turbulence models were also used to obtain the results. Furthermore, the influence of the airfoil profile and the blade's length were evaluated. Finally, a simulation considering a transient regime was also run in order to validate the consideration of a permanent regime in the studied system.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivo	2
1.4 Estrutura	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Aerogeradores	3
2.2 Dinâmica dos Fluidos Computacional	6
2.3 Métodos Numéricos	8
2.3.1 Diferenças Finitas	8
2.3.2 Elementos Finitos	8
2.3.3 Volumes Finitos	10
3 Modelo Matemático	11
3.1 Equações de Conservação	11
3.1.1 Conservação de massa	11
3.1.2 Conservação da quantidade de movimento	12
3.2 Turbulência	13
3.2.1 Equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (RANS)	14
3.2.2 Modelo Duas Equações	15
4 Método Proposto	18
4.1 Geometria	18
4.2 Condições do problema	21
4.3 Convergência de malha	22
4.4 Validade do domínio	59
4.5 Processamento	72

5	Resultados e Discussões	73
5.1	Estudo de perfis de pá	73
5.2	Estudo do tamanho dos aerogeradores	88
5.3	Regime transiente	94
6	Considerações Finais	102
6.1	Conclusões	102
6.2	Trabalhos Futuros	103
	Referências Bibliográficas	104

Lista de Figuras

2.1	Representação de uma turbina VAWT típica. Adaptada de [1].	4
2.2	Representação de uma turbina HAWT típica. Adaptada de [2].	4
2.3	Turbinas com diferentes quantidades de pás. [3]	5
2.4	Turbinas com diferentes configurações de posição das pás. Adaptada de [3].	5
2.5	Exemplo de malha unidimensional e bidimensional típicas do método de diferenças finitas. [12]	9
2.6	Exemplo de uma malha não-estruturada que pode ser utilizada no método de elementos finitos. [12]	9
2.7	Exemplo de um volume de controle típico do método de volumes finitos. [12]	10
3.1	Elemento infinitesimal de fluido. Figura adaptada de [4].	12
3.2	Tensões Atuantes em um elemento infinitesimal de fluido. Adaptada de [4].	13
3.3	Comportamento aleatório do fluido. Figura adaptada de [4]	14
4.1	Aerofólio AH-93-W-215	18
4.2	Modelagem do aerogerador	19
4.3	Domínio 1.	20
4.4	Domínio 2.	20
4.5	Domínio 3.	21
4.6	Condições de contorno aplicadas no problema estudado.	22
4.7	Malha 1	23
4.8	Malha 2	24
4.9	Malha 3	25
4.10	Malha 4	26
4.11	Malha 5	27
4.12	Detalhe da malha na região próxima ao bordo de ataque do aerofólio.	28
4.13	Detalhe da malha na região próxima ao bordo de fuga do aerofólio.	29
4.14	Malha 1 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	30

4.15	Malha 2 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	30
4.16	Malha 3 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	31
4.17	Malha 4 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	31
4.18	Malha 5 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	32
4.19	Malha 1 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	33
4.20	Malha 2 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	33
4.21	Malha 3 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	34
4.22	Malha 4 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	34
4.23	Malha 5 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	35
4.24	Malha 1 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	36
4.25	Malha 2 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	36
4.26	Malha 3 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	37
4.27	Malha 4 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	37
4.28	Malha 5 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)	38
4.29	Malha 1 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	39
4.30	Malha 2 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	39
4.31	Malha 3 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	40
4.32	Malha 4 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	40
4.33	Malha 5 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	41
4.34	Malha 1 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	42
4.35	Malha 2 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	42
4.36	Malha 3 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	43
4.37	Malha 4 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	43
4.38	Malha 5 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	44
4.39	Malha 1 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	45
4.40	Malha 2 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	45
4.41	Malha 3 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	46
4.42	Malha 4 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	46
4.43	Malha 5 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)	47
4.44	Malha 1 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)	48
4.45	Malha 2 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)	48
4.46	Malha 3 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)	49
4.47	Malha 4 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)	49
4.48	Malha 5 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)	50
4.49	Malha 1 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)	51
4.50	Malha 2 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)	51
4.51	Malha 3 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)	52
4.52	Malha 4 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)	52
4.53	Malha 5 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)	53

4.54	Malha 1 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)	54
4.55	Malha 2 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)	54
4.56	Malha 3 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)	55
4.57	Malha 4 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)	55
4.58	Malha 5 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)	56
4.59	Linhas de corrente ao redor de uma das pás do aerogerador.	58
4.60	Pressão ao redor do aerofólio.	58
4.61	Velocidade ao redor do aerofólio.	59
4.62	Domínio 2: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$	60
4.63	Domínio 3: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$	60
4.64	Domínio 2: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$	61
4.65	Domínio 3: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$	62
4.66	Domínio 2: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$	62
4.67	Domínio 3: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$	63
4.68	Domínio 2: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$	64
4.69	Domínio 3: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$	64
4.70	Domínio 2: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$	65
4.71	Domínio 3: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$	66
4.72	Domínio 2: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$	66
4.73	Domínio 3: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$	67
4.74	Domínio 2: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo SST	68
4.75	Domínio 3: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo SST	68
4.76	Domínio 2: Pressão no aerogerador - Modelo SST	69
4.77	Domínio 3: Pressão no aerogerador - Modelo SST	70
4.78	Domínio 2: Velocidade no aerogerador - Modelo SST	70
4.79	Domínio 3: Velocidade no aerogerador - Modelo SST	71
5.1	Perfis de aerofólio.	74
5.2	Linhas de corrente - NACA 4415	75
5.3	Pressão - NACA 4415	76
5.4	Velocidade - NACA 4415	76
5.5	Linhas de corrente ao redor de uma das pás - NACA 4415	77
5.6	Pressão ao redor do aerofólio - NACA 4415	77
5.7	Velocidade ao redor do aerofólio - NACA 4415	78
5.8	Linhas de corrente - NASA LS(1)-0417	79
5.9	Pressão - NASA LS(1)-0417	79
5.10	Velocidade - NASA LS(1)-0417	80
5.11	Linhas de corrente ao redor de uma das pás - NASA LS(1)-0417	81
5.12	Pressão ao redor do aerofólio - NASALS(1)-0417	81

5.13	Velocidade ao redor do aerofólio - NASA LS(1)-0417	82
5.14	Linhas de corrente - NREL S809	83
5.15	Pressão - NREL S809	83
5.16	Velocidade - NREL S809	84
5.17	Linhas de corrente ao redor de uma das pás - NREL S809	85
5.18	Pressão ao redor do aerofólio - NREL S809	85
5.19	Velocidade ao redor do aerofólio - NREL S809	86
5.20	Linhas de corrente - Aerogerador com maiores dimensões	89
5.21	Pressão - Aerogerador com maiores dimensões	89
5.22	Velocidade - Aerogerador com maiores dimensões	90
5.23	Linhas de corrente - Aerogerador com menores dimensões	91
5.24	Pressão - Aerogerador com menores dimensões	91
5.25	Velocidade - Aerogerador com menores dimensões	92
5.26	Linhas de corrente - 0,1 segundo	95
5.27	Pressão - 0,1 segundo	95
5.28	Velocidade - 0,1 segundo	96
5.29	Linhas de corrente - 0,2 segundos	97
5.30	Pressão - 0,2 segundos	97
5.31	Velocidade - 0,2 segundos	98
5.32	Linhas de corrente - 0,3 segundos	99
5.33	Pressão - 0,3 segundos	99
5.34	Velocidade - 0,3 segundos	100

Lista de Tabelas

4.1	Quantidade de nós e elementos por malha	23
4.2	Torques no aerogerador calculados para cada malha	56
4.3	Torques no aerogerador calculados para cada dominio	71
4.4	Tempo de processamento para cada simulação	72
5.1	Torque no aerogerador com diferentes perfis de aerofólios	86
5.2	Potência no aerogerador com diferentes perfis de aerofólios	87
5.3	Parâmetros do movimento do aerogerador com diferentes perfis de aerofólios	88
5.4	Torque no aerogerador com diferentes dimensões	92
5.5	Potência e coeficiente de potência do aerogerador com diferentes di- mensões	93
5.6	Parâmetros do movimento do aerogerador com diferentes dimensões .	94
5.7	Torque no aerogerador em cada passo de tempo	100

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar, resumidamente, como e por que será realizado este trabalho. Assim, primeiramente, será feita uma contextualização para que seja possível um melhor entendimento sobre o tema. Além disso, será apresentado o que motivou a realização deste trabalho e, finalmente, serão apresentados o objetivo e a estrutura deste trabalho.

1.1 Contextualização

Os aerogeradores são, basicamente, turbinas que convertem a energia cinética proveniente dos ventos em energia elétrica. Seu funcionamento consiste em pás acopladas a um eixo que, por sua vez, está acoplado a um gerador elétrico, que são movimentadas devido à força que o vento aplica sobre elas. Assim, como a operação depende da força do vento, afirma-se que o aerogerador é uma fonte de energia renovável.

As turbinas eólicas são classificadas de acordo com a disposição dos seus eixos, existindo, assim, dois tipos de turbinas: de eixo vertical e de eixo horizontal. Dentre as diferenças entre os dois modelos, vale destacar a maior eficiência por parte da turbina de eixo horizontal, fazendo com que ela seja mais popular.

O aerogerador de eixo horizontal é composto por quatro elementos principais: as pás, o cubo, o gerador e a torre. As pás são responsáveis pela captação do vento, o cubo pela fixação das pás e pela transmissão da energia captada pelas pás, o gerador pela transformação da energia mecânica fornecida pelo cubo em energia elétrica e a torre pela sustentação de todo o equipamento.

1.2 Motivação

O cenário mundial atual é de uma demanda de energia cada vez maior, conflitando com a necessidade da diminuição do uso de fontes de energia fósseis. Diante disso, surgiu uma tendência de busca por fontes de energia renováveis.

A energia eólica, conseqüentemente, vem ganhando maior importância na atualidade. Assim, há um aumento no investimento no estudo da performance de turbinas eólicas, visando obter maiores eficiências.

Existem diversas formas para melhorar a eficiência das turbinas, entretanto, no presente trabalho, será estudada, especificamente, a influência da pá na performance do aerogerador.

1.3 Objetivo

O presente trabalho possui como objetivo desenvolver uma metodologia para estudar os aerogeradores. Para isso, devido à complexidade do problema, métodos computacionais são utilizados.

Nesse cenário, conseguindo-se obter resultados suficientemente aderentes com a realidade, será possível aprimorar os aerogeradores tornando-os mais eficientes energeticamente, além de apresentar uma relação custo-benefício maior.

Finalmente, é possível concluir que esse trabalho pode trazer grandes benefícios tecnológicos e, assim, possibilitar um aumento da produção de energia, ampliando ainda mais o uso da energia renovável.

1.4 Estrutura

O presente trabalho é dividido da seguinte forma: primeiramente será apresentada a base teórica e matemática utilizada para a realização deste trabalho, ou seja, os conceitos que serão utilizados para desenvolver os estudos do projeto de graduação. Em segundo lugar, será descrita a metodologia, contendo detalhadamente todas as etapas realizadas e suas respectivas motivações. Após a metodologia, serão mostrados os resultados e o que estes resultados representam. Finalmente, na conclusão, todo o estudo será debatido, obtendo-se respostas e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo é apresentada toda a base teórica que será utilizada para a realização deste trabalho. Assim, livros com os fundamentos teóricos necessários e trabalhos com objetivos similares ao deste foram consultados a fim de que fosse possível obter melhores resultados.

2.1 Aerogeradores

Os aerogeradores podem ser classificados de duas formas diferentes levando-se em consideração a disposição dos seus eixos de rotação. Assim, as turbinas eólicas são classificadas como turbinas de eixo horizontal (HAWT) e turbinas de eixo vertical (VAWT).

As turbinas VAWT são aquelas cujo eixo de rotação encontra-se posicionado transversalmente à velocidade do vento. A principal vantagem desse tipo de turbina eólica é o fato de que a direção do vento não afeta seu desempenho. Entretanto, as potências obtidas com elas são baixas quando comparadas com as turbinas horizontais e, conseqüentemente, elas não são os modelos mais utilizados.

A figura 2.1 apresenta um modelo típico de uma turbina VAWT. Componentes típicos deste equipmaneto e suas dimensões principais também estão representados na figura.

As turbinas HAWT, por sua vez, possuem o seu eixo de rotação posicionado em paralelo à velocidade do vento. Estas são as turbinas mais comuns e que serão o objeto de estudo deste trabalho.

A figura 2.2 apresenta um modelo típico de uma turbina HAWT, indicando seus principais componentes. A pá é responsável por captar a energia do vento e transformá-la em energia cinética, através da força de sustentação que o vento causará nela. O cubo é responsável pela fixação das pás além da transmissão da energia captada por elas. A nacelle é um compartimento com a função de abrigar componentes necessários para o funcionamento do aerogerador, e entre estes componentes,

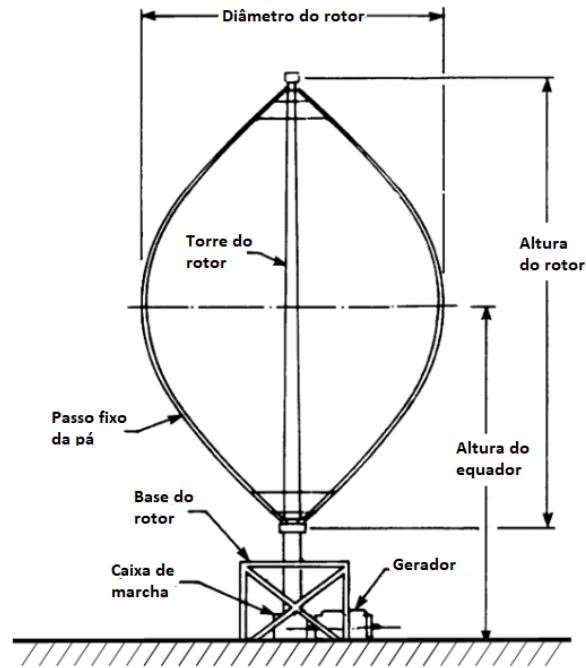


Figura 2.1: Representação de uma turbina VAWT típica. Adaptada de [1].

encontra-se o gerador elétrico, responsável pela conversão da energia cinética para energia elétrica. A torre é responsável pela sustentação de toda a estrutura.

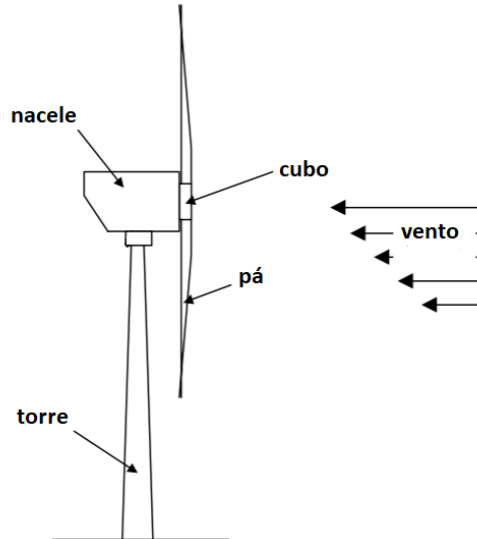


Figura 2.2: Representação de uma turbina HAWT típica. Adaptada de [2].

As turbinas HAWT podem possuir diversos tamanhos. Elas variam de pequenas turbinas com rotores com menos de 1 metro de diâmetro instaladas em residências até grandes turbinas com 150 metros voltadas para o abastecimento de energia elétrica de cidades.

Os aerogeradores HAWT também podem ser construídos com diferentes configurações de número de pás. Há turbinas construídas com apenas uma pá, com duas

pás, com três pás e com múltiplas pás, conforme mostrado na figura 2.3. Nesse sentido, um menor número de pás teoricamente gera uma maior eficiência, entretanto, um número reduzido de pás pode gerar instabilidade. Assim, a configuração tripá é a mais utilizada por ser, na maioria dos casos, a configuração mais eficiente e que não proporcionará danos a estrutura.

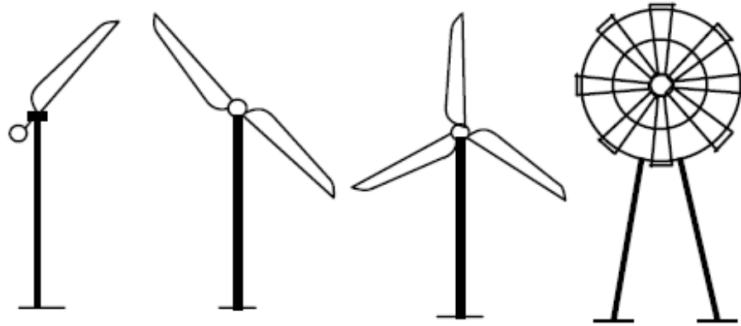


Figura 2.3: Turbinas com diferentes quantidades de pás. [3]

Além disso, estas pás podem estar localizadas de maneiras diferentes, conforme 2.4. Elas podem estar localizadas de tal forma que o vento atinja as pás antes de atingir a torre, configuração denominada como upwind, ou com o vento atingindo as pás depois de atingir a torre, denominado como downwind.

A principal vantagem do modelo com as pás atrás da torre é o fato dessa configuração não necessitar de um mecanismo responsável pela orientação do rotor, visto que esse ajuste é realizado automaticamente. Entretanto, a configuração com as pás a montante é a mais utilizada por normalmente apresentar uma maior eficiência.

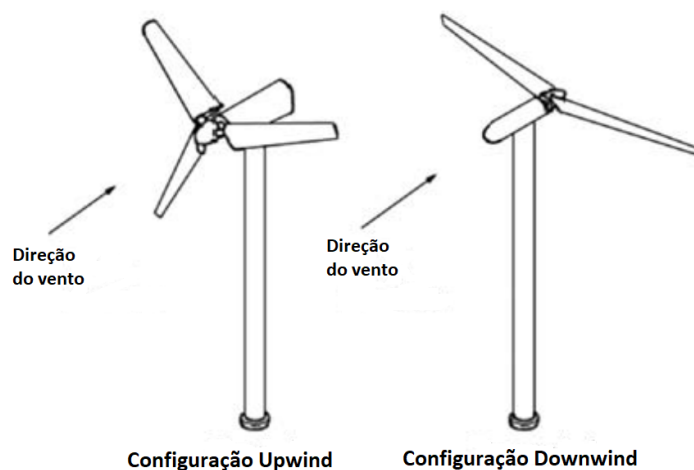


Figura 2.4: Turbinas com diferentes configurações de posição das pás. Adaptada de [3].

A força de sustentação é a principal responsável pelo movimento de rotação do

aerogerador e, portanto, tem grande importância para o seu desempenho. Assim, sabe-se que, entre outros fatores, a geometria da pá influencia na força de sustentação e, portanto, é essencial para um bom funcionamento deste equipamento.

2.2 Dinâmica dos Fluidos Computacional

Segundo [4], a dinâmica dos fluidos computacional, mais conhecida como CFD, que é a sigla para *Computational Fluid Dynamics*, é o estudo de sistemas que envolvem o fluxo de fluidos, transferência de calor entre outros fenômenos relacionados através de simulações computacionais.

O CFD é uma técnica bastante poderosa que é utilizada amplamente na indústria. A sua principal vantagem reside no fato de que essa técnica permite que seja possível obter resultados sem precisar da realização de testes que seriam mais custosos. Nesse sentido, diversos trabalhos com o intuito de simular o comportamento aerodinâmico de aerogeradores já foram realizados utilizando essa metodologia.

HARTWANGER e HORVAT [5] tiveram como objetivo desenvolver métodos de CFD que sejam capazes de simular adequadamente um escoamento 3D em um aerogerador. Para isso, realizou-se uma análise através do software XFOIL e outras duas análises em CFD no software ANSYS CFX, sendo uma análise mais refinada e, conseqüentemente, demandando maior gasto computacional, e outra menos refinada.

Para realizar a análise no CFX, definiu-se uma malha mais refinada ao redor da turbina e uma outra malha menos refinada na área mais distante da turbina. Finalmente, comparou-se os resultados obtidos pelos três métodos com dados obtidos através de testes realizados em um túnel de vento.

LAURSEN et al [6] apresentou os resultados de análises tridimensionais em CFD de um aerogerador. Para esse caso, foram considerados que o vento estava em regime estacionário sem que haja forças de cisalhamento devido ao vento e se utilizou o software ANSYS CFX.

Para este problema, dois modelos diferentes foram utilizados para a simulação, um modelo totalmente turbulento e um modelo transiente. Assim, após realizar essas simulações, comparou-se estes resultados com os resultados obtidos através de outros métodos (Ellipsys e Xblade) e com os resultados obtidos através de testes em um túnel de vento, sendo possível confirmar a validade dos métodos e suas limitações.

OKITA [7] teve como objetivo projetar um aerogerador de eixo horizontal e otimizá-lo, através da mudança da geometria de suas pás e da mudança do modo de operação, a fim de obter uma maior eficiência. Para tal, foi desenvolvido um algoritmo utilizando o software Matlab e aplicando o Método do Momento no Elemento de Pá com seus respectivos fatores de correção (Prandtl e Spera).

Dessa maneira, utilizando esse algoritmo, foi possível avaliar o coeficiente de potência para diferentes perfis aerodinâmicos escolhidos. Diferentes modos de operação, que são o modo de operação com velocidade angular constante e com razão de velocidade da ponta de pá constante, também foram avaliados.

SUMMER e WATTERS e MASSON [8] apresentaram o desenvolvimento do CFD aplicado no estudo do escoamento em turbinas eólicas horizontais. Primeiramente, simplificava-se para um escoamento em duas dimensões. Entretanto, esse modelo não era completamente aderente à realidade, sendo necessário, assim, o desenvolvimento do estudo de escoamento tridimensionais.

Para o caso tridimensional, existiam fatores limitantes, como, por exemplo, a turbulência. Dessa maneira, ao longo dos anos, diferentes métodos foram desenvolvidos a fim de conseguir realizar simulações mais coerentes com a realidade, sendo estes métodos apresentados resumidamente nesse artigo.

PLECH e TOFANELI e OLIVEIRA [9] tiveram como objetivo fazer uma análise de perfis aerodinâmicos para aplicação em turbinas eólicas a fim de obter os coeficientes de arrasto, sustentação, distribuição da pressão e a comparação da eficiência dos mesmos com a literatura. Para a realização dessas análises, foi utilizado o software ANSYS CFX e o modelo de turbulência SST.

Dessa maneira, realizando simulações de um escoamento 2D, foi possível obter os parâmetros mencionados para diferentes ângulos de ataque e números de Reynolds. Os resultados obtidos foram tido como satisfatórios em comparação com os resultados da literatura.

PIRES e OLIVEIRA [10] apresentaram um estudo para aerogerador de pequeno porte projetado para uso residencial. Primeiramente, estudou-se os aspectos aerodinâmicos da pá do rotor. Para esse fim, foi utilizado o software JavaFoil, que, a princípio, tem como função analisar perfis de asas para modelos de aeronaves, mas, como alguns conceitos de aerodinâmica aplicados para perfis de asas de aviões podem ser aplicados nas pás para aerogeradores, também pode ser utilizado nesse estudo.

Nesse caso, o perfil escolhido com a ajuda do JavaFoil foi o MH110. A partir deste perfil, foi possível obter os coeficientes de sustentação e de arrasto para diferentes ângulos de ataque, o comprimento de pá, a corda da pá e a torção.

Assim, utilizando estes parâmetros, aplica-se uma simulação 3D dos esforços nas pás para diferentes velocidades de vento. Para que fosse possível realizar essa simulação, utilizou-se o software Rhinoceros 3D para o modelo da pá e o software Abaqus para os cálculos dos esforços na pá.

NAMIRANIAN [3] simulou o comportamento dos ventos em uma turbina eólica existente com uma potência de 5MW, uma das maiores do mundo, e o comportamento da estrutura da turbina. Para isso, foi utilizado o software ANSYS CFX para

simular o comportamento do escoamento ao redor da turbina.

A simulação foi feita considerando dois domínios, um domínio cilíndrico ao redor do rotor do aerogerador e um outro domínio muito maior e que continha o primeiro domínio. Na simulação foi considerado que o primeiro domínio estava rotacionando na mesma velocidade angular que a velocidade de operação do aerogerador, enquanto o segundo domínio foi considerado como estacionário.

Após realizar a simulação do escoamento de ar, aplicou-se as informações obtidas nesta primeira simulação em relação as forças atuantes na turbina devido ao vento para simular o comportamento mecânico da estrutura. Assim, foi possível obter os esforços e deformações da turbina eólica.

RODRÍGUEZ et al [11] se propuseram a simular uma turbina de 2 MW e, assim, obter sua curva de potência. Neste trabalho, foi realizada uma simulação considerando dois domínios, um domínio rotacionando englobando o rotor e um outro domínio maior, estacionário e que estava englobando o outro domínio.

Simulou-se o comportamento do sistema para diferentes velocidades de vento. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos, foi possível gerar a curva de potência deste aerogerador e compará-la com a curva de potência fornecida pelo fabricante.

2.3 Métodos Numéricos

Neste capítulo, os principais métodos numéricos são apresentados e descritos de acordo com [12].

2.3.1 Diferenças Finitas

O método de diferenças finitas é o método numérico mais antigo e o que possui uma compreensão mais fácil. O método consiste em discretizar o domínio em uma malha de nós, onde, em cada nó, as derivadas da equação matemática são aproximadas em torno deste nó e dos nós vizinhos, através da expansão em série de Taylor. Assim, obtém-se uma equação algébrica para cada nó.

Esse método possui como principal vantagem a sua simplicidade. Entretanto, torna-se difícil, e, portanto, inviável, a sua aplicação em geometrias complexas. Dessa maneira, a restrição para geometrias simples, como exemplificado na Figura 2.5, aliada com o fato de que ele não garante a conservação, são suas principais desvantagens.

2.3.2 Elementos Finitos

O método de elementos finitos consiste na discretização do domínio em elementos finitos, normalmente triângulos e quadriláteros para malhas bidimensionais e

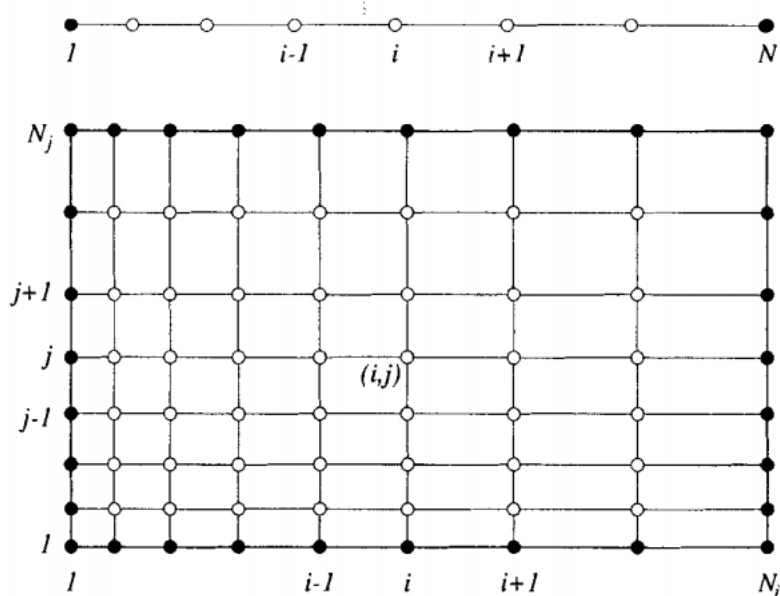


Figura 2.5: Exemplo de malha unidimensional e bidimensional típicas do método de diferenças finitas. [12]

tetraedros e hexaedros para malhas tridimensionais. Nesse método, as equações são multiplicadas por uma função de forma antes de serem integradas através do domínio.

A principal vantagem do método de elementos finitos em relação ao método de diferenças finitas é a capacidade do método de representar geometrias complexas. Um exemplo de geometria complexa que é representada através de uma malha não-estruturada é mostrado na Figura 2.6.

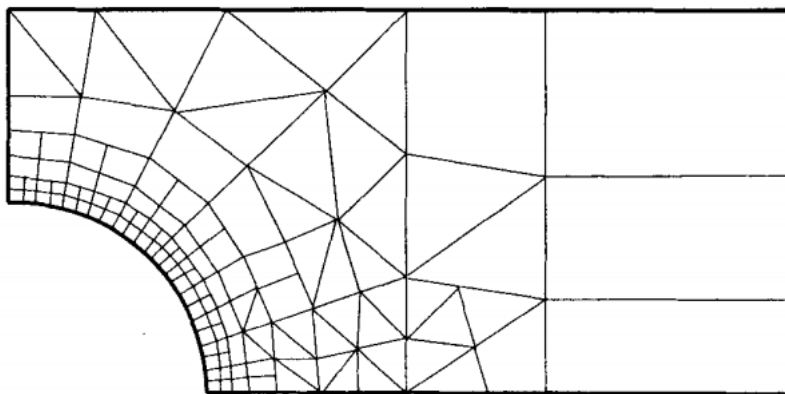


Figura 2.6: Exemplo de uma malha não-estruturada que pode ser utilizada no método de elementos finitos. [12]

2.3.3 Volumes Finitos

O método de volumes finitos consiste na discretização do domínio em um número finito de volumes de controle onde calcula-se a integral das equações de conservação sobre cada volume. Dessa forma, o centróide de cada volume de controle será considerado um nó computacional, armazenando os resultados obtidos.

Esse método, ao contrário dos outros métodos mencionados, utiliza-se apenas de conceitos físicos, fazendo com que seja de maior facilidade de compreensão para engenheiros em geral. Além disso, a sua principal vantagem reside no fato de que este método garante que as equações de conservação sejam respeitadas, o que é de grande importância nos problemas de dinâmica dos fluidos.

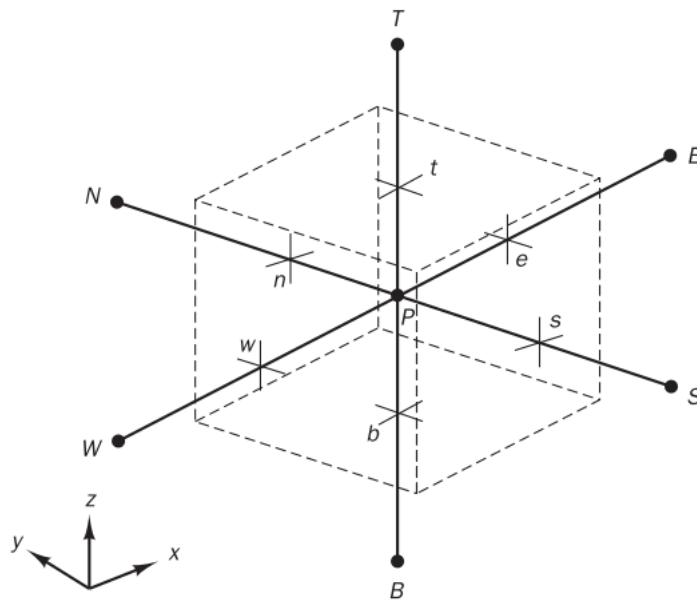


Figura 2.7: Exemplo de um volume de controle típico do método de volumes finitos. [12]

A Figura 2.7 apresenta um exemplo típico de volume de controle do método de volumes finitos. Neste caso, a forma integral das equações de conservação serão resolvidas para esse volume e os seus resultados serão apresentados no ponto P .

Capítulo 3

Modelo Matemático

Nesse capítulo serão apresentadas as equações matemáticas que serão utilizadas para a resolução do problema em questão.

3.1 Equações de Conservação

Na área da mecânica dos fluidos, as equações de conservação são muito utilizadas para estudar diferentes casos. São três essas equações de conservação:

- Conservação de massa;
- Conservação da quantidade de movimento;
- Conservação de energia.

No presente estudo, a equação de conservação de energia não é utilizada. Assim, a equação de conservação de massa e da quantidade de movimento são explicadas conforme [13].

3.1.1 Conservação de massa

A lei de conservação de massa estabelece que a massa de um sistema fechado é constante, ou seja, a taxa de variação mássica é nula. Assim, a fim de obter a equação diferencial da conservação de massa de um fluido, aplica-se a lei de conservação de massa em um elemento infinitesimal de fluido, representado na figura 3.1.

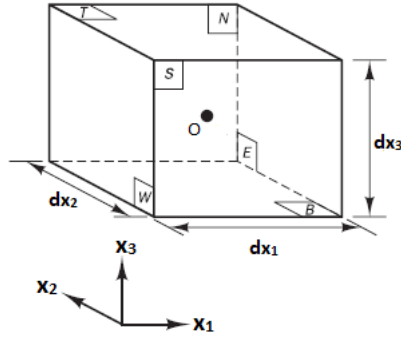


Figura 3.1: Elemento infinitesimal de fluido. Figura adaptada de [4].

Dessa forma, analisando o fluxo de massa nas paredes deste elemento e a geração de massa no seu interior, utiliza-se a expansão por série de Taylor para obter a equação de conservação de massa para um fluido incompressível:

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.1)$$

Onde ρ é a massa específica, t é o tempo, u o vetor velocidade e x é a direção.

3.1.2 Conservação da quantidade de movimento

A conservação da quantidade de movimento é descrita pela segunda Lei de Newton, que diz que a taxa de variação de momento é igual ao somatório de forças atuantes. As forças atuantes são classificadas como forças de campo e forças de superfícies, e, no caso em estudo, admite-se que a única força de campo atuante é a da gravidade e que as forças de superfícies são decorrentes da pressão e das tensões cisalhantes.

Considerando um elemento infinitesimal de fluido, observa-se a presença das tensões atuando nesse elemento infinitesimal conforme a figura 3.2.

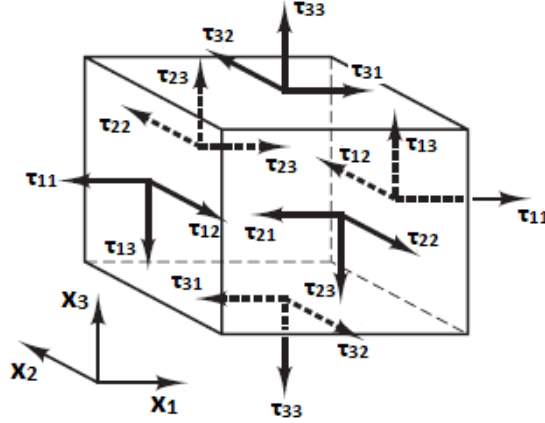


Figura 3.2: Tensões Atuantes em um elemento infinitesimal de fluido. Adaptada de [4].

Assim, baseando-se na segunda Lei de Newton e utilizando a expansão por série de Taylor, é possível obter as equações diferenciais de conservação da quantidade de movimento para um fluido incompressível representada em forma de índice através da equação 3.2

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

Onde ρ é a massa específica, u é o vetor velocidade, g é a força da gravidade e τ é o tensor de tensões atuante no fluido.

Um caso específico de grande importância para a mecânica dos fluidos é quando o fluido é Newtoniano e com viscosidade constante. Nesse caso, simplifica-se a equação 3.2, obtendo, assim, as equações de Navier-Stokes.

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) \quad (3.3)$$

Onde p é a pressão atuante no fluido e μ é a viscosidade.

3.2 Turbulência

De acordo com [14], a turbulência é definida como um estado de escoamento do fluido no qual as variáveis instantâneas, como velocidade e temperatura, exibem flutuações irregulares e aparentemente aleatórias de tal maneira que, na prática, as propriedades do escoamento só podem ser medidas de forma estatística. Dessa forma, a presença de turbulência nos escoamentos dificulta seu estudo.

É importante destacar que, em consequência das flutuações, há um maior transporte de quantidade de movimento, calor e massa no escoamento turbulento. Além disso, estes escoamentos são sempre dissipativos, necessitando, assim, de uma ali-

mentação contínua de energia para suprir suas perdas energéticas.

Muitas teorias e conceitos têm sido formulados visando obter uma descrição geral para a turbulência, entretanto, tal descrição ainda não foi encontrada, e há dúvidas se algum dia será. A complexidade da turbulência, portanto, não permite uma abordagem estritamente analítica e, dessa maneira, qualquer simplificação é bastante vantajosa no ponto de vista físico, matemático e numérico.

3.2.1 Equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (RANS)

Como foi apresentado neste capítulo, a turbulência é caracterizada pela aleatoriedade de suas propriedades, representado na figura 3.3, o que torna inviável uma solução completamente analítica para escoamentos turbulentos. Diante disso, [15] utiliza análises estatísticas para representar as propriedades da turbulência.

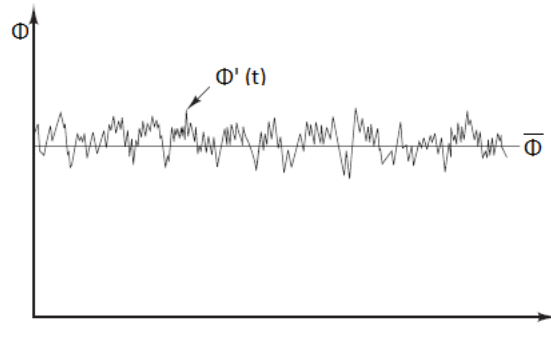


Figura 3.3: Comportamento aleatório do fluido. Figura adaptada de [4]

Em um escoamento turbulento, considerando uma propriedade Φ que possui um comportamento aleatório, pode-se decompô-la em dois termos como na equação 3.4.

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (3.4)$$

Deve-se notar que o primeiro termo da equação 3.4 é referente à média da propriedade e o segundo se refere às flutuações derivadas da característica aleatória da turbulência.

Para o caso que está sendo estudado, as propriedades que devem ser decompostas são a velocidade, nas direções u , v e w , e a pressão. Assim, decompondo esses termos nas equações de conservação de massa e da conservação de momento, obtém-se as equações médias de Reynolds.

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3.6)$$

3.2.2 Modelo Duas Equações

De acordo com [16] o modelo de duas equações consiste, basicamente, na resolução de duas equações diferenciais a fim de tentar descrever o comportamento do escoamento turbulento. Nesse caso, são utilizadas as equações de transporte para calcular a velocidade característica e o comprimento característico da turbulência. Atualmente, esse modelo é bastante utilizado em simulações pelo fato de proporcionar uma boa relação entre o custo computacional exigido e a acurácia dos resultados obtidos.

Nesse presente trabalho serão apresentados os modelos de duas equações $\kappa - \varepsilon$, $\kappa - \omega$ e SST. Os três modelos relacionam as tensões de Reynolds com os gradientes de velocidade e os comprimentos característicos de turbulência. Além disso, também é possível modelar a viscosidade turbulenta como o produto da velocidade e do comprimento de turbulência.

Modelo $\kappa - \varepsilon$

Nesse modelo, κ representa a energia cinética de turbulência. Importante notar que a energia cinética de turbulência possui dimensão ($L^2 T^{-2}$). Ademais, ε consiste na dissipação de energia turbulenta, que é definida como a taxa na qual a velocidade das flutuações é dissipada. Essa dissipação possui dimensão ($L^2 T^{-3}$).

A velocidade característica é obtida a partir da energia cinética e o comprimento característico a partir de duas propriedades da turbulência, que, nesse caso, são a energia cinética turbulenta e a dissipação de energia turbulenta. Tanto κ quanto ε são obtidos através de equações de transporte. Essas equações aparecem a seguir:

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_j \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \rho \varepsilon \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_j \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} P_\kappa - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.8)$$

Onde ρ é a massa específica, κ é a energia cinética de turbulência, ε é a taxa de dissipação da energia turbulenta, \bar{u}_j é a velocidade, μ é a viscosidade, μ_t é a viscosidade turbulenta, P_κ é a produção de turbulência causada pelas forças viscosas e forças de flutuabilidade. As constantes $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_κ e σ_ε são, respectivamente, iguais a 1,44, 1,92, 1,0 e 1,3.

Modelo $\kappa - \omega$

Esse modelo segue a mesma lógica do modelo $\kappa - \varepsilon$, só que, nesse caso, a dissipação de energia turbulenta (ε) é substituída pela frequência de dissipação (ω), que possui dimensão (T^{-1}). A vantagem principal do modelo $\kappa - \omega$ em relação ao $\kappa - \varepsilon$ consiste no fato de que esse modelo obtém resultados mais acurados para a região próxima da parede.

Assim, as equações de transporte do modelo $\kappa - \omega$ são:

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_j \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \beta' \rho \kappa \omega \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_j \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{\kappa} P_\kappa - \beta \rho \omega^2 \quad (3.10)$$

Onde ρ é a massa específica, κ é a energia cinética de turbulência, ω é a frequência de dissipação, \bar{u}_j é o vetor velocidade, μ é a viscosidade, μ_t é a viscosidade turbulenta, P_κ é a produção de turbulência causada pelas forças viscosas e forças de flutuabilidade. As constantes β' , β , σ_κ , σ_ω e α são, respectivamente, iguais a 0,09, 0,075, 2, 2 e $\frac{5}{9}$.

Shear Stress Transport (SST)

Segundo [17], foi observado que o modelo $\kappa - \varepsilon$ não apresentava resultados satisfatórios nas zonas próximas a paredes enquanto apresentava os resultados esperados nas zonas mais distante. Da mesma maneira, o modelo $\kappa - \omega$ apresentava resultados mais acurados nas regiões próximas de parede e resultados menos acurados nas regiões mais distantes.

Diante do cenário exposto, foi proposto um novo modelo que combinasse estes dois modelos de tal forma que o modelo $\kappa - \omega$ fosse predominante nas regiões mais próximas a parede e o modelo $\kappa - \varepsilon$ nas regiões mais distantes. Assim, também considerando os efeitos de transporte da tensão cisalhante causada pela turbulência, combinou-se esses dois modelos, obtendo as seguintes equações:

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_j \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \beta' \rho \kappa \omega \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_j \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \nabla \omega \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla \kappa \nabla \omega + \alpha_3 \frac{\omega}{\kappa} P_\kappa - \beta_3 \rho \omega^2 \quad (3.12)$$

Onde ρ é a massa específica, κ é a energia cinética de turbulência, ω é a frequência de dissipação, \bar{u}_j é o vetor velocidade, μ é a viscosidade, μ_t é a viscosidade

turbulenta, P_κ é a produção de turbulência causada pelas forças viscosas e forças de flutuabilidade.

Além disso, F_1 é uma função responsável pela combinação dos modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$. Assim, F_1 deverá ser igual a 1 na região próxima a parede, fazendo com que o modelo $\kappa - \omega$ descreva a turbulência nesta região, e igual a 0 na região afastada da parede, fazendo com que o modelo $\kappa - \varepsilon$ descreva a turbulência. Esta função é apresentada a seguir:

$$F_1 = \tanh(arg_1^4) \quad (3.13)$$

Onde arg_1 é obtido pela seguinte expressão:

$$arg_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\kappa}{CD_{kw}\sigma_{\omega 2} y^2} \right) \quad (3.14)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática e y é a distância da parede. CD_{kw} é obtido com a seguinte fórmula:

$$CD_{kw} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla \kappa \nabla \omega, 10^{-10} \right) \quad (3.15)$$

Os demais termos, com exceção de β' que é igual a 0,09 e $\sigma_{\omega 2}$ que é igual a $\frac{1}{0,856}$, são função de F_1 conforme descrito pelas equações a seguir:

$$\alpha_3 = \frac{5}{9}F_1 + 0,44(1 - F_1) \quad (3.16)$$

$$\beta_3 = 0,075F_1 + 0,0828(1 - F_1) \quad (3.17)$$

$$\sigma_{\kappa 3} = 2F_1 + 1(1 - F_1) \quad (3.18)$$

$$\sigma_{\omega 3} = 2F_1 + \frac{1}{0,856}(1 - F_1) \quad (3.19)$$

Capítulo 4

Método Proposto

Nesse capítulo será descrito o método utilizado neste trabalho. A fim de realizar uma análise CFD do escoamento em um aerogerador, utilizou-se o Ansys CFX 18.1, um software de CFD que usa o método de volumes finitos.

4.1 Geometria

Para este problema adotou-se um aerogerador com 3 pás, já que este é o modelo mais comum. O perfil escolhido inicialmente para as pás do gerador foi o AH-93-W-215, o mesmo utilizado em [9], um perfil utilizado em aerogeradores de médio porte.

Assim, para que fosse possível realizar a modelagem desse perfil, obteve-se as suas coordenadas através do site UIUC Airfoil Data Site. A figura 4.1 apresenta o perfil do aerofólio em questão, gerado através do software Python.

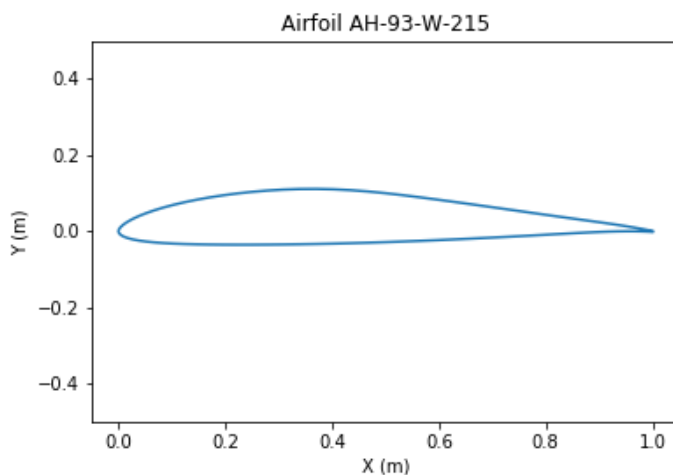


Figura 4.1: Aerofólio AH-93-W-215

Modelou-se as pás com 5 metros de comprimento e o cubo foi modelado com 1

metro de diâmetro. A geometria do aerogerador é apresentada na figura 4.2

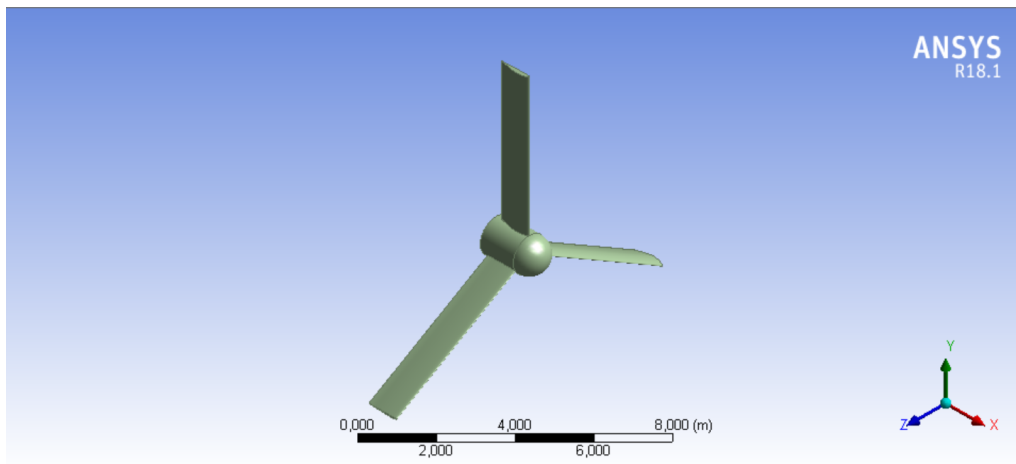


Figura 4.2: Modelagem do aerogerador

É importante dizer que as pás desta turbina foram consideradas com um perfil constante ao longo de toda a pá e sem considerar nenhuma torção por motivos de simplicidade.

Os cálculos, entretanto, serão feitos ao redor do aerogerador, onde o fluido irá escoar, e não no aerogerador em si. Nesse cenário, a geometria que será discretizada e gerará resultados não será a apresentada na figura 4.2.

Para representar o fluido que escoar ao redor do aerogerador, modelou-se um cilindro ao redor do equipamento em estudo. Assim, a geometria discretizada será esse cilindro, onde dentro dele existirá um espaço vazio no formato do aerogerador.

O cilindro que representará o domínio dessa simulação deverá ser suficientemente maior que o aerogerador para que não interfira nos resultados. Por outro lado, quanto maior for o domínio, maior será o custo computacional. Assim, foram estudados três domínios com comprimentos diferentes.

A figura 4.3 apresenta o Domínio 1, que possui 9 metros de comprimento e 20 metros de diâmetro. A distância do aerogerador para a extremidade do domínio localizada a sua montante é de 2 metros, para a extremidade a sua jusante é de 5 metros. Além disso, o aerogerador possui 2 metros de comprimento, totalizando os 9 metros de comprimento do domínio. Finalmente, também é importante dizer que a distância radial entre a extremidade da pá e a extremidade do domínio é de 4,5 metros.

Para o caso de um aerogerador, normalmente estas distâncias são apresentadas se referenciando ao diâmetro do rotor. Assim, sendo D o diâmetro do rotor deste aerogerador, temos que as distâncias serão, aproximadamente, $0,18D$ a montante, $0,45D$ a jusante e $0,4D$ radial.

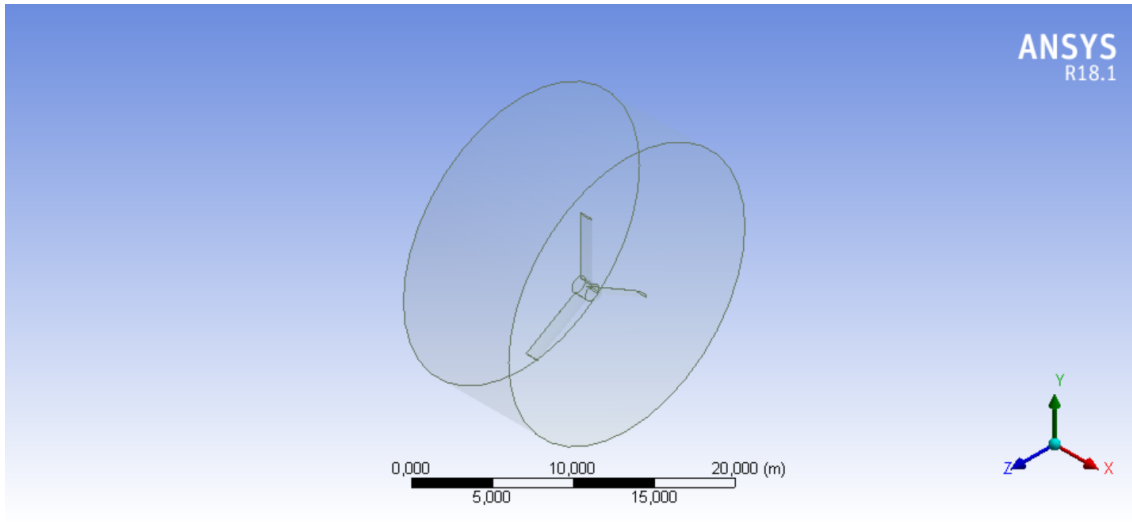


Figura 4.3: Domínio 1.

A figura 4.4 apresenta o Domínio 2, que possui 32 metros de comprimento e 20 metros de diâmetro. A distância do aerogerador para a extremidade do domínio localizada a sua montante e a sua jusante é de 15 metros ou $1,36D$. Além disso, a distância radial entre a extremidade da pá e do domínio é de 4,5 metros ou $0,4D$.

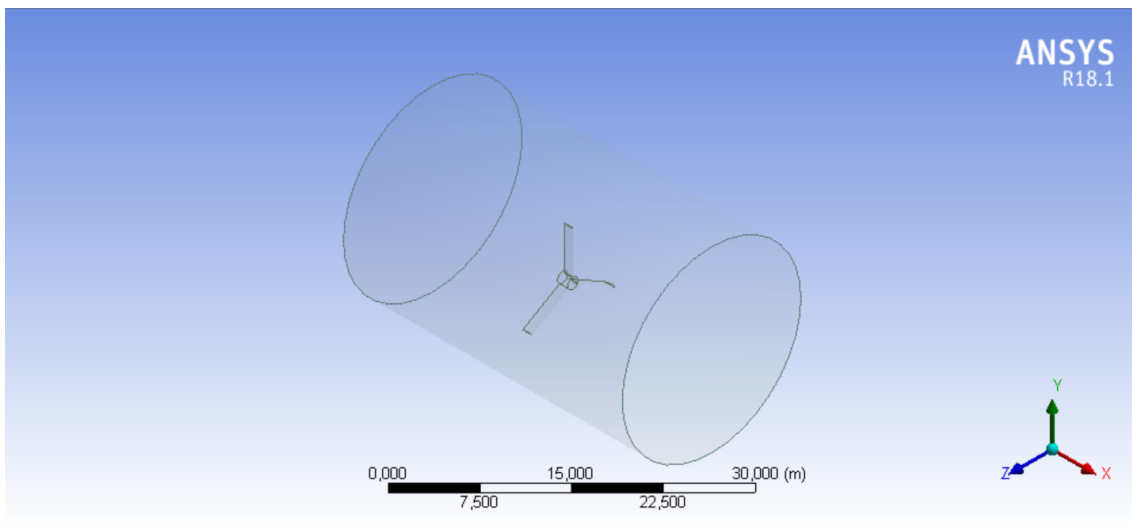


Figura 4.4: Domínio 2.

A figura 4.5 apresenta o Domínio 3, que possui 62 metros de comprimento e 20 metros de diâmetro. A distância do aerogerador para a extremidade do domínio localizada a sua montante e a sua jusante é de 30 metros ou $2,73D$. Além disso, a distância radial entre a extremidade da pá e do domínio é de 4,5 metros ou $0,4D$.

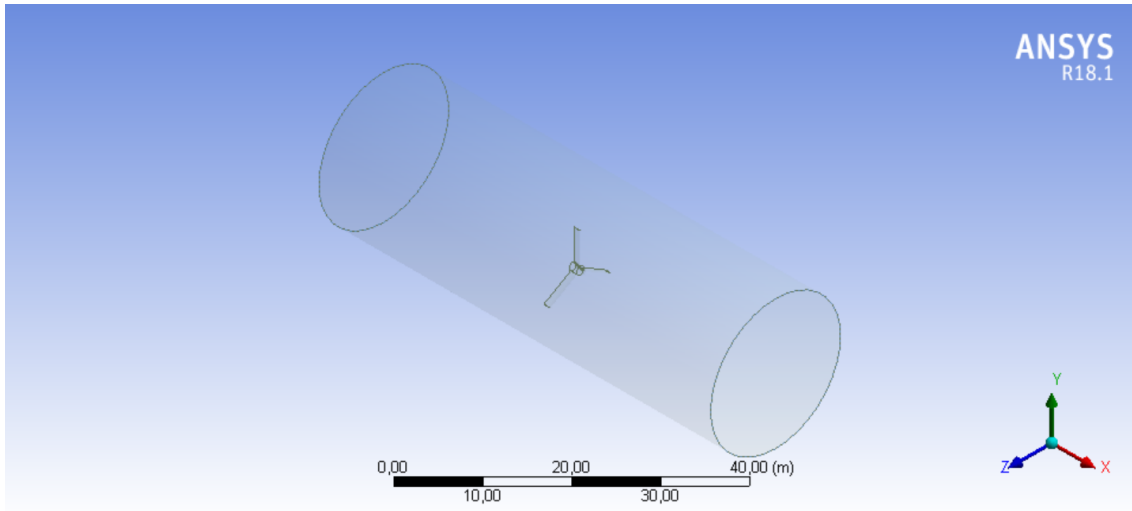


Figura 4.5: Domínio 3.

4.2 Condições do problema

Nessa etapa, define-se as características físicas do problema, a fim de torná-lo o mais próximo possível da realidade, fazendo com que os resultados sejam válidos. Assim, as seguintes condições foram definidas para o escoamento:

- Regime: Estacionário;
- Fluido: Ar a 25 °C;
- Sem transferência de calor;
- Modelo de turbulência: $\kappa - \varepsilon$, $\kappa - \omega$ e SST;
- O aerogerador está sendo considerado como estático.

Além disso, também é importante definir as condições de contorno do problema. As seguintes condições foram aplicadas:

- Entrada: Velocidade de 15 m/s;
- Intensidade de turbulência: 10%
- Saída: Pressão atmosférica;
- Parede do cilindro: Condição de livre deslizamento;
- Aerogerador: Parede sem deslizamento.

A figura 4.6 indica onde foram aplicadas as condições de contorno deste caso. A velocidade do vento e a intensidade de turbulência foram adotadas baseando-se nas características do vento no litoral nordestino, conforme [18].

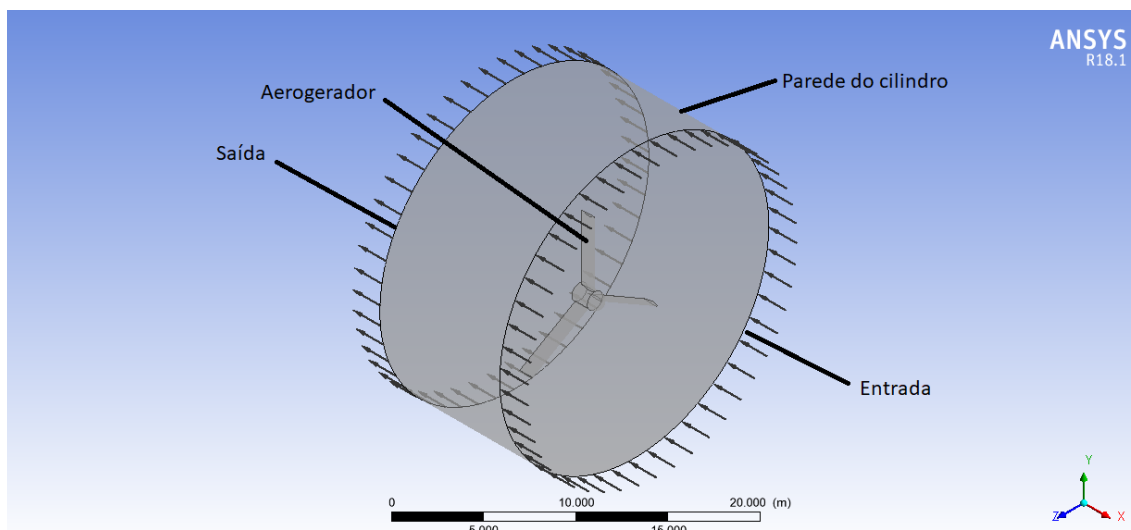


Figura 4.6: Condições de contorno aplicadas no problema estudado.

4.3 Convergência de malha

Para realizar a análise CFD do problema em questão, é preciso discretizar a sua geometria em volumes de controle, formando, assim, sua malha computacional. Essa malha computacional é de grande importância para que se obtenha resultados acurados na simulação.

Nesse cenário, malhas refinadas tendem a gerar resultados mais acurados e, por outro lado, demandam um maior custo computacional. Assim, torna-se necessário realizar um teste de convergência de malha, refinando-se a malha até que os resultados obtidos sejam suficientemente próximos, a fim de obter resultados válidos com o menor custo computacional.

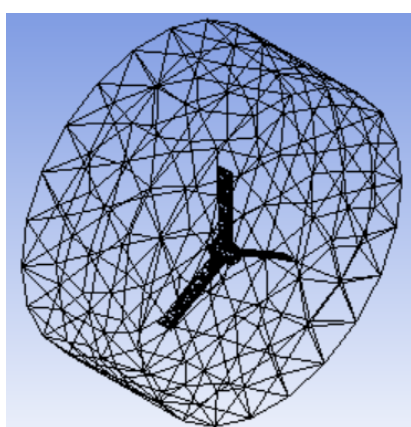
No atual trabalho, serão utilizados como parâmetros para comparação as linhas de corrente, pressão, velocidade e o torque para que seja possível analisar o comportamento do ar escoando ao redor do aerogerador e como ele irá impactar no aerogerador, fazendo com que este rotacione.

Sendo assim, estudou-se cinco malhas diferentes, denominando-se como malha 1 a malha menos refinada e malha 5 a malha mais refinada. Estas malhas foram consideradas para o domínio 1, apresentado anteriormente na figura 4.3. Assim, a tabela 4.1 resume o número de nós e de elementos de cada malha.

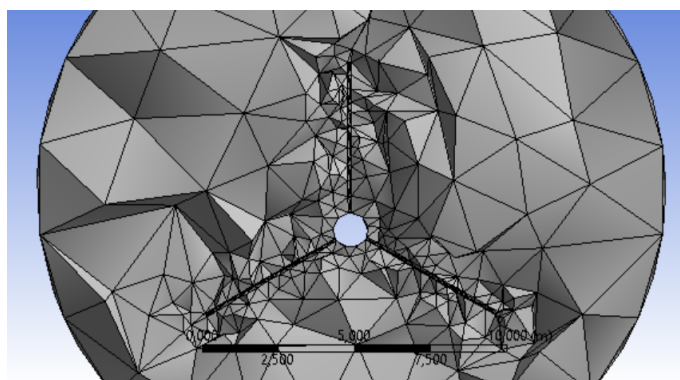
Tabela 4.1: Quantidade de nós e elementos por malha

Malha	Número de Nós	Número de Elementos
1	9.404	45.462
2	92.154	518.926
3	812.646	4.566.463
4	1.320.416	7.535.246
5	1.698.836	9.756.292

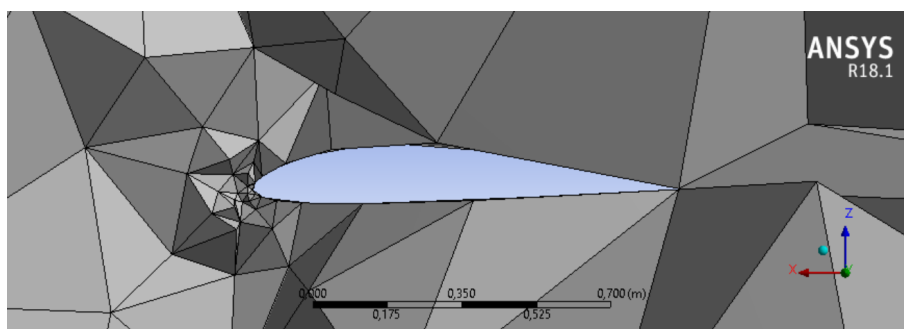
A figura 4.7 apresenta a configuração da malha 1. Ela apresenta três vistas diferentes: uma vista isométrica de todo o domínio, uma vista em corte frontal ao aerogerador e uma outra vista em corte da pá.



(a) Vista isométrica do domínio.



(b) Vista frontal do aerogerador.



(c) Vista do perfil da pá.

Figura 4.7: Malha 1

Sem comparar a malha 1 com as demais, já é possível observar que ela é formada por elementos bem grosseiros na região mais distante do aerogerador. A falta de refinamento desses elementos já pode indicar que ela não fornecerá resultados acurados.

Além disso, era esperado que as regiões próximas ao bordo de ataque, parte da frente do aerofólio, e bordo de fuga, parte de trás, possuíssem uma malha mais refinada para que fosse possível representar da melhor forma sua geometria e o efeito

que ela causará no escoamento. Entretanto, observa-se que no bordo de fuga essa região não existe.

A figura 4.8 apresenta a configuração da malha 2. Ela apresenta três vistas diferentes: uma vista isométrica de todo o domínio, uma vista em corte frontal ao aerogerador e uma outra vista em corte da pá.

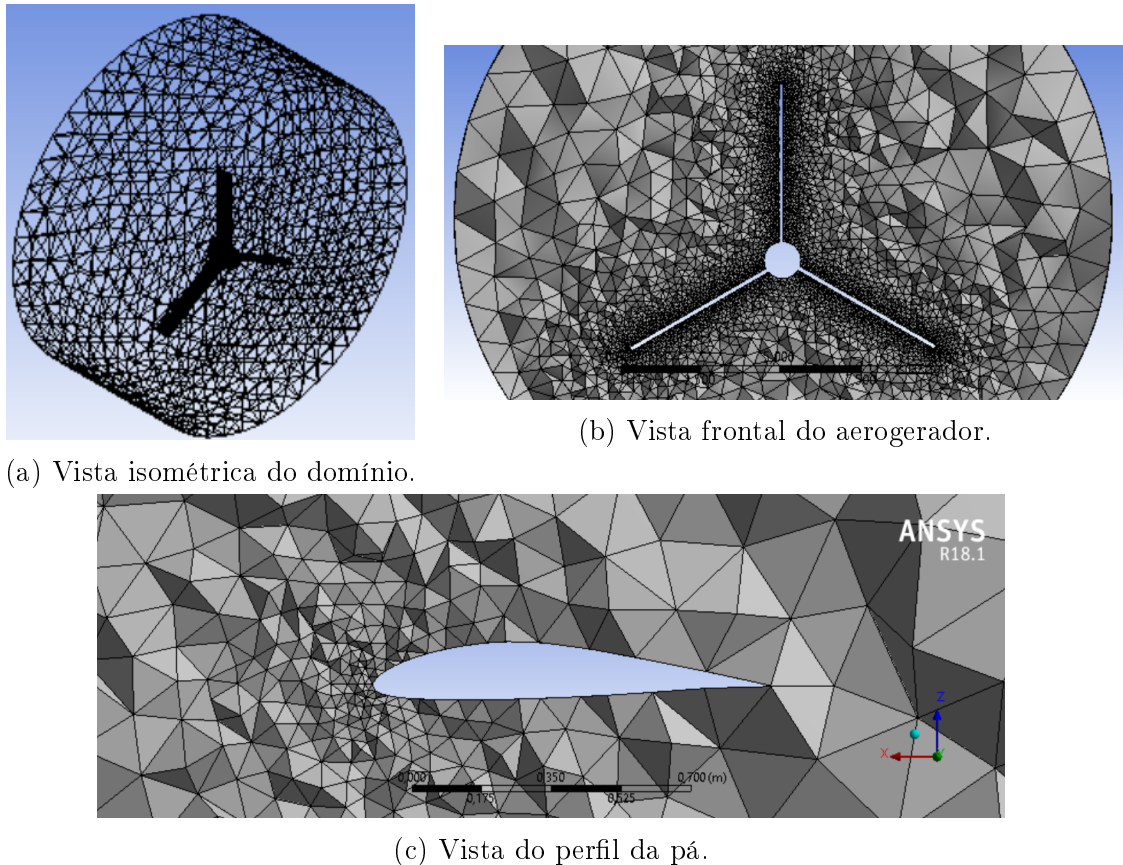


Figura 4.8: Malha 2

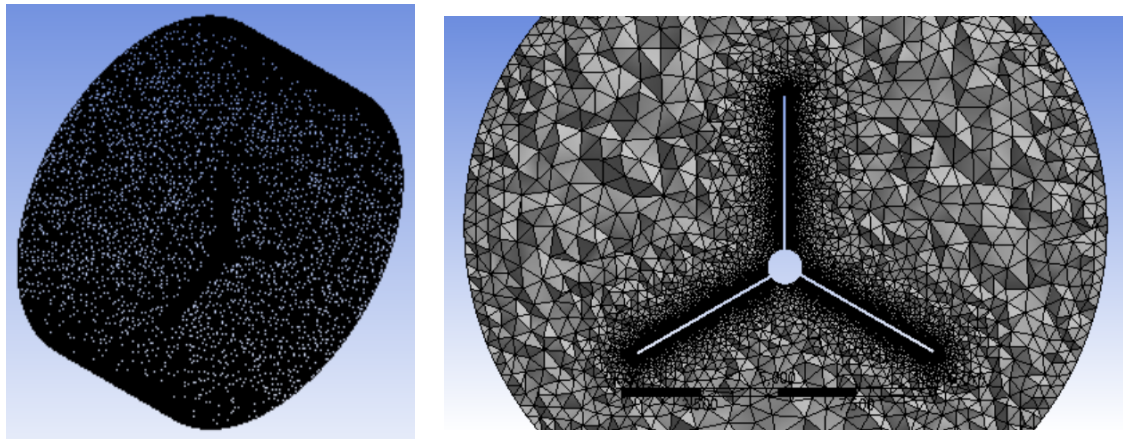
Comparando a malha 2 com a malha 1, já é possível observar que ela já está mais refinada que a malha anterior tanto na região próxima ao aerogerador quanto na região mais distante. Esse refinamento indica que ela representará melhor o escoamento e o efeito que o aerogerador causará nesse escoamento.

O bordo de fuga, entretanto, continua sem apresentar uma malha mais refinada em sua proximidade. Apesar da região próxima ao bordo de ataque estar mais refinada ainda, a falta dessa região na parte de trás do aerofólio poderá fazer com que a simulação não consiga representar todos os efeitos provenientes da interação do ar com o aerofólio.

A figura 4.9 apresenta a configuração da malha 3. Ela apresenta três vistas diferentes: uma vista isométrica de todo o domínio, uma vista em corte frontal ao aerogerador e uma outra vista em corte da pá.

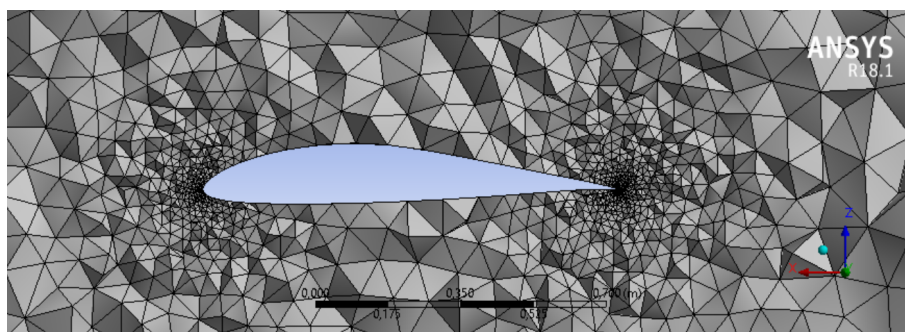
É possível observar que essa malha é ainda mais refinada do que as anteriores em

todas as regiões do domínio. Além disso, pode-se ver que, ao contrário das malhas anteriores, ela apresenta uma região mais refinada no bordo de fuga do aerofólio, além de apresentar um refino ainda maior na região próxima ao bordo de ataque. A presença dessa região na parte de trás indica que essa malha tem mais chances de calcular corretamente todos os fenômenos advindos da interação entre aerogerador e o ar.



(a) Vista isométrica do domínio.

(b) Vista frontal do aerogerador.



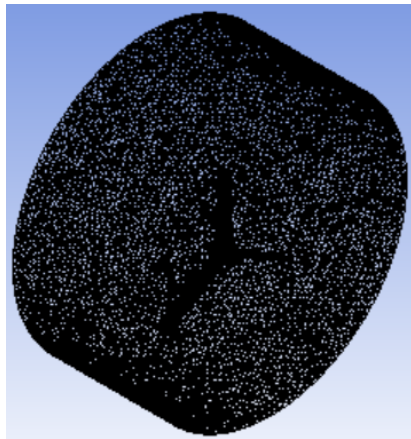
(c) Vista do perfil da pá.

Figura 4.9: Malha 3

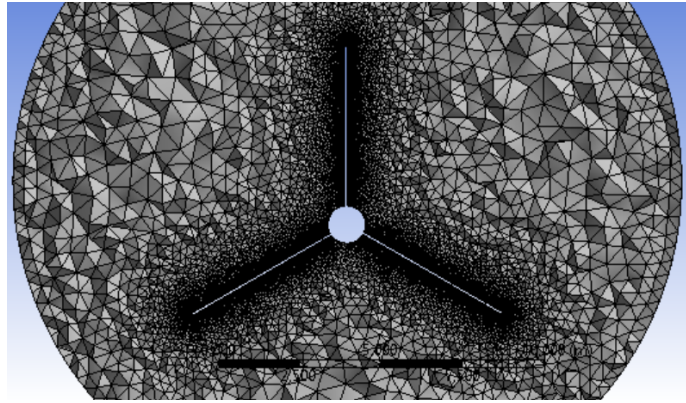
A figura 4.10 apresenta a configuração da malha 4. Ela apresenta três vistas diferentes: uma vista isométrica de todo o domínio, uma vista em corte frontal ao aerogerador e uma outra vista em corte da pá.

Comparando com a malha anterior, é difícil diferenciar visualmente a malha na região mais afastada do aerogerador. Entretanto, é possível verificar que a região próxima ao aerogerador é mais refinada que a malha anterior.

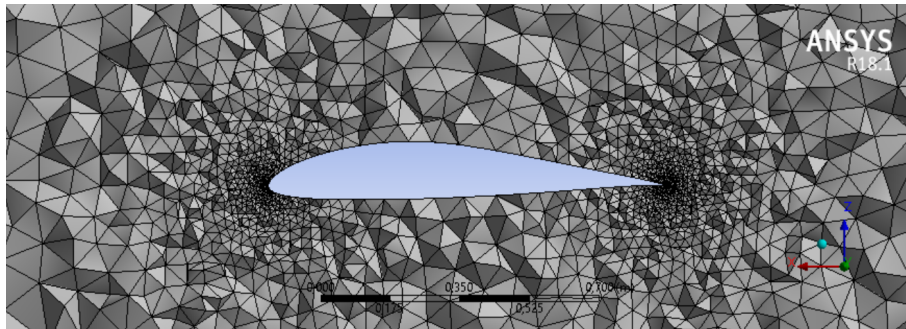
Analisando a vista em corte da pá do aerogerador, observa-se que os elementos de malha próximo ao perfil são menores em comparação com a malha anterior. Isso ocorre não apenas nas regiões próximas aos bordos de ataque e de fuga do aerofólio, mas em toda região ao redor do aerofólio.



(a) Vista isométrica do domínio.



(b) Vista frontal do aerogerador.



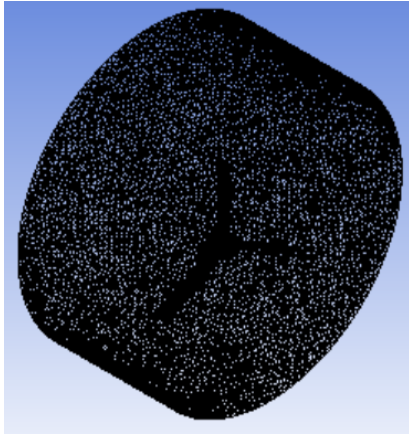
(c) Vista do perfil da pá.

Figura 4.10: Malha 4

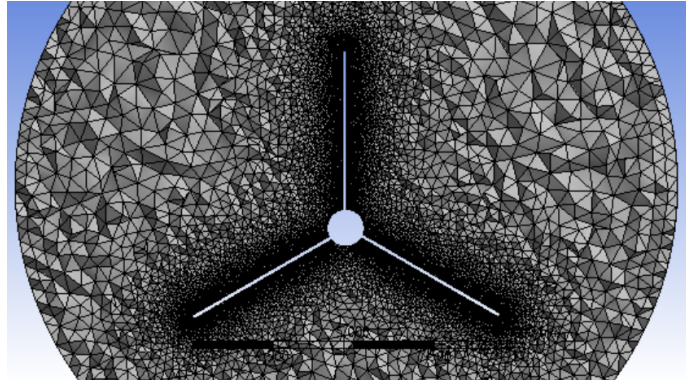
A figura 4.11 apresenta a configuração da malha 5. Ela apresenta três vistas diferentes: uma vista isométrica de todo o domínio, uma vista em corte frontal ao aerogerador e uma outra vista em corte da pá.

Comparando a vista isométrica e a vista em corte frontal ao aerogerador das malhas 4 e 5 é difícil encontrar diferenças significativas entre os elementos de malha. Entretanto, analisando a vista em corte da pá, é possível identificar que na malha 5 os elementos de malha crescem em uma proporção menor do que na malha 4.

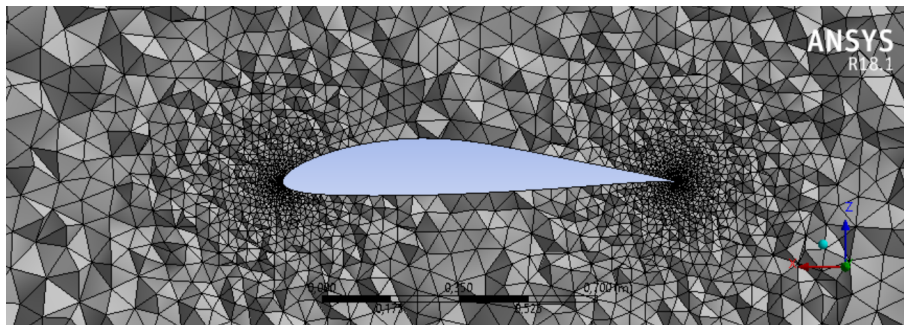
A partir dessa observação, é possível concluir que a malha 5 apresenta um maior refinamento na região mais próxima do aerogerador. Essa conclusão não pode ser obtida através das outras vistas por que os elementos de malha nessa região são muito pequenos, dificultando sua visualização.



(a) Vista isométrica do domínio.



(b) Vista frontal do aerogerador.

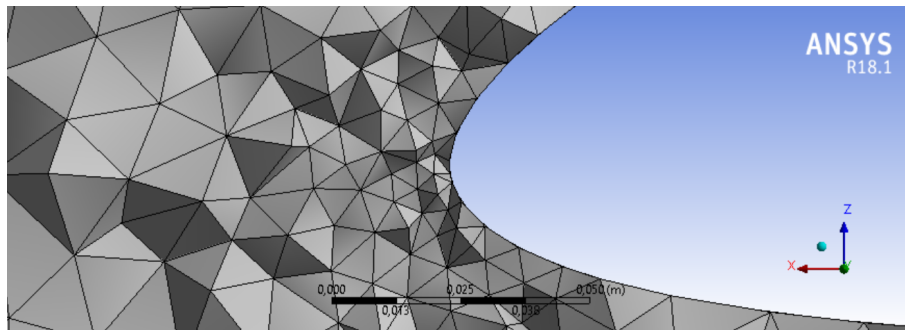


(c) Vista do perfil da pá.

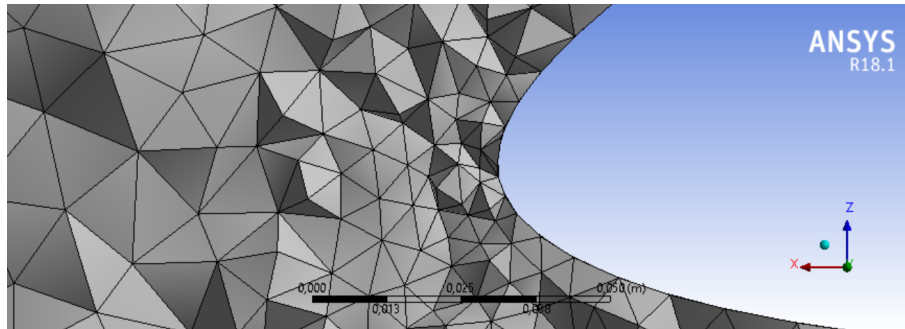
Figura 4.11: Malha 5

As figuras 4.9, 4.10 e 4.11 foram suficientes para perceber a diferença entre as malhas 3, 4 e 5, respectivamente. Entretanto, devido ao tamanho reduzido dos elementos de malha, essa diferença não era tão óbvia. Assim, um estudo mais detalhado foi feito nas regiões dos bordos de ataque e de fuga a fim de tornar a diferença entre elas ainda mais clara.

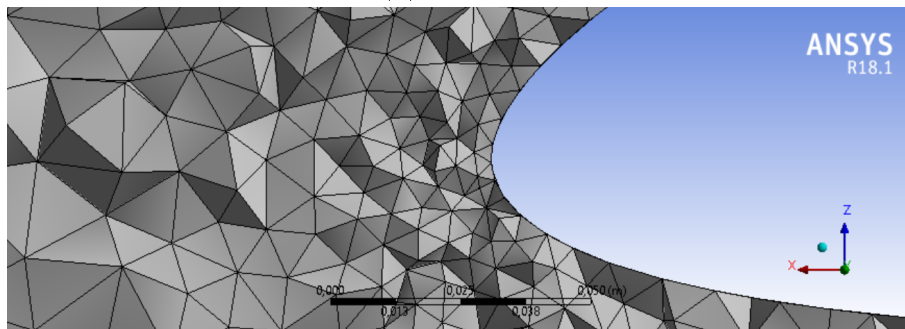
As figuras 4.12 e 4.13 apresentam o detalhe da malha na região próxima ao bordo de ataque e ao bordo de fuga, respectivamente. Nota-se que foi estudado essas duas regiões específicas por serem áreas de concentração de elementos de malha.



(a) Malha 3.



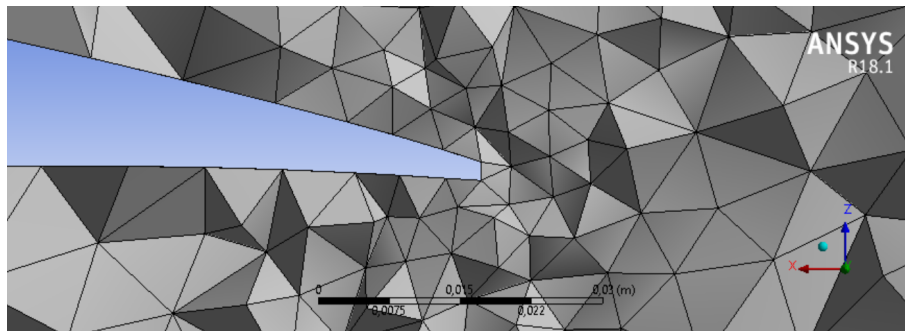
(b) Malha 4.



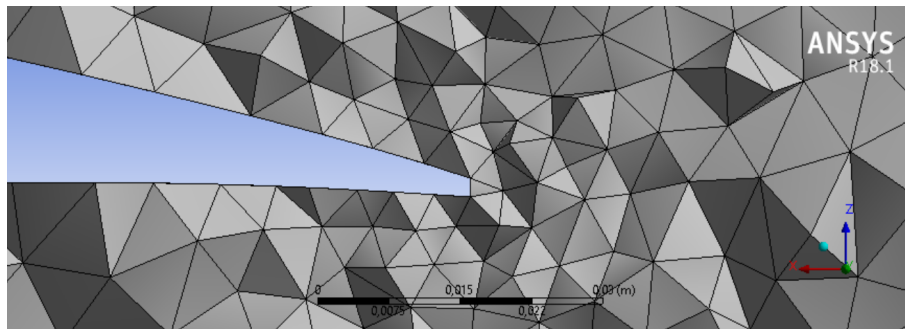
(c) Malha 5.

Figura 4.12: Detalhe da malha na região próxima ao bordo de ataque do aerofólio.

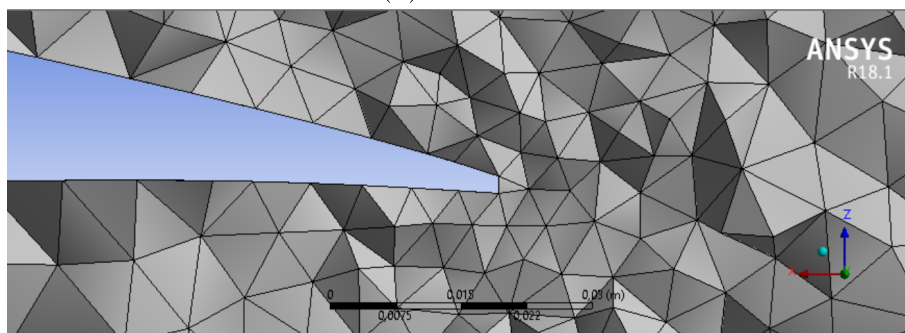
Analisando os detalhes da malha no bordo de ataque é possível ver que a distribuição dos elementos ao longo da geometria é similar nos três casos. Assim, a diferença entre as malhas reside na taxa em que o elemento cresce na medida em que se distancia do aerofólio. Portanto, a malha 3 apresenta uma maior taxa de crescimento e a malha 5 apresenta a menor taxa de crescimento, confirmando que a malha 5 é a mais refinada.



(a) Malha 3.



(b) Malha 4.



(c) Malha 5.

Figura 4.13: Detalhe da malha na região próxima ao bordo de fuga do aerofólio.

Para o caso do bordo de fuga é possível obter a mesma conclusão que a obtida para o bordo de ataque. A malha 3 apresenta a maior taxa de crescimento enquanto a malha 5 apresenta a menor taxa de crescimento entre as três malhas analisadas para essa situação

Após realizar o estudo das malhas, é necessário comparar os resultados obtidos para cada uma. Diferentes malhas com resultados próximos indicarão que os resultados estão convergindo e, assim, serão considerados válidos.

As figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam as linhas de corrente obtidas pela simulação para as cinco malhas e a velocidade ao longo das linhas de corrente. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente neste trabalho, adotando-se para este caso o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$.

As linhas de corrente apresentadas na figura 4.14 possuem velocidades semelhantes nas partes superior e inferior dos aerofólios, evidenciadas pela cor amarela. Este

fato não é fisicamente esperado, já que deve haver uma diferença de pressão para que o aerogerador entre em movimento e uma pequena diferença de velocidade significa que há uma pequena diferença de pressão. Assim, esta malha aparenta apresentar resultados incorretos.

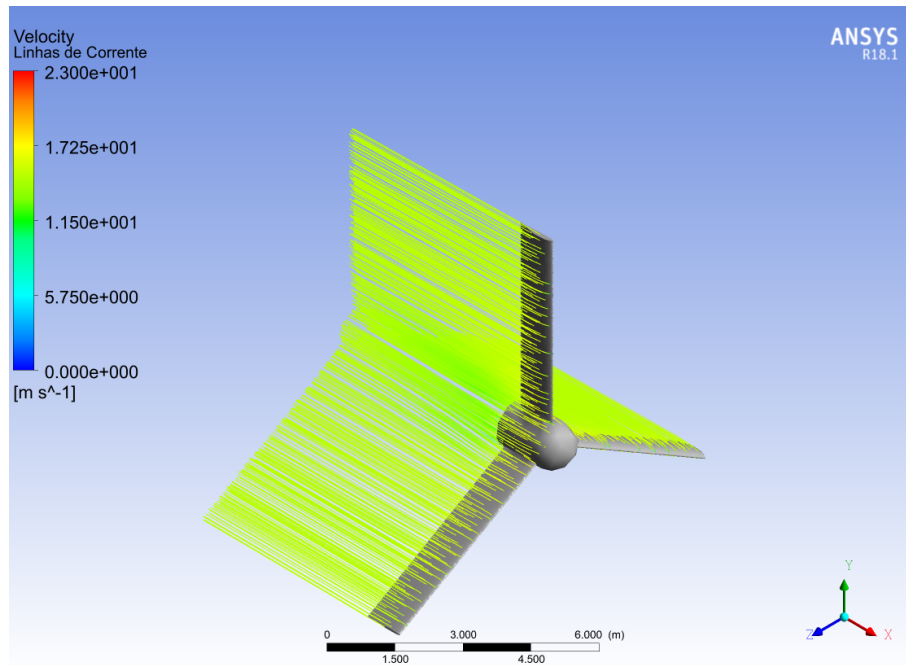


Figura 4.14: Malha 1 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

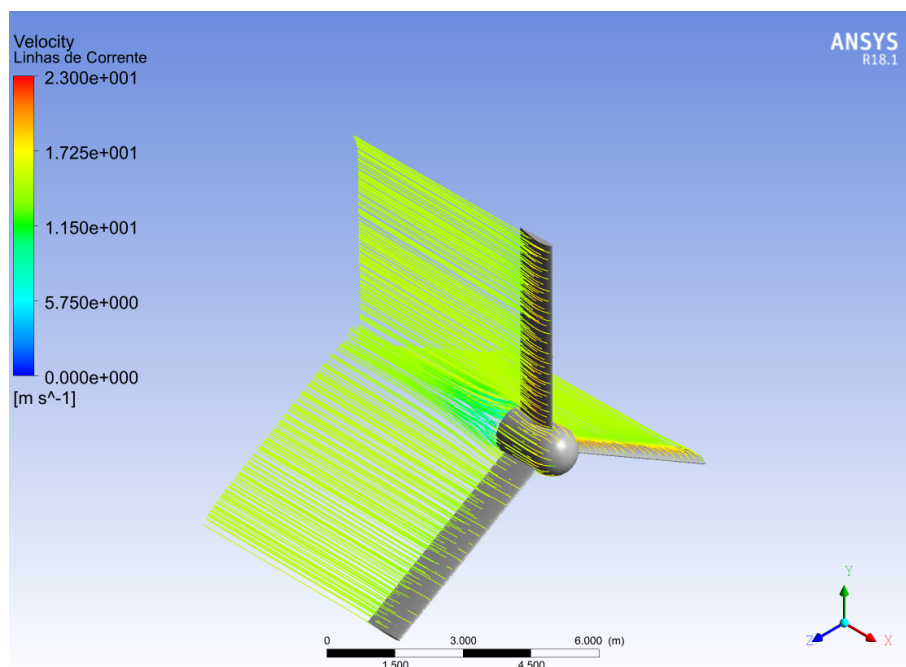


Figura 4.15: Malha 2 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

As linhas de corrente apresentadas na figura 4.15 já possuem uma maior diferença de velocidade, evidenciadas pela cor laranja para maiores velocidades e amarela para

velocidades menores, como era fisicamente esperado. Além disso, estas linhas de corrente apresentam um maior desvio em seu percurso, o que também era esperado que ocorresse.

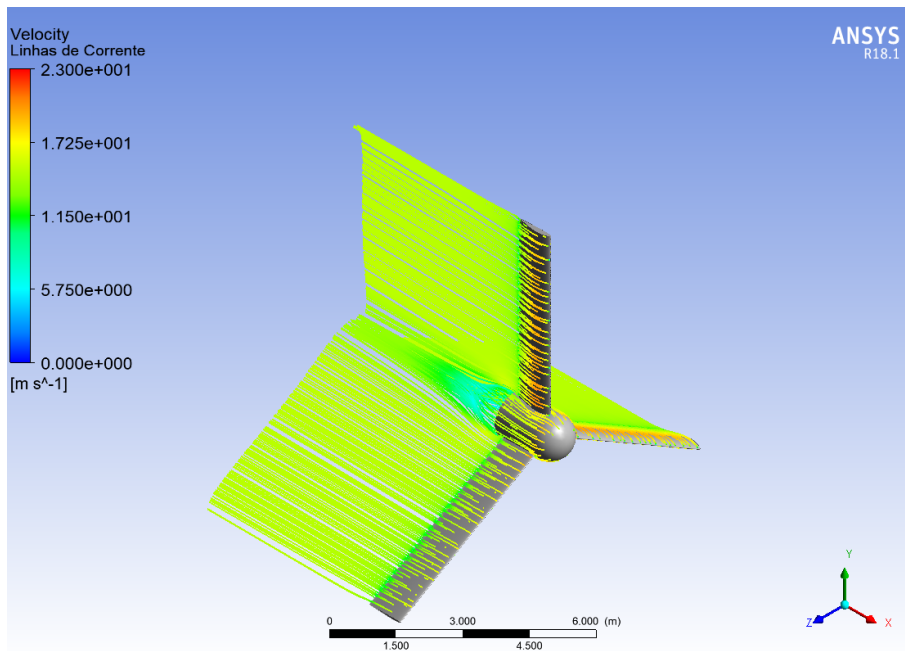


Figura 4.16: Malha 3 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

As linhas de correntes obtidas com a malha 3, conforme figura 4.16, não apresentam diferenças evidentes em relação as obtidas com a malha 2. Tal fato pode indicar que os resultados estão convergindo.

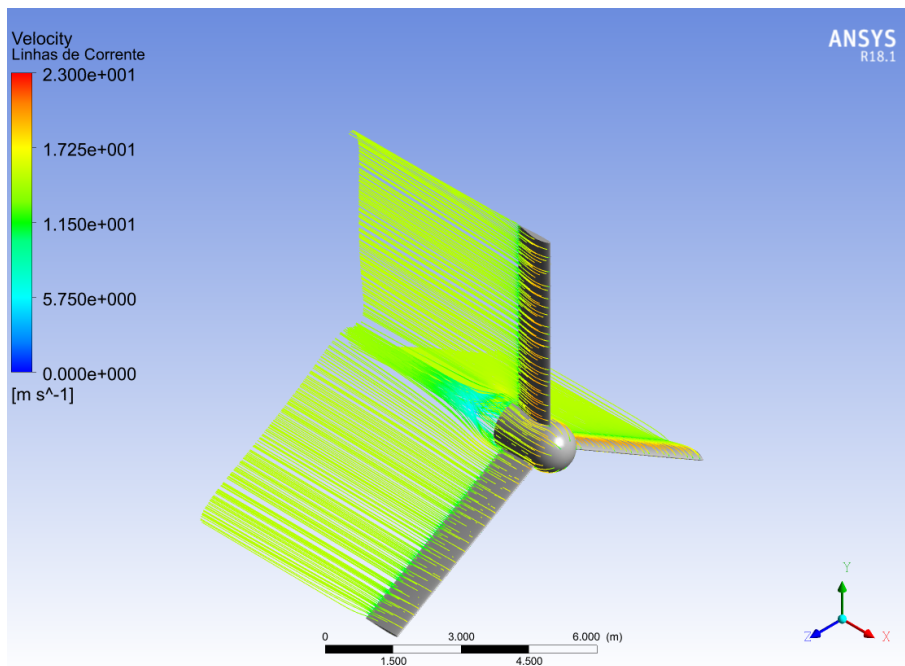


Figura 4.17: Malha 4 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

As linhas de correntes obtidas com a malha 4, conforme figura 4.17, também não apresentam diferenças evidentes em relação as obtidas com as malhas 2 e 3. Assim, é de se esperar que resultados convergidos possam ser obtidos a partir da malha 2 ou 3.

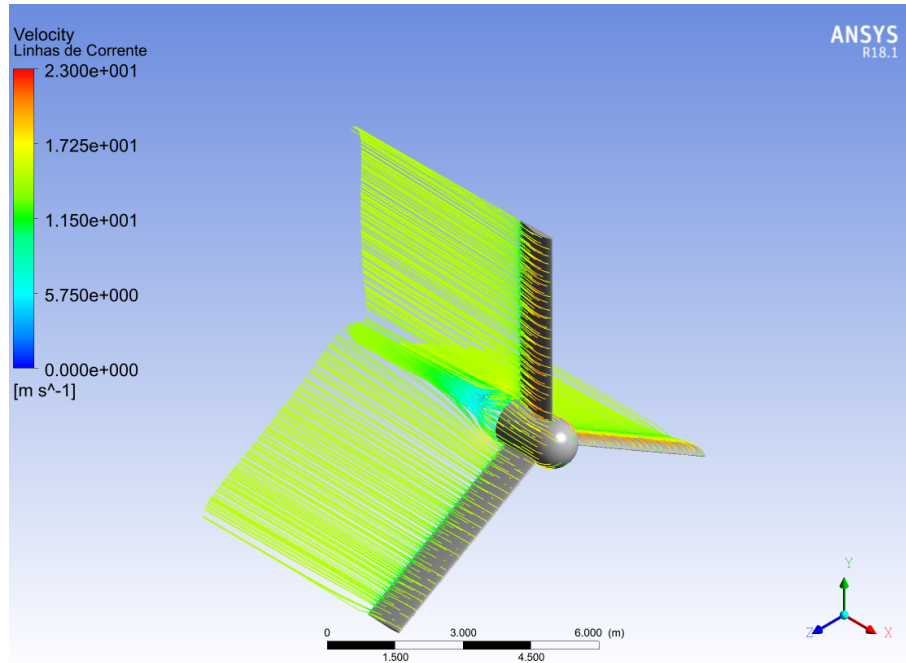


Figura 4.18: Malha 5 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

Como era esperado, os resultados da malha 5, figura 4.18, também não possuem diferenças evidentes. Assim, primeiramente, pode-se concluir que a malha 1 irá produzir resultados inválidos para este modelo de turbulência. Além disso, é esperado uma convergência dos resultados das demais malhas.

As figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam os resultados obtidos para a pressão ao redor do aerogerador pela simulação para as cinco malhas. Os resultados que são apresentados estão localizados a 0,5 metros do bordo de ataque do aerofólio, ou seja, na metade da extensão de seu perfil. Além disso, os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$.

Os resultados de pressão ao redor do aerogerador para a malha 1, apresentados pela figura 4.19, mostram uma pequena diferença de pressão entre o lado superior e inferior do aerofólio, evidenciada pela cor verde em ambos os lados. Como já foi visto anteriormente, a diferença de pressão é a responsável pelo movimento do aerogerador. Assim, os resultados obtidos para a malha 1 estão em desacordo com o que era esperado fisicamente, o que pode indicar que esta malha está fornecendo resultados incorretos.

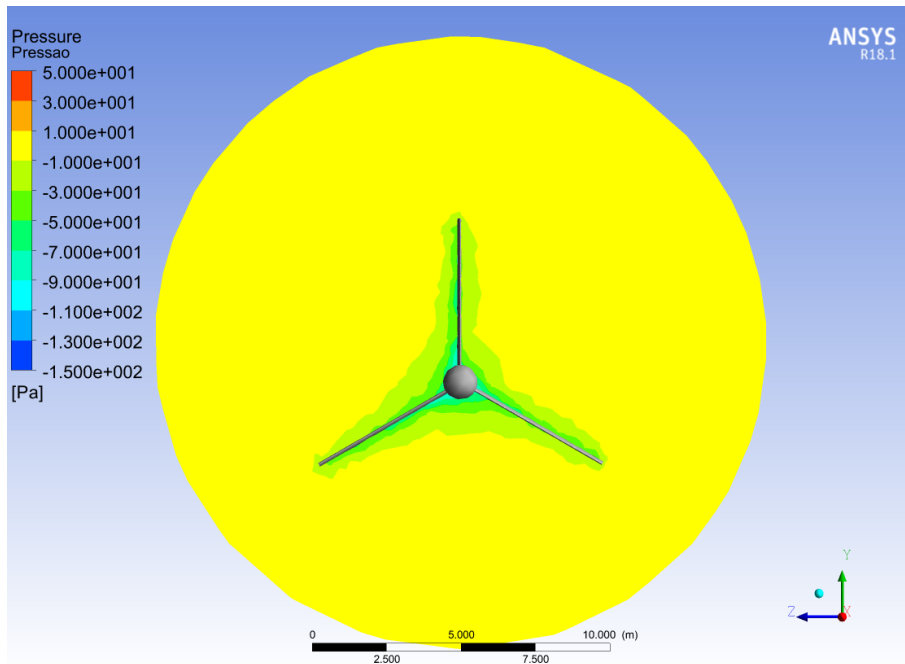


Figura 4.19: Malha 1 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

A figura 4.20 apresenta resultados mais coerentes com o que era esperado. Uma maior diferença de pressão é observada, com uma pressão menor de um lado evidenciada pela cor verde. Tal observação pode ser um indício de que esta malha apresenta resultados acurados.

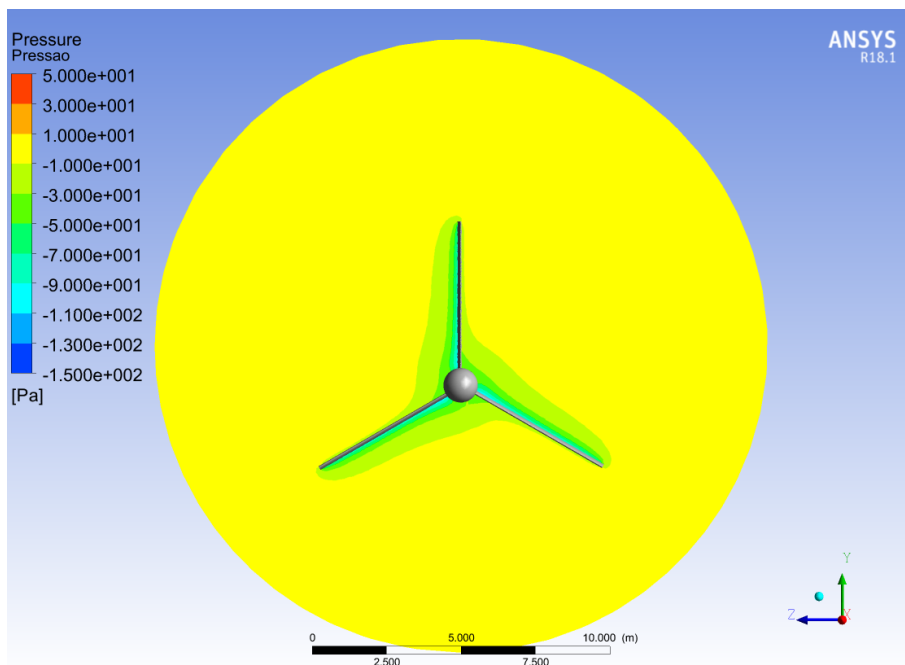


Figura 4.20: Malha 2 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

A pressão obtida com a malha 3, que é apresentada na figura 4.21, se assemelha a pressão obtida com a malha 2. Dessa forma, espera-se que estas malhas já estejam

apresentando convergência.

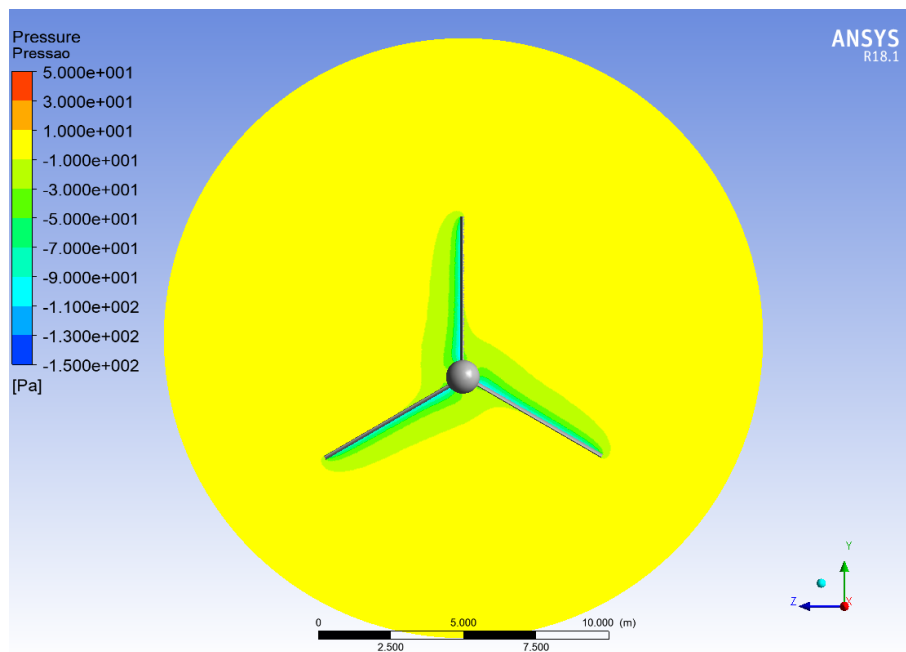


Figura 4.21: Malha 3 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

A malha 4 apresenta resultados semelhantes as malhas 2 e 3, conforme era esperado. Estes resultados estão apresentados na figura 4.22.

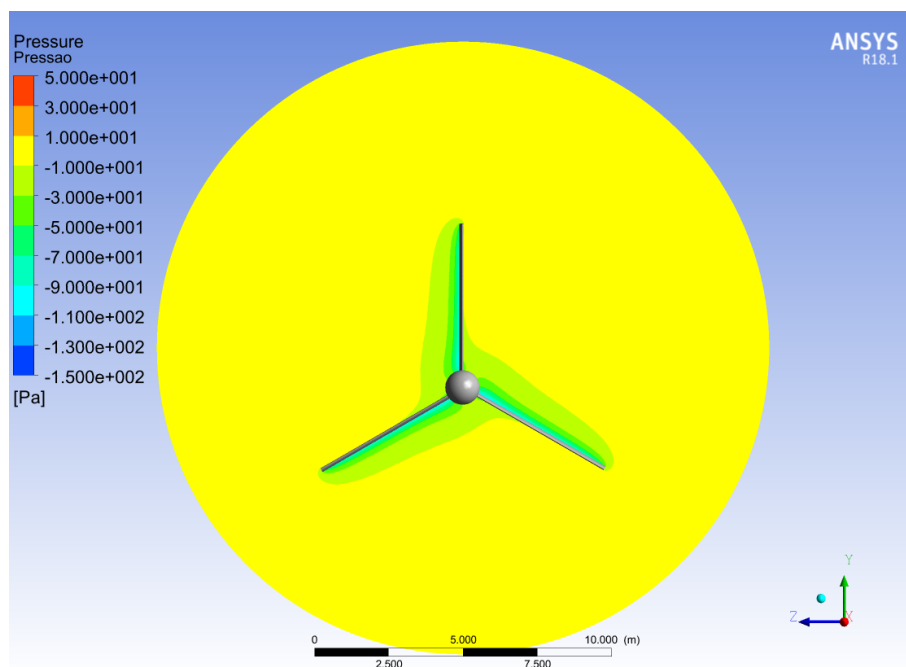


Figura 4.22: Malha 4 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

Os resultados da malha 5, figura 4.23, semelhantes aos anteriores, servem para confirmar a convergência de malha. Assim, é possível concluir que a malha 1 não

apresenta resultados compatíveis, enquanto as demais malhas devem ser avaliadas a fim de confirmar a validade de seus resultados.

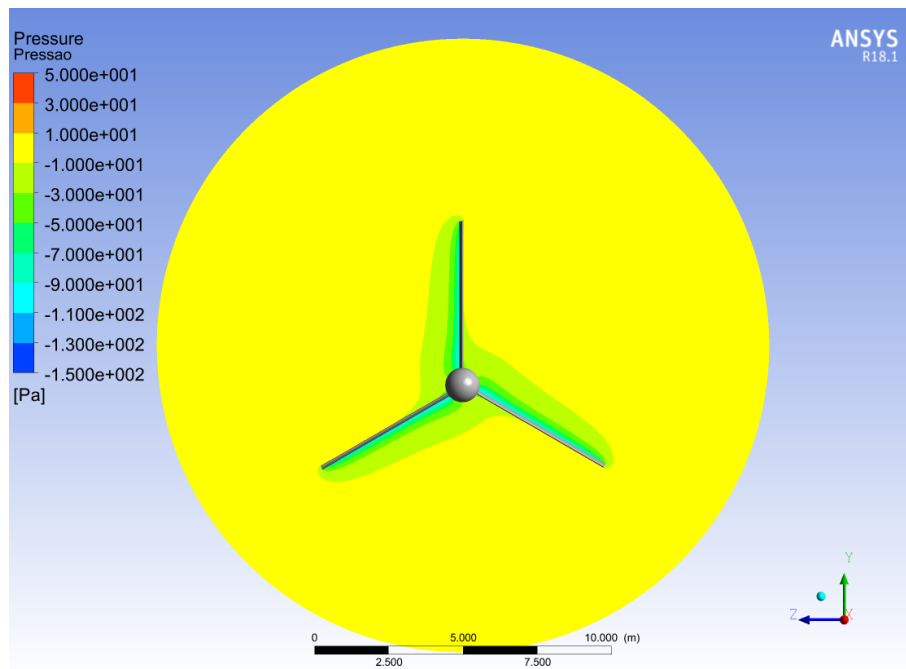


Figura 4.23: Malha 5 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

As figuras 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 apresentam os resultados obtidos do módulo da velocidade do ar ao redor do aerogerador pela simulação para as cinco malhas. Os resultados que são apresentados estão localizados a 0,5 metros do bordo de ataque do aerofólio, ou seja, na metade da extensão de seu perfil. Além disso, os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$.

A figura 4.24 apresenta resultados de velocidade fisicamente incoerentes para a malha 1. Esta incoerência se deve a irregularidade dos contornos de velocidade e a pequena diferença de velocidade entre os lados inferior e superior do aerofólio, visto que ambos não são esperados para este caso. Assim, não deve-se considerar os resultados da malha 1 como válidos.

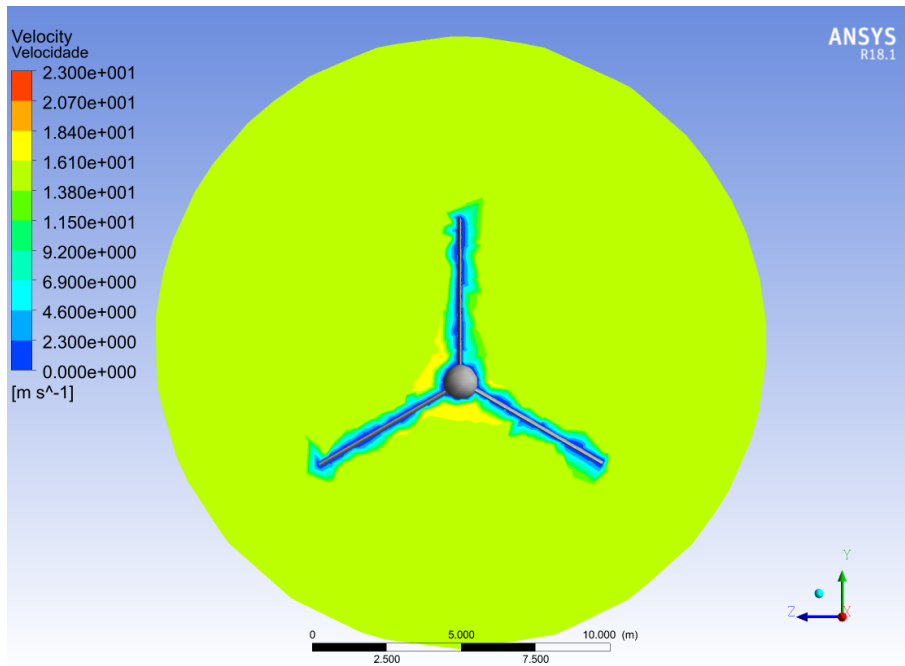


Figura 4.24: Malha 1 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

Os resultados de velocidade da malha 2, figura 4.25, por outro lado, estão de acordo com o que era esperado. Assim, pode-se esperar que ela esteja gerando resultados válidos.

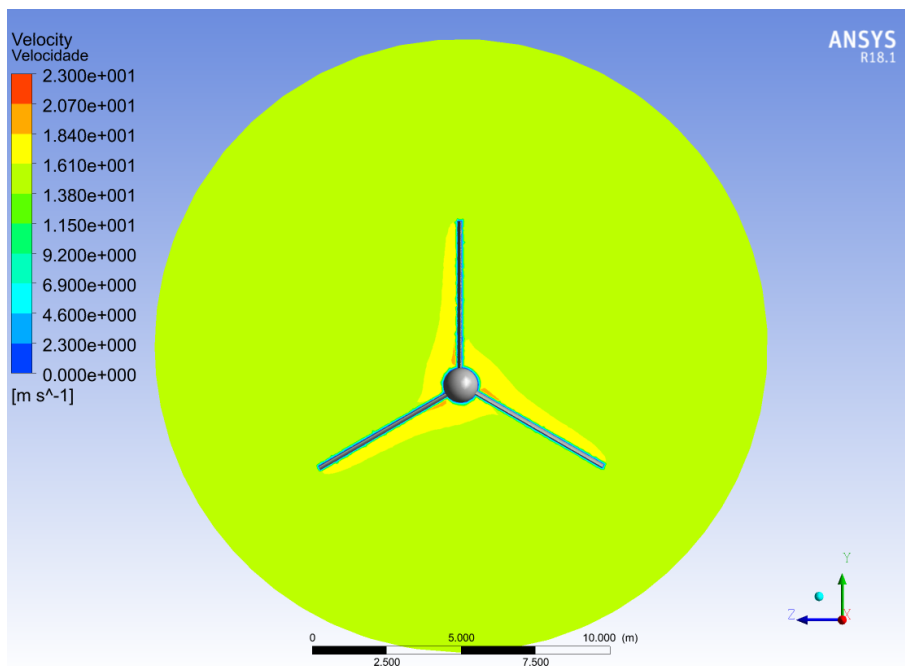


Figura 4.25: Malha 2 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

A malha 3, conforme figura 4.26, apresenta resultados semelhantes aos obtidos para a malha 2. Nesse sentido, é esperado que os resultados estejam convergindo. Entretanto, ainda deve-se analisar os resultados obtidos com malhas mais refinadas

a fim de confirmar essa convergência.

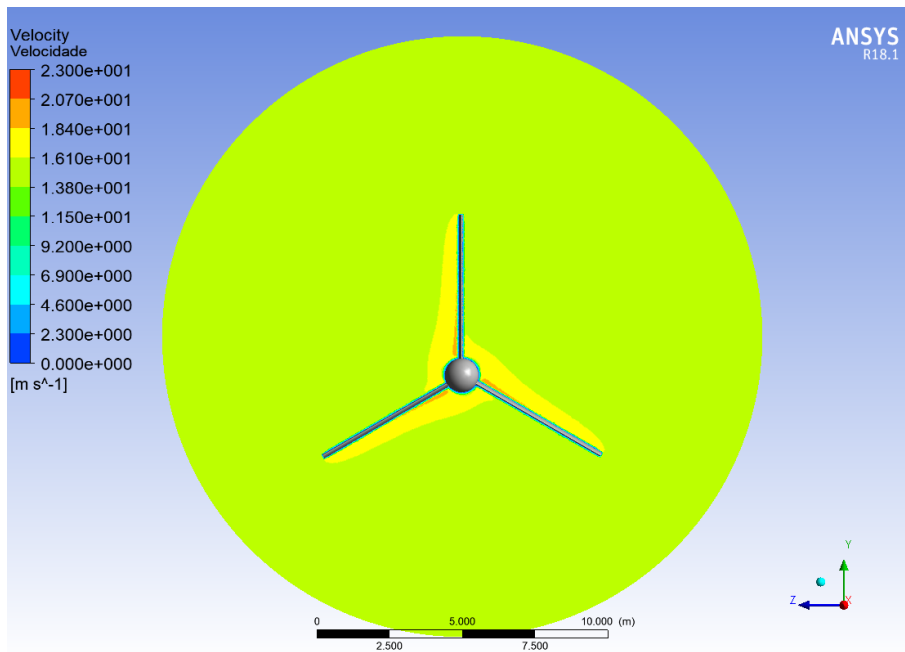


Figura 4.26: Malha 3 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

Os resultados da malha 4, figura 4.27, também se assemelham aos resultados anteriores. Assim, uma convergência de malha é bastante provável, apesar de ainda ser preciso uma avaliação mais detalhada.

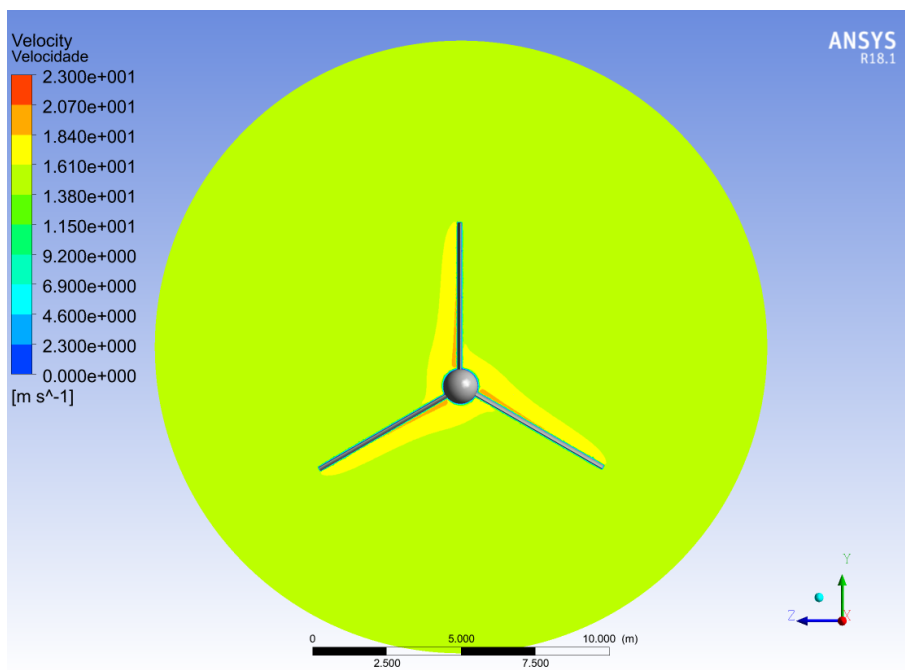


Figura 4.27: Malha 4 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

Finalmente, é possível confirmar com as velocidades obtidas para a malha 5, figura 4.28, que, enquanto a malha 1 apresenta resultados distantes dos demais,

as outras malhas apresentam resultados próximos, devendo-se, ainda, realizar uma avaliação mais rigorosa a fim de confirmar quais resultados poderão ser considerados como válidos.

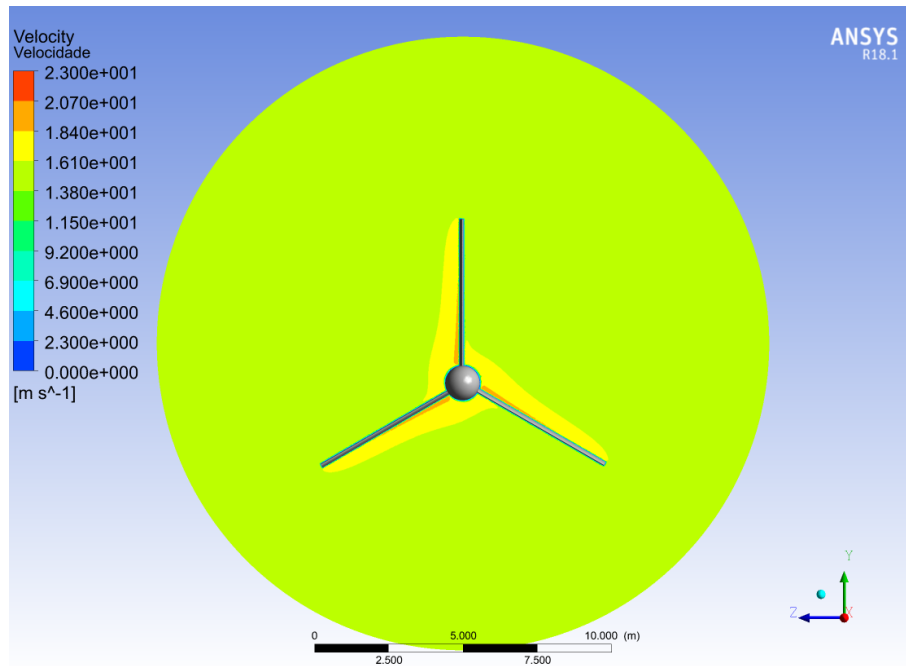


Figura 4.28: Malha 5 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \varepsilon$)

As figuras 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 apresentam as linhas de corrente obtidas pela simulação para as cinco malhas e a velocidade ao longo das linhas de corrente. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente neste trabalho, adotando-se para este caso o modelo de turbulência $\kappa - \omega$.

As linhas de corrente obtidas com a malha 1, apresentadas na figura 4.29, possuem velocidades semelhantes nas partes superior e inferior dos aerofólios, evidenciadas pela cor amarela. Sendo este fato algo que não faz sentido físico, como já mencionado, considera-se os resultados para esta malha como inválidos.

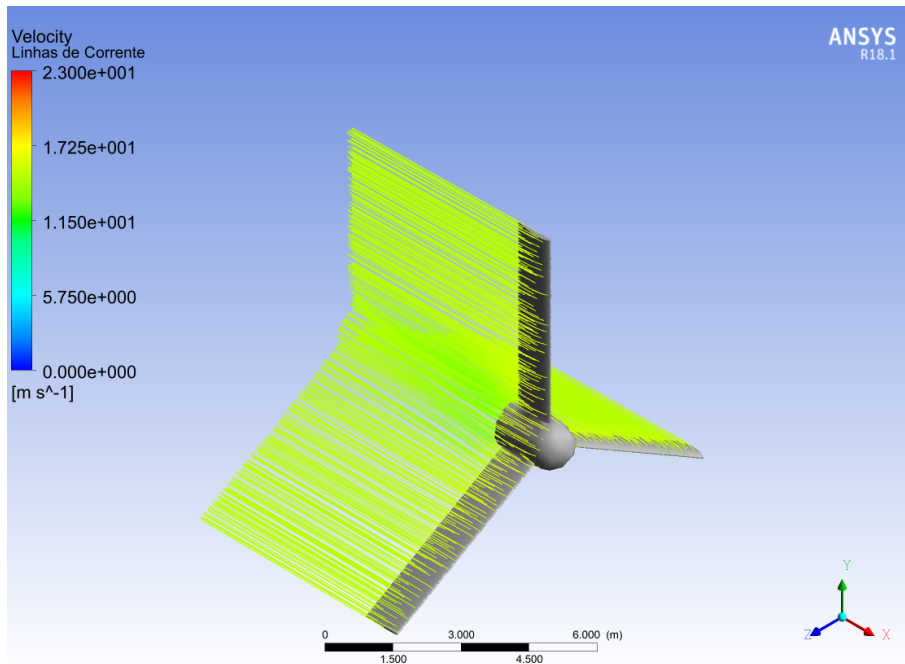


Figura 4.29: Malha 1 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

As linhas de corrente obtidas com a malha 2, apresentadas na figura 4.30, possuem uma maior diferença de velocidade, evidenciadas pela cor laranja para maiores velocidades e amarela para velocidades menores, como era esperado. Além disso, estas linhas de corrente apresentam um maior desvio em seu percurso, o que também era esperado que ocorresse.

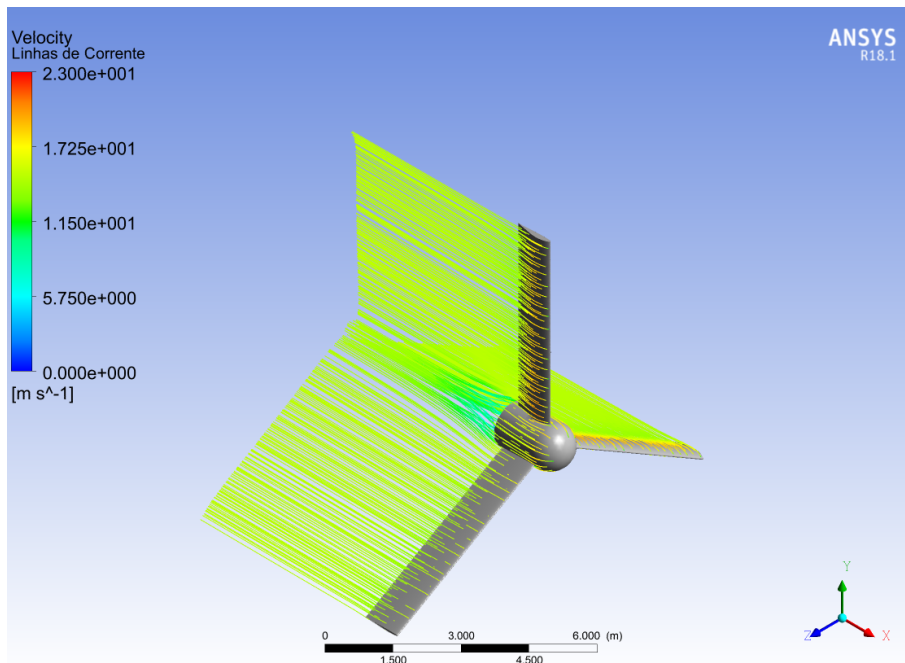


Figura 4.30: Malha 2 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

As linhas de correntes obtidas com a malha 3, conforme figura 4.31, não apre-

sentam diferenças evidentes em relação as obtidas com a malha 2. Isto pode indicar que os resultados estão convergindo.

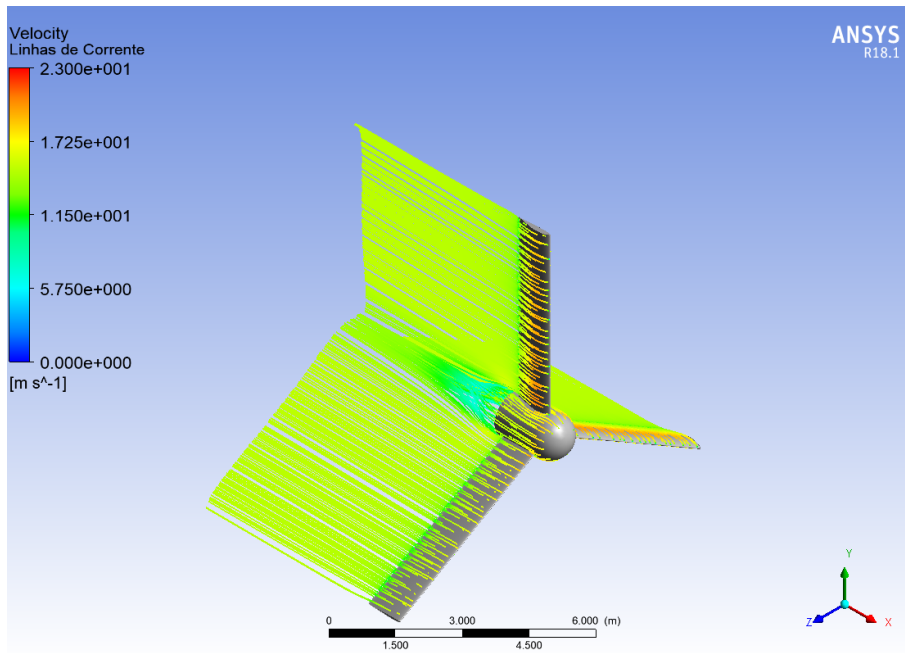


Figura 4.31: Malha 3 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

As linhas de correntes obtidas com a malha 4, conforme figura 4.32, também não apresentam diferenças evidentes em relação as obtidas com as malhas 2 e 3. Assim, é de se esperar que resultados convergidos possam ser obtidos a partir da malha 2 ou 3.

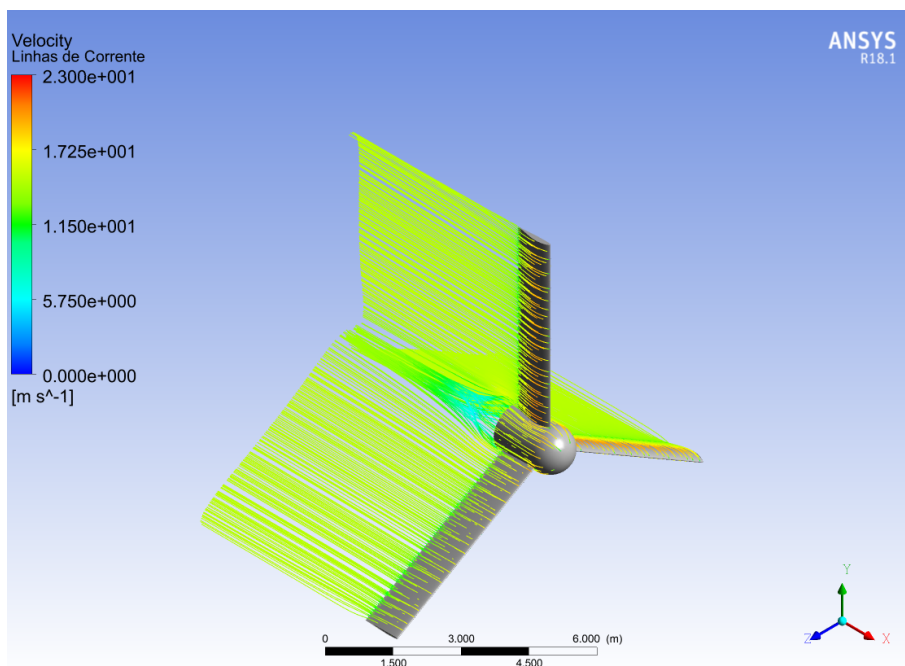


Figura 4.32: Malha 4 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

Como era esperado, os resultados da malha 5, figura 4.33, também não possuem diferenças evidentes. Assim, primeiramente, pode-se concluir que a malha 1 irá produzir resultados inválidos para este modelo de turbulência enquanto é esperado uma convergência dos resultados das demais malhas. Também é importante notar que os resultados para este modelo de turbulência se assemelham aos gerados para o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$.

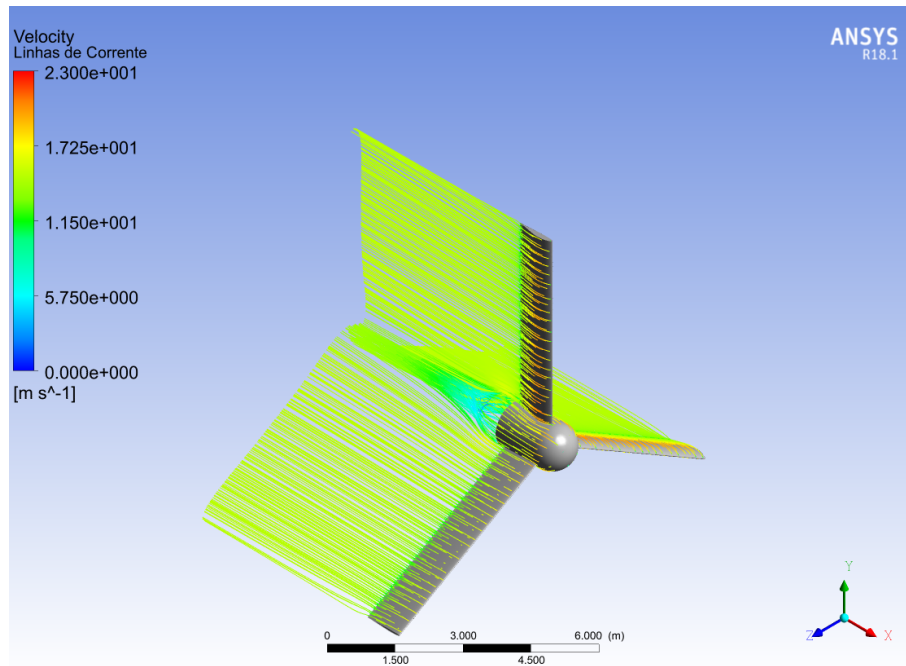


Figura 4.33: Malha 5 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

As figuras 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38 apresentam os resultados obtidos para a pressão ao redor do aerogerador pela simulação para as cinco malhas. Os resultados que são apresentados estão localizados a 0,5 metros do bordo de ataque do aerofólio, ou seja, na metade da extensão de seu perfil. Além disso, os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado o modelo de turbulência $\kappa - \omega$.

Os resultados de pressão para a malha 1, apresentados pela figura 4.34, mostram uma pequena diferença de pressão entre o lado superior e inferior do aerofólio, evidenciada pela cor verde em ambos os lados. Como já foi visto anteriormente, a diferença de pressão é a responsável pelo movimento do aerogerador. Assim, os resultados obtidos para a malha 1 podem ser considerados inválidos.

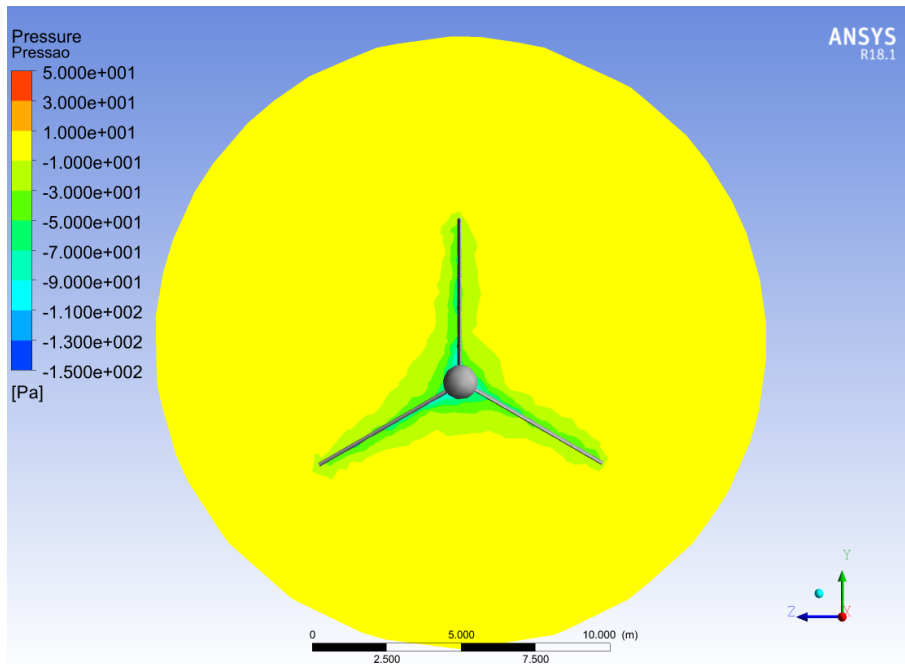


Figura 4.34: Malha 1 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

A figura 4.35 apresenta resultados mais coerentes com o que era esperado. Uma maior diferença de pressão é observada, com uma pressão menor de um lado evidenciada pela cor verde, podendo significar que os resultados em questão estão representando corretamente a realidade.

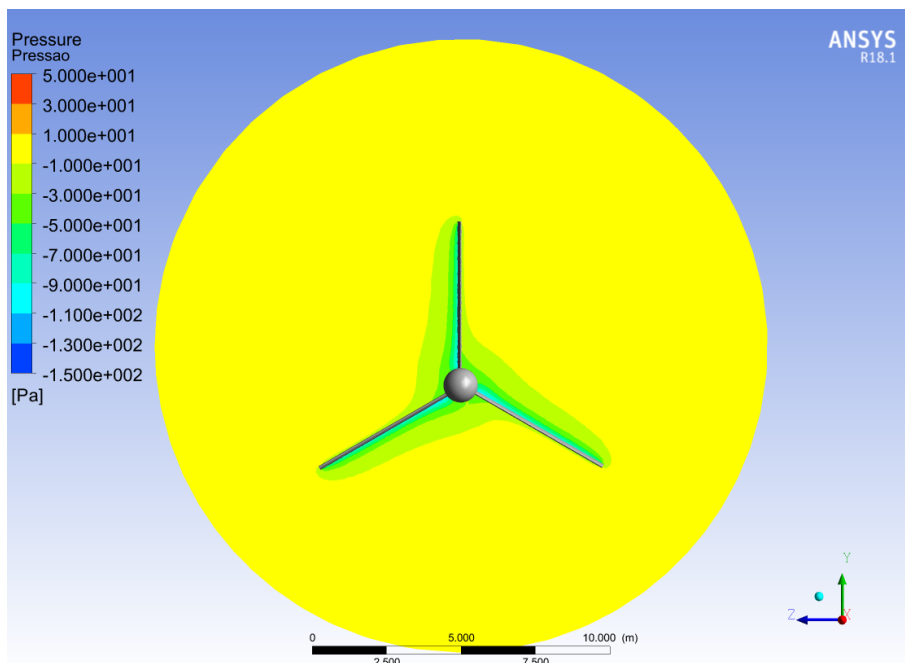


Figura 4.35: Malha 2 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

A pressão obtida com a malha 3, que é apresentada na figura 4.36, se assemelha a pressão obtida com a malha 2. Dessa forma, espera-se que os resultados produzidos

por estas malhas estejam convergindo.

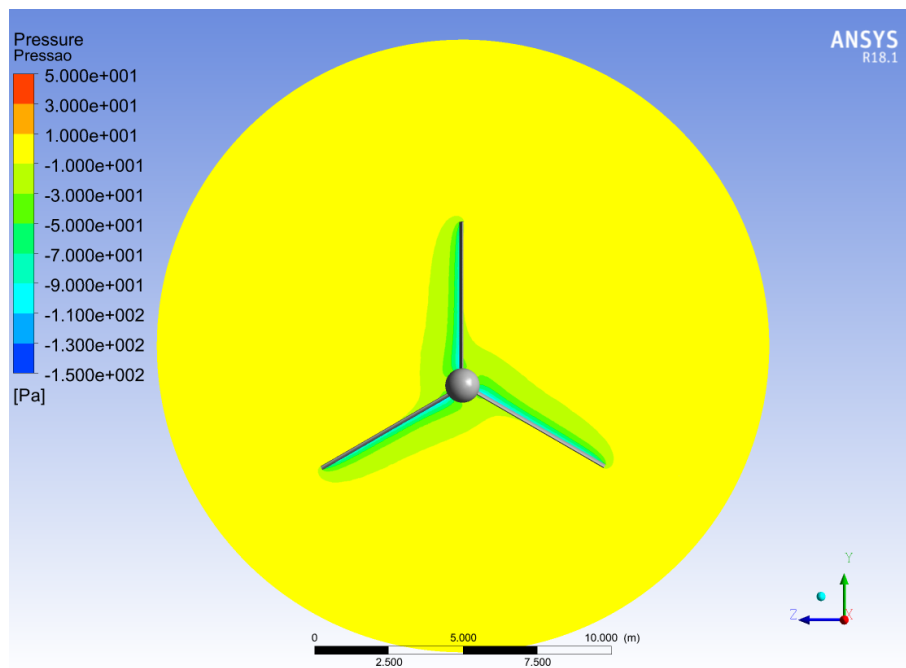


Figura 4.36: Malha 3 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

A malha 4 apresenta resultados semelhantes as malhas 2 e 3, conforme era esperado. Estes resultados estão apresentados na figura 4.37.

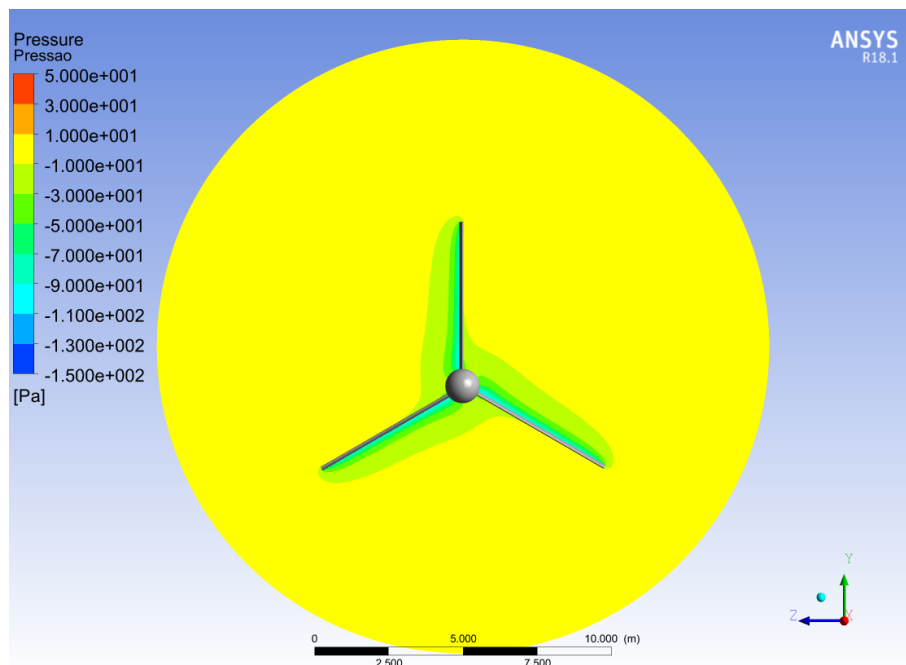


Figura 4.37: Malha 4 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

Os resultados da malha 5, figura 4.38, semelhantes aos anteriores, servem para confirmar a convergência de malha. Assim, é possível concluir que a malha 1 não

apresenta resultados compatíveis, enquanto as demais malhas devem ser avaliadas a fim de confirmar a validade de seus resultados. Finalmente, também se observa que este modelo de turbulência gerou resultados similares ao modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$.

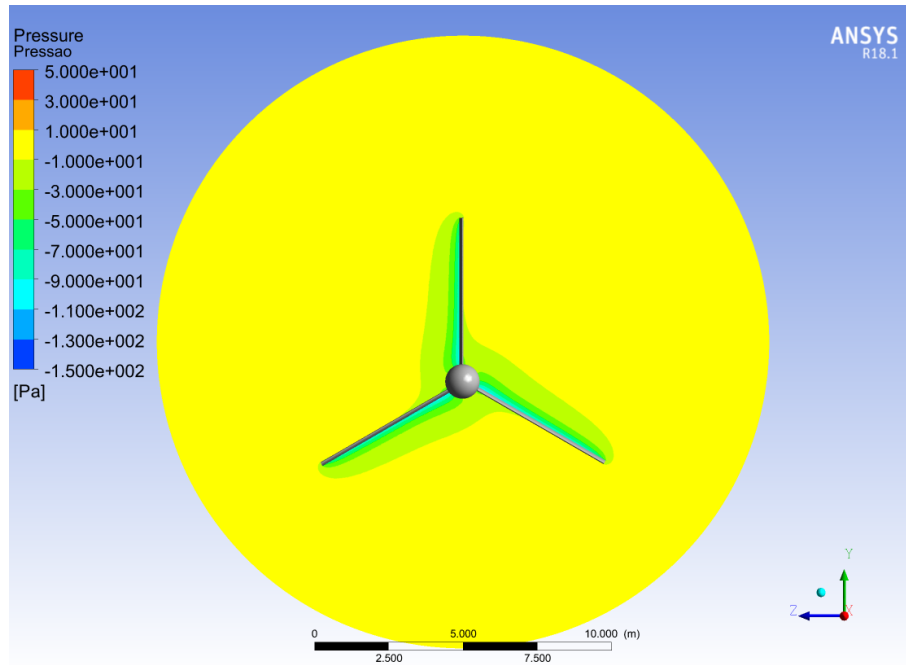


Figura 4.38: Malha 5 - Pressão no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

As figuras 4.39, 4.40, 4.41, 4.42 e 4.43 apresentam os resultados obtidos do módulo da velocidade do ar ao redor do aerogerador pela simulação para as cinco malhas. Os resultados que são apresentados estão localizados a 0,5 metros do bordo de ataque do aerofólio, ou seja, na metade da extensão de seu perfil. Além disso, os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado o modelo de turbulência $\kappa - \omega$.

A figura 4.39 apresenta resultados de velocidade fisicamente incoerentes para a malha 1. Esta incoerência se deve a irregularidade dos contornos de velocidade e a pequena diferença de velocidade entre os lados inferior e superior do aerofólio, visto que ambos não são esperados para este caso. Assim, estes resultados são considerados incorretos.

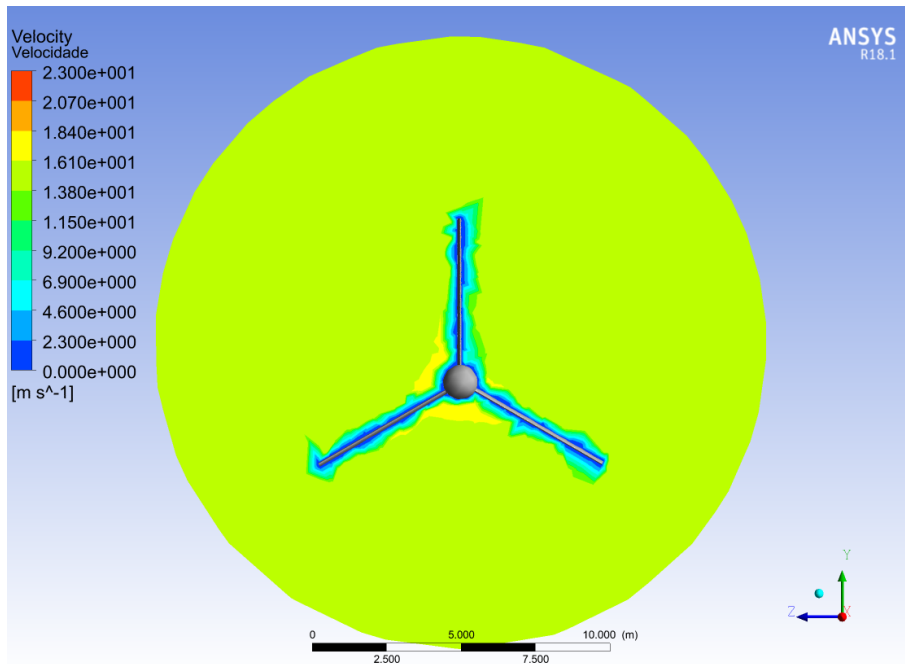


Figura 4.39: Malha 1 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

Os resultados de velocidade da malha 2, figura 4.40, por outro lado, estão de acordo com o que era fisicamente esperado. Assim, acredita-se que os resultados irão convergir para as malhas mais refinadas ou, até mesmo, para esta malha.

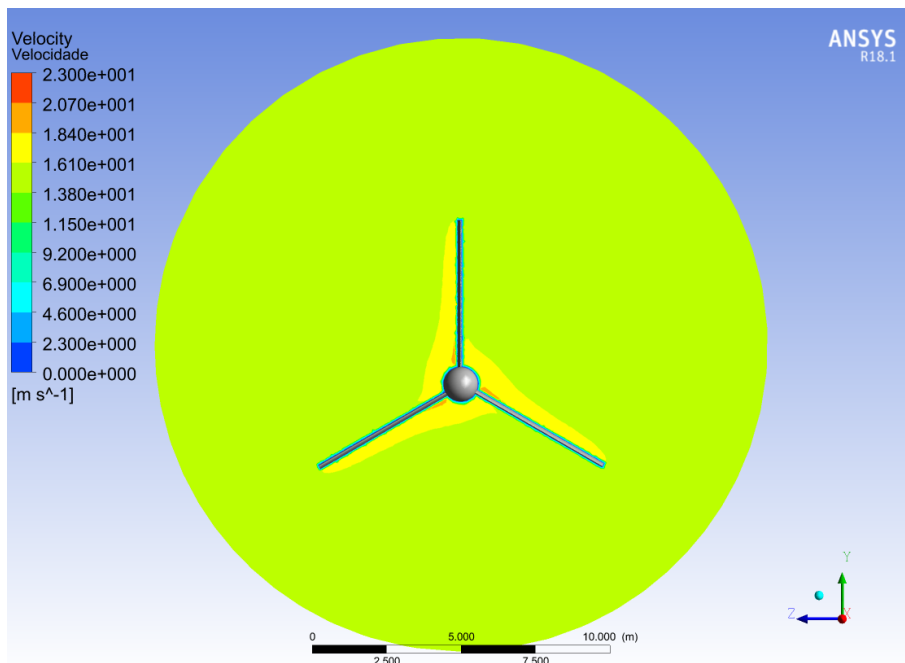


Figura 4.40: Malha 2 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

A malha 3, conforme figura 4.41, apresenta resultados semelhantes aos obtidos para a malha 2. Nesse sentido, é esperado que os resultados estejam convergindo. Entretanto, ainda deve-se analisar os resultados obtidos com malhas mais refinadas

a fim de confirmar essa convergência.

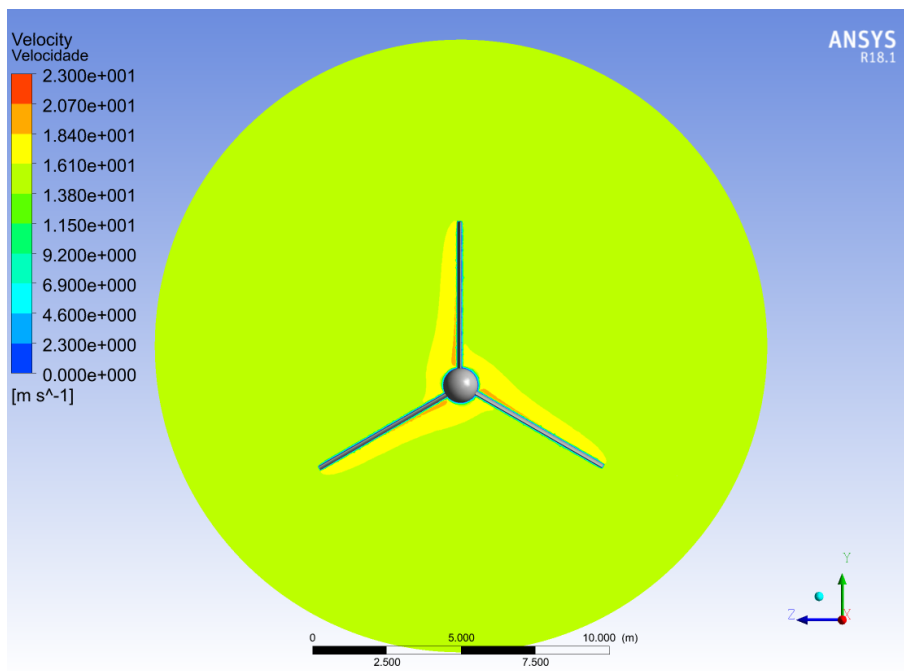


Figura 4.41: Malha 3 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

Os resultados da malha 4, figura 4.42, também se assemelham aos resultados anteriores. Assim, uma convergência de malha é bastante provável, apesar de ainda ser preciso uma avaliação mais detalhada.

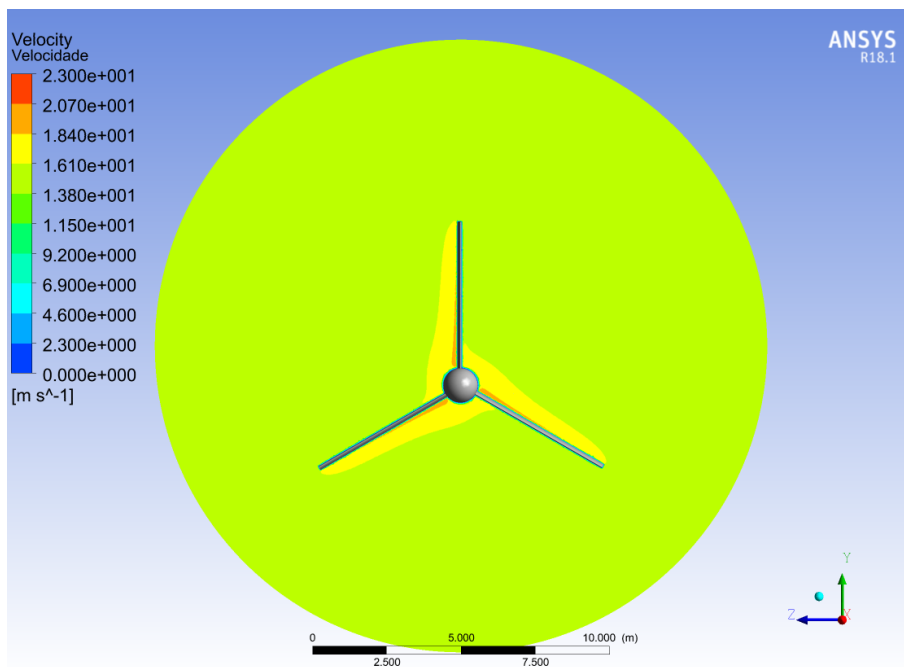


Figura 4.42: Malha 4 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

Por fim, é possível confirmar com as velocidades obtidas para a malha 5, figura 4.43, que, enquanto a malha 1 apresenta resultados distantes dos demais, as outras

malhas apresentam resultados próximos, devendo-se, ainda, realizar uma avaliação mais rigorosa a fim de confirmar quais resultados poderão ser considerados como válidos. Além disso, como foi visto para as linhas de corrente e pressão, o modelo de turbulência $\kappa - \omega$ também apresenta resultados similares ao modelo $\kappa - \varepsilon$ para a velocidade.

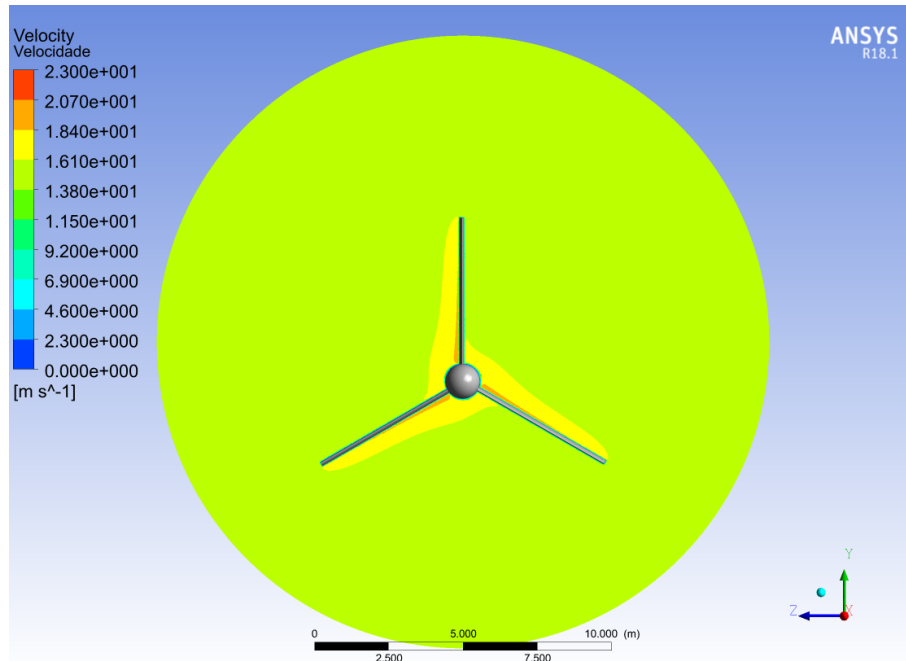


Figura 4.43: Malha 5 - Velocidade no aerogerador (Modelo $\kappa - \omega$)

As figuras 4.44, 4.45, 4.46, 4.47 e 4.48 apresentam as linhas de corrente obtidas pela simulação para as cinco malhas e a velocidade ao longo das linhas de corrente. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente neste trabalho, adotando-se para este caso o modelo de turbulência SST.

As linhas de corrente apresentadas na figura 4.44 possuem velocidades semelhantes nas partes superior e inferior dos aerofólios, evidenciadas pela cor amarela. Assim, como essa observação não é fisicamente esperada, considera-se os resultados para a malha 1 como inválidos.

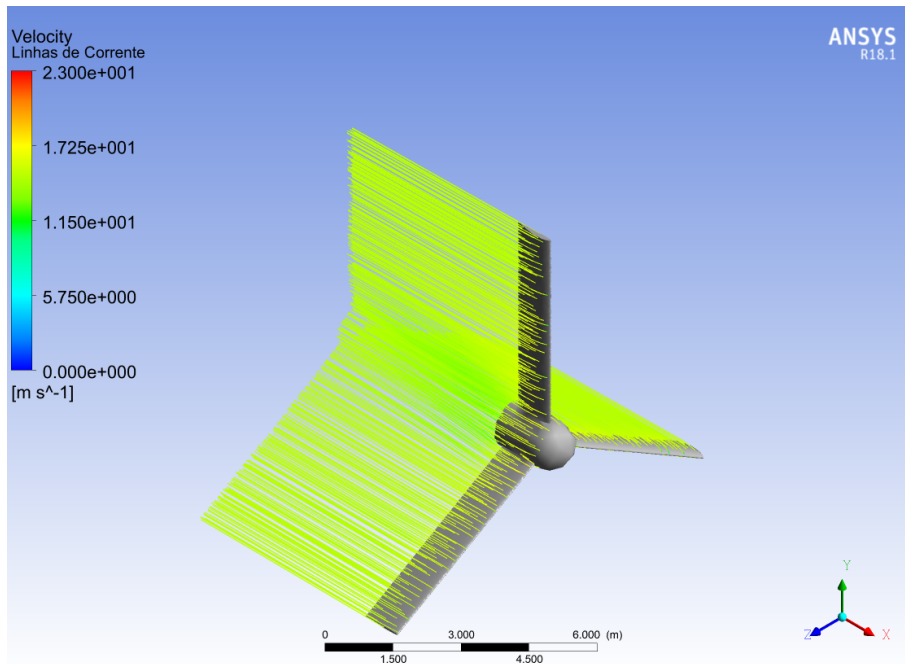


Figura 4.44: Malha 1 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)

As linhas de corrente da malha 2, apresentadas na figura 4.45, possuem uma maior diferença de velocidade, evidenciada pela cor laranja para maiores velocidades e amarela para velocidades menores, como era esperado. Além disso, as linhas de corrente apresentam um maior desvio em seu percurso, o que também era esperado.

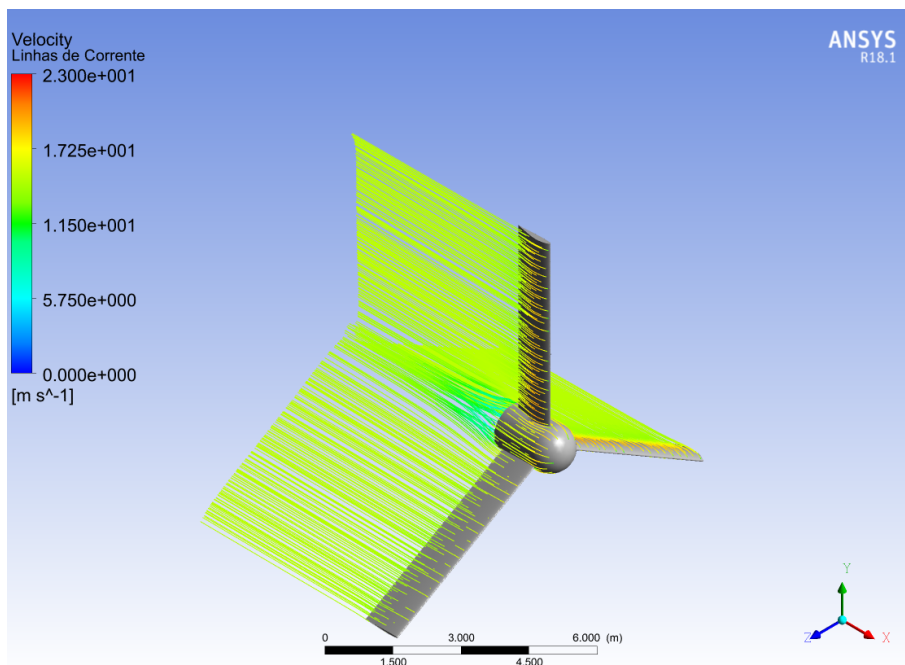


Figura 4.45: Malha 2 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)

As linhas de correntes obtidas com a malha 3, apresentadas na figura 4.46, não apresentam diferenças evidentes em relação as obtidas com a malha 2. Assim, esta

semelhança pode indicar que os resultados estão convergindo.

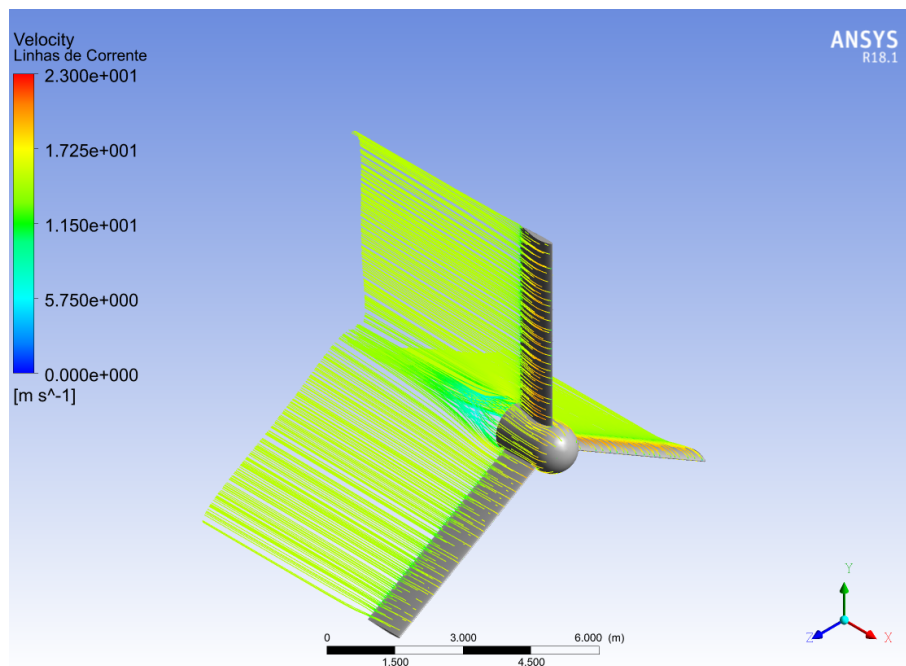


Figura 4.46: Malha 3 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)

As linhas de correntes obtidas com a malha 4, conforme figura 4.32, também não apresentam diferenças evidentes em relação as obtidas com as malhas 2 e 3. Assim, é de se esperar que resultados convergidos possam ser obtidos a partir da malha 2 ou 3.

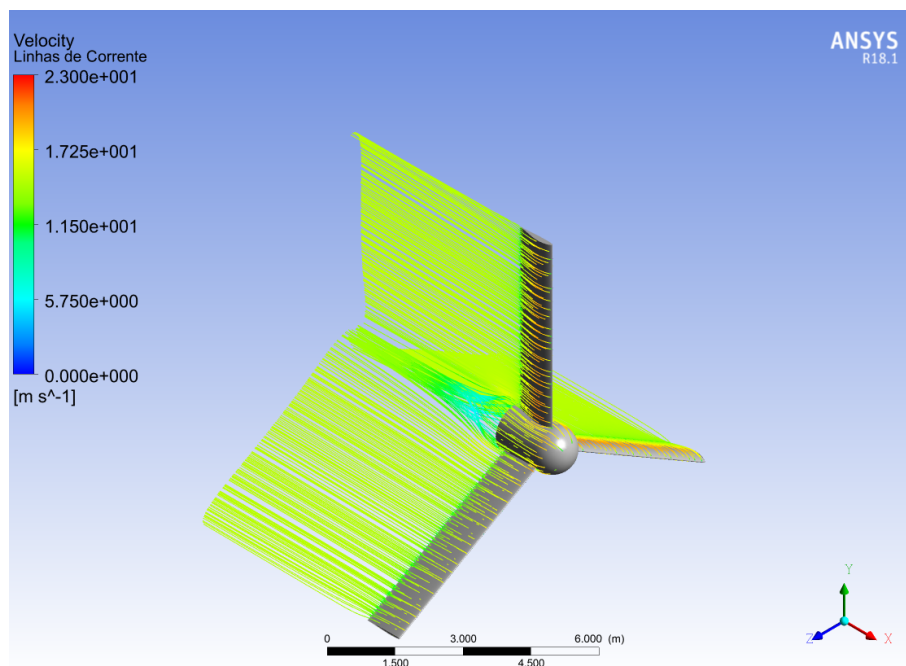


Figura 4.47: Malha 4 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)

Como era esperado, os resultados da malha 5, figura 4.48, também não possuem

diferenças evidentes. Assim, primeiramente, pode-se concluir que a malha 1 irá produzir resultados inválidos para este modelo de turbulência enquanto é esperado uma convergência dos resultados das demais malhas. Também é importante notar que os resultados para este modelo de turbulência se assemelham aos gerados pelos outros modelos de turbulência utilizados neste trabalho.

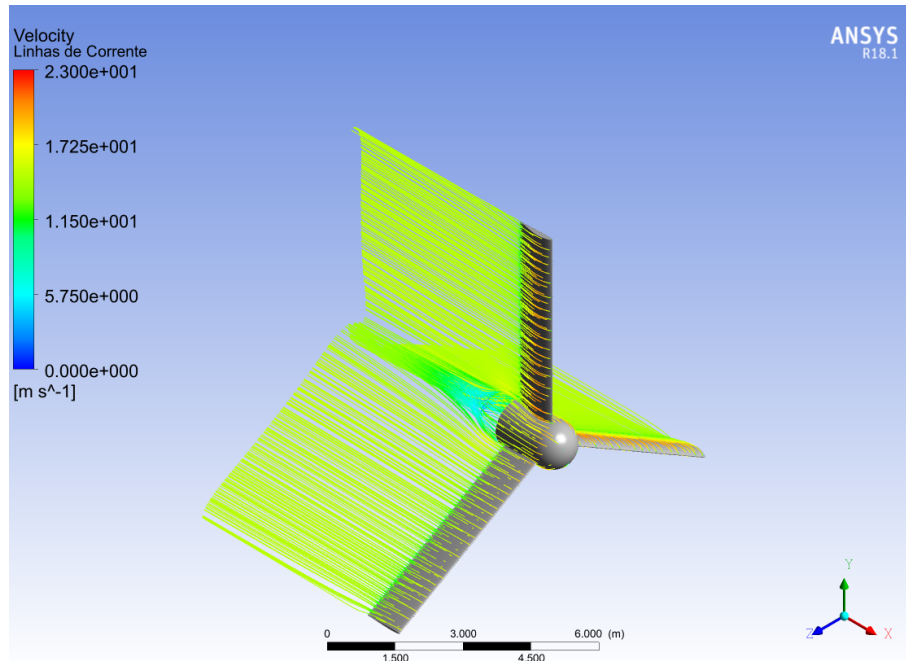


Figura 4.48: Malha 5 - Linhas de corrente no aerogerador (Modelo SST)

As figuras 4.49, 4.50, 4.51, 4.52 e 4.53 apresentam os resultados obtidos para a pressão ao redor do aerogerador pela simulação para as cinco malhas. Os resultados que são apresentados estão localizados a 0,5 metros do bordo de ataque do aerofólio, ou seja, na metade da extensão de seu perfil. Além disso, os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado o modelo de turbulência SST.

Os resultados de pressão para a malha 1, apresentados pela figura 4.49, mostram uma pequena diferença de pressão entre o lado superior e inferior do aerofólio, evidenciada pela cor verde em ambos os lados. Como já foi visto anteriormente, a diferença de pressão é a responsável pelo funcionamento do aerogerador. Assim, os resultados obtidos para a malha 1 não são considerados como corretos.

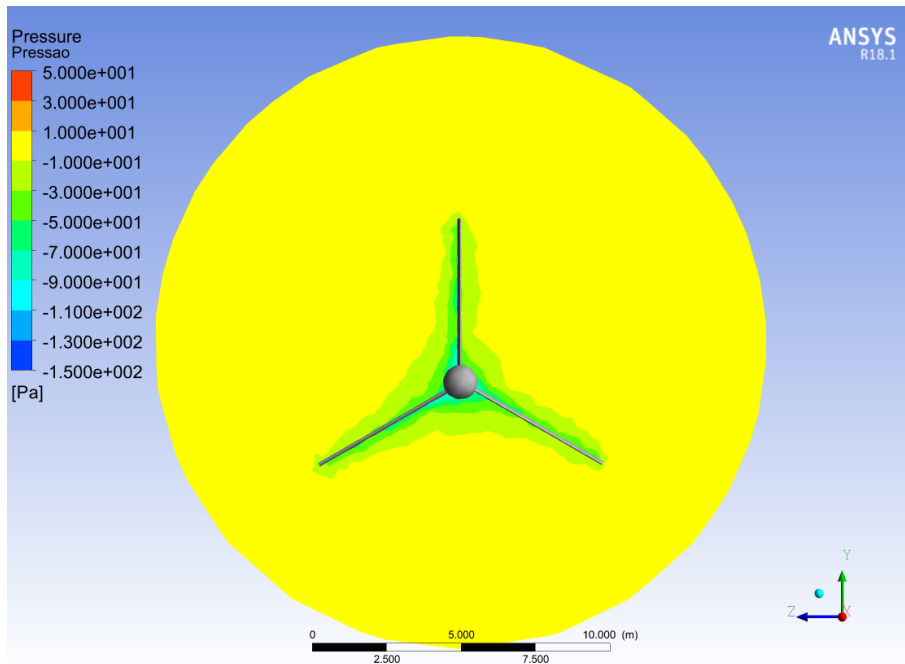


Figura 4.49: Malha 1 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)

A figura 4.50 apresenta resultados mais coerentes. Uma maior diferença de pressão é observada, com uma pressão menor de um lado evidenciada pela cor verde, podendo significar que os resultados em questão estão representando corretamente a realidade.

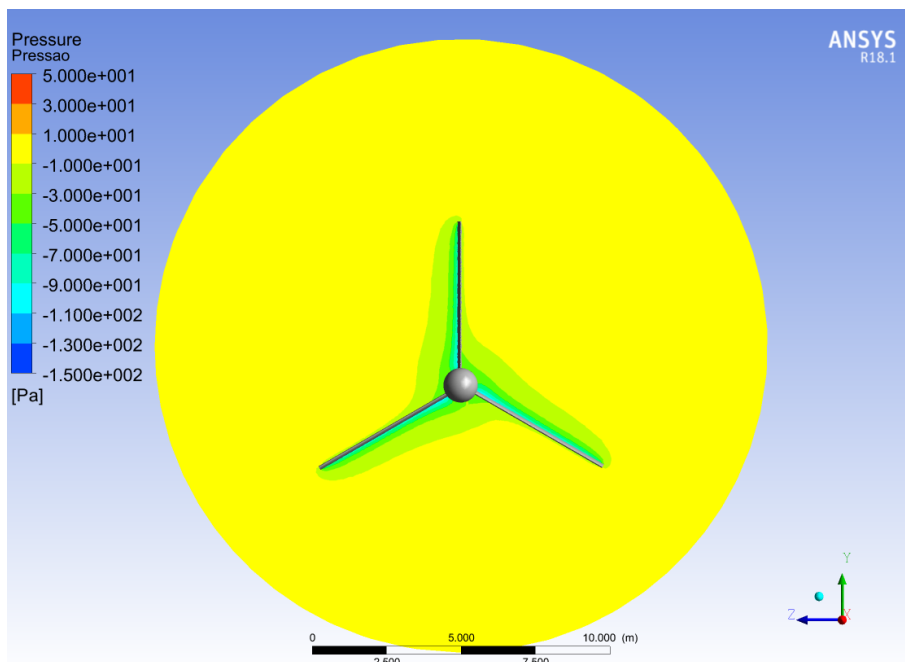


Figura 4.50: Malha 2 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)

A pressão obtida com a malha 3, que é apresentada na figura 4.51, se assemelha a pressão obtida com a malha 2. Dessa forma, espera-se que a convergência esteja

sendo atingida.

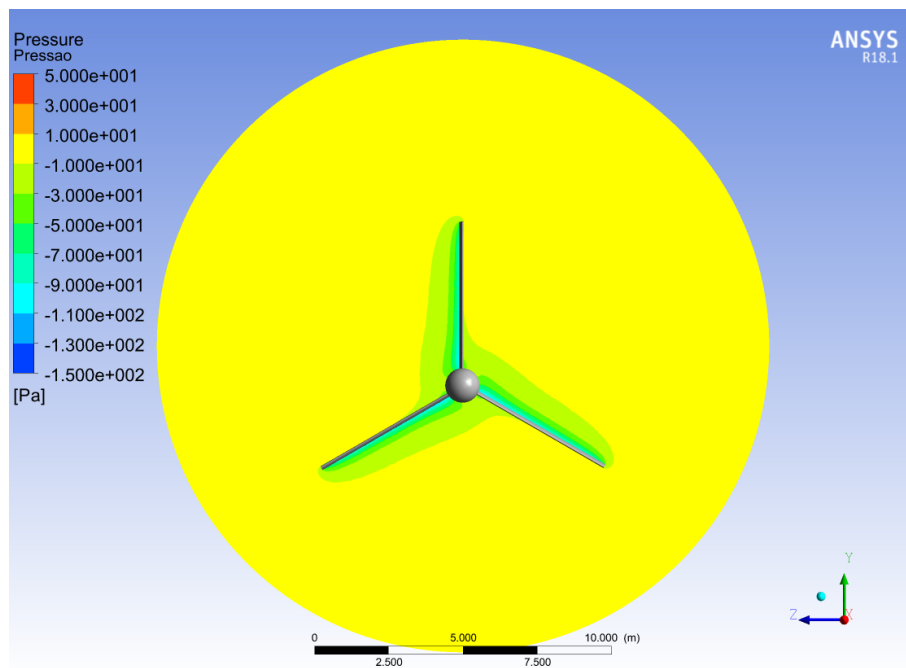


Figura 4.51: Malha 3 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)

A malha 4 apresenta resultados semelhantes as malhas 2 e 3, conforme era esperado. Estes resultados estão apresentados na figura 4.52.

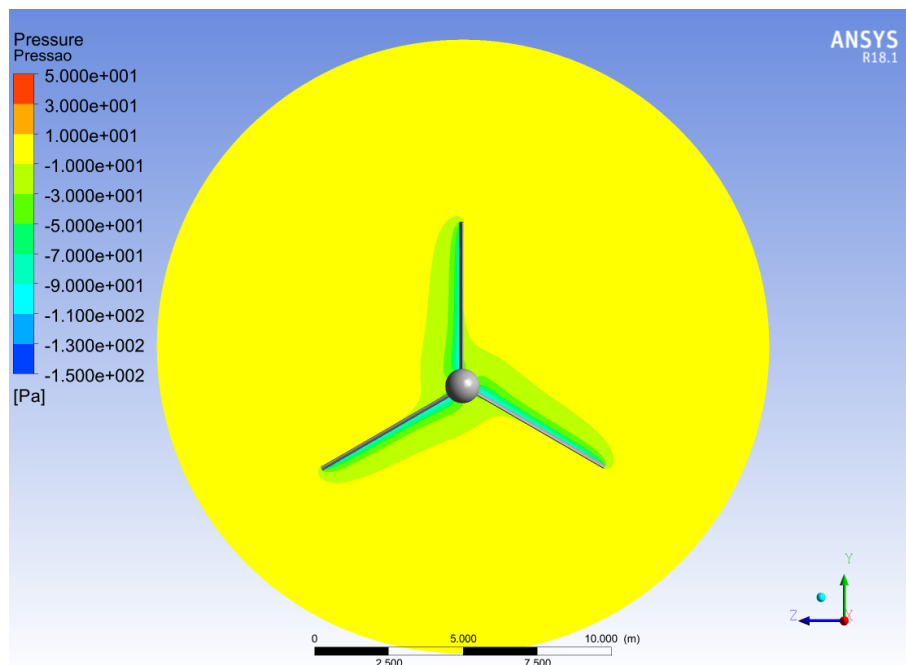


Figura 4.52: Malha 4 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)

Os resultados da malha 5, figura 4.53, semelhantes aos anteriores, servem para confirmar a convergência de malha. Assim, é possível concluir que a malha 1 não

apresenta resultados compatíveis, enquanto as demais malhas devem ser avaliadas a fim de confirmar a validade de seus resultados. Finalmente, também se observa que este modelo de turbulência gerou resultados similares aos outros dois modelos de turbulência utilizados.

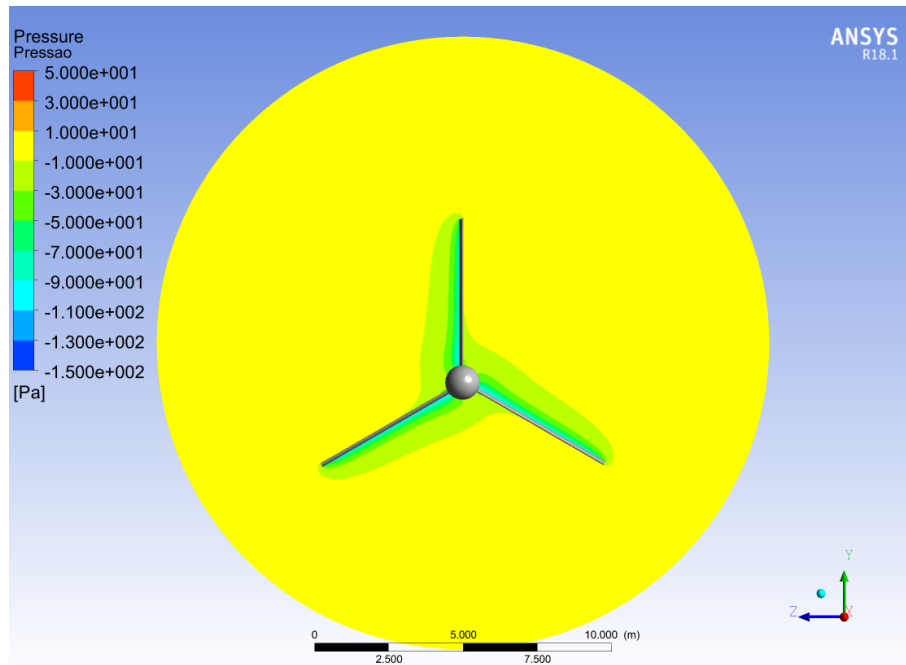


Figura 4.53: Malha 5 - Pressão no aerogerador (Modelo SST)

As figuras 4.54, 4.55, 4.56, 4.57 e 4.58 apresentam os resultados obtidos do módulo da velocidade do ar ao redor do aerogerador pela simulação para as cinco malhas. Os resultados que são apresentados estão localizados a 0,5 metros do bordo de ataque do aerofólio, ou seja, na metade da extensão de seu perfil. Além disso, os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado o modelo de turbulência SST.

A figura 4.54 apresenta resultados de velocidade fisicamente incoerentes para a malha 1. Esta incoerência se deve a irregularidade dos contornos de velocidade e a pequena diferença de velocidade entre os lados inferior e superior do aerofólio, visto que ambos não são esperados para este caso. Assim, estes resultados são considerados incorretos.

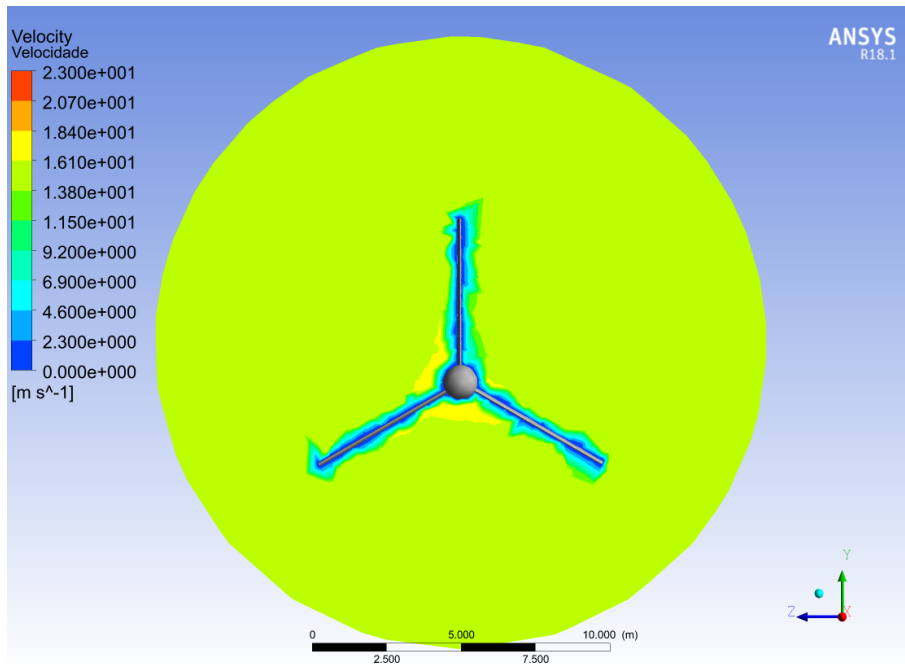


Figura 4.54: Malha 1 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)

Os resultados de velocidade da malha 2, figura 4.55, por outro lado, estão de acordo com o que era fisicamente esperado. Assim, acredita-se que os resultados irão convergir para as malhas mais refinadas ou, até mesmo, para esta malha.

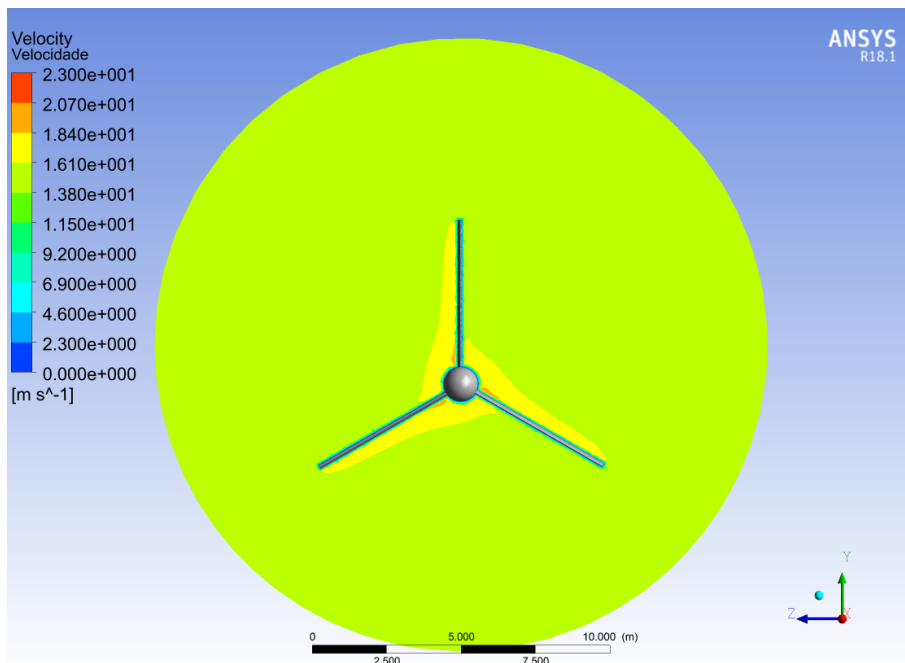


Figura 4.55: Malha 2 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)

A malha 3, conforme figura 4.56, apresenta resultados semelhantes aos obtidos para a malha 2. Nesse sentido, é esperado que esteja atingindo a convergência dos resultados. Entretanto, é importante analisar os resultados obtidos com malhas mais

refinadas a fim de confirmar essa convergência.

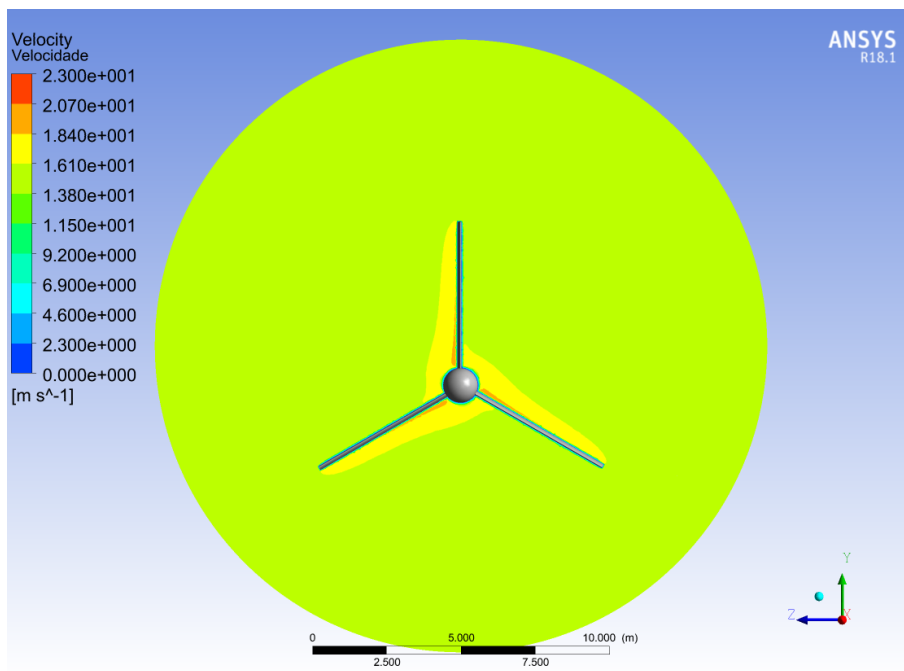


Figura 4.56: Malha 3 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)

Os resultados da malha 4, figura 4.57, também se assemelham aos resultados anteriores. Assim, uma convergência de malha é bastante provável, apesar de ainda ser preciso uma avaliação mais detalhada.

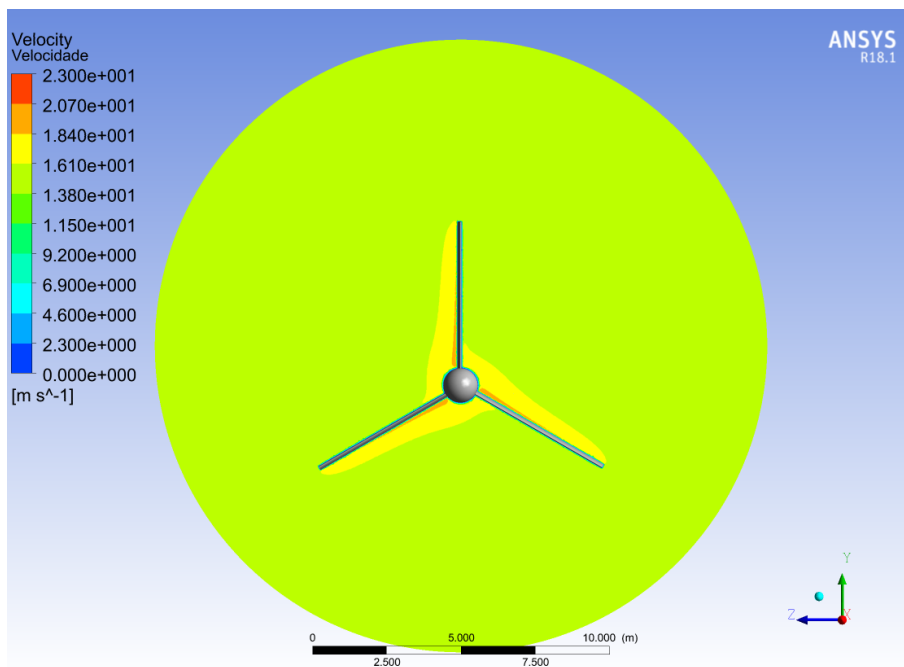


Figura 4.57: Malha 4 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)

Por fim, é possível confirmar com as velocidades obtidas para a malha 5, figura 4.58, que, enquanto a malha 1 apresenta resultados distantes dos demais, as outras

malhas apresentam resultados próximos, devendo-se, ainda, realizar uma avaliação mais rigorosa a fim de confirmar quais resultados poderão ser considerados como válidos.

Além disso, como foi visto para as linhas de corrente e pressão, o modelo de turbulência SST também apresenta resultados similares aos modelo $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$ para a velocidade. Assim, os resultados gerados pelos três modelos de turbulência parecem ser próximos para as linhas de corrente, pressão e velocidade.

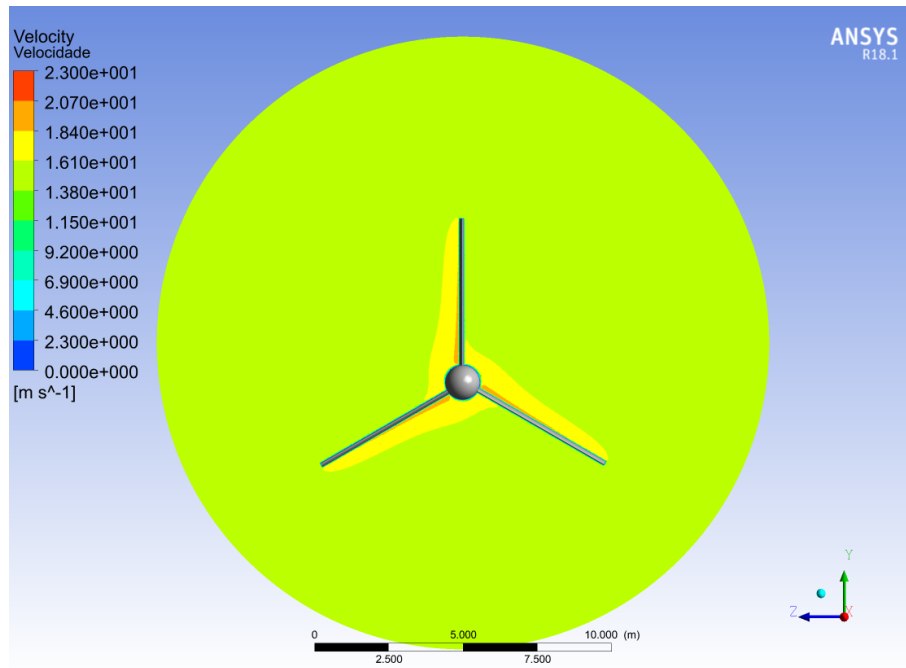


Figura 4.58: Malha 5 - Velocidade no aerogerador (Modelo SST)

As imagens apresentadas são ótimas para visualizar o que está acontecendo no aerogerador, mas elas não são tão boas para efeitos comparativos já que acabam dependendo da percepção do observador. Dessa maneira, também se calculou o torque na direção X para que fosse possível comparar os resultados numericamente.

A tabela 4.2 apresenta o torque no aerogerador na direção do eixo X calculado para cada um dos casos apresentados neste capítulo.

Tabela 4.2: Torques no aerogerador calculados para cada malha

Malha	Torque [N.m]		
	Modelo $\kappa - \varepsilon$	Modelo $\kappa - \omega$	Modelo SST
1	-91,81	-26,11	-23,26
2	1344,68	1374,93	1368,64
3	1823,54	1853,94	1857
4	1829,73	1864,64	1867,86
5	1830,4	1869,75	1869,53

É possível observar que as malhas 3, 4 e 5 apresentam resultados próximos, com uma diferença inferior a 1%, enquanto as malhas 1 e 2 apresentam resultados mais distantes, com diferença superior a, respectivamente, 100% e 250%, para os três modelos de turbulência. Assim, é possível chegar a conclusão que as malhas 3, 4 e 5 convergem e os seus resultados são satisfatórios.

Através dos valores obtidos para o torque foi possível concluir que os resultados gerados pela malha 2 não eram válidos, algo que não foi possível observar pela comparação entre as figuras apresentadas. Assim, tal fato confirma a necessidade de uma comparação numérica e não apenas gráfica.

Além disso, é possível confirmar que, para esse caso, os modelos de turbulência apresentados geram resultados semelhantes com uma discrepância inferior a 3%. Os resultados obtidos com os modelos $\kappa - \omega$ e SST são ainda mais próximos com uma diferença menor que 0,5%. Assim, os três modelos de turbulência são adequados para o caso estudado.

Diante desse contexto, para as futuras simulações, será utilizada a malha 3 neste trabalho visto que esta possui um menor custo computacional ao mesmo tempo que produz resultados válidos. E o modelo de turbulência utilizado será o SST, visto que este tende a ser, geralmente, o que produz resultados mais próximos da realidade.

Para uma melhor compreensão do problema, mais resultados do escoamento em estudo são apresentados. Estes resultados, apresentados nas figuras 4.59, 4.60 e 4.61, foram obtidos apenas para a malha 3 utilizando um modelo de turbulência SST.

A figura 4.59 mostra em detalhe as linhas de corrente ao redor de uma pá do aerogerador. Nesta figura é possível observar a velocidade aumentado na parte superior do aerofólio e reduzindo após o aerofólio, retornando a velocidade que possuía antes da pá.

Ademais, também é possível observar que não há grandes variações de velocidade na direção do comprimento da pá. Isso se deve a consideração realizada de que o aerogerador está em estado estacionário.

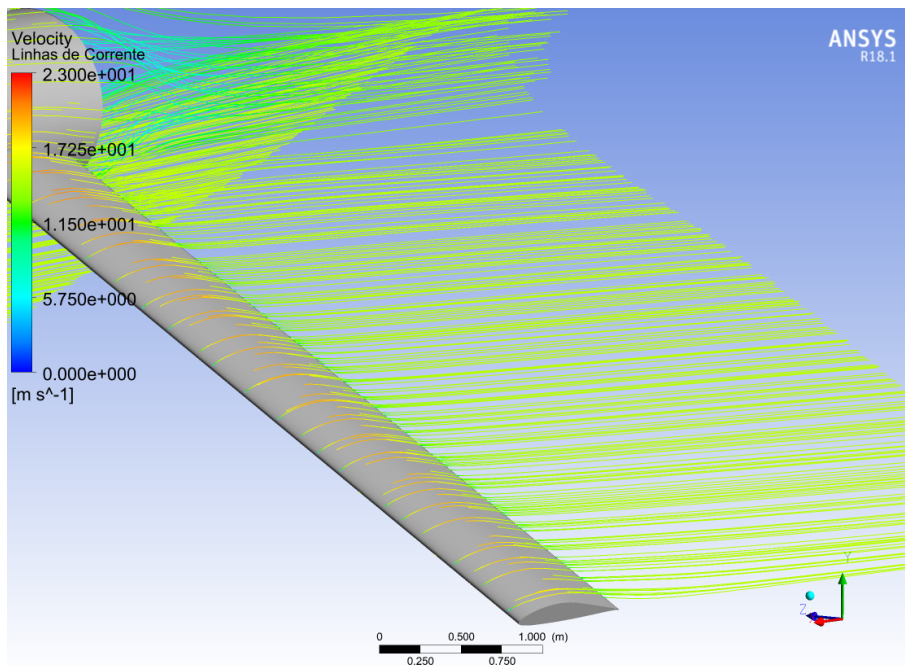


Figura 4.59: Linhas de corrente ao redor de uma das pás do aerogerador.

A figura 4.60 apresenta a configuração de pressão ao redor do aerofólio. Ela mostra que acima do aerofólio existe uma região de baixa pressão e, conseqüentemente, uma diferença entre a pressão acima e abaixo do aerofólio. Tal fato é que possibilita que o aerofólio faça com que o aerogerador entre em movimento.

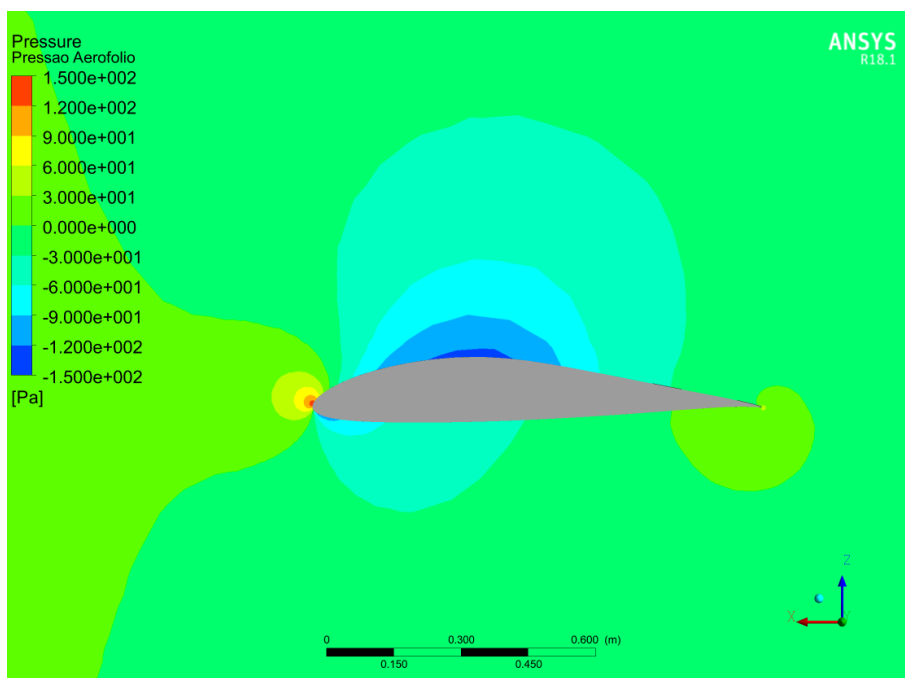


Figura 4.60: Pressão ao redor do aerofólio.

A figura 4.61 apresenta a velocidade do ar ao redor do aerofólio. Na figura é possível observar, como era esperado, uma maior velocidade nas zonas de menor

pressão e uma menor velocidade nas de maior pressão.

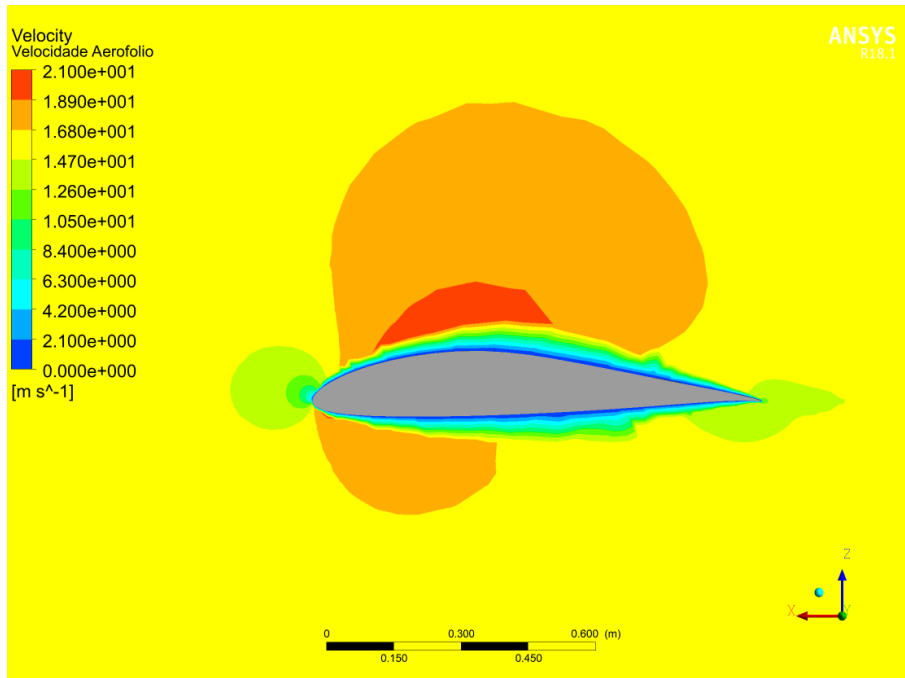


Figura 4.61: Velocidade ao redor do aerofólio.

4.4 Validade do domínio

Conforme mencionado anteriormente neste capítulo, deve-se avaliar a influência do domínio na simulação e certificar-se que o domínio utilizado produzirá resultados satisfatórios. Assim, comparou-se os resultados obtidos para o primeiro domínio com os outros dois domínios. Foram utilizadas malhas com uma densidade de elementos de malha semelhante a da malha 3 já que esta foi considerada a mais eficiente.

As figuras 4.62 e 4.63 apresentam os resultados das linhas de corrente obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo $\kappa - \varepsilon$.

As linhas de corrente obtidas para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.62, são similares as linhas de corrente obtidas anteriormente para o domínio 1 com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$, apresentada na figura 4.16.

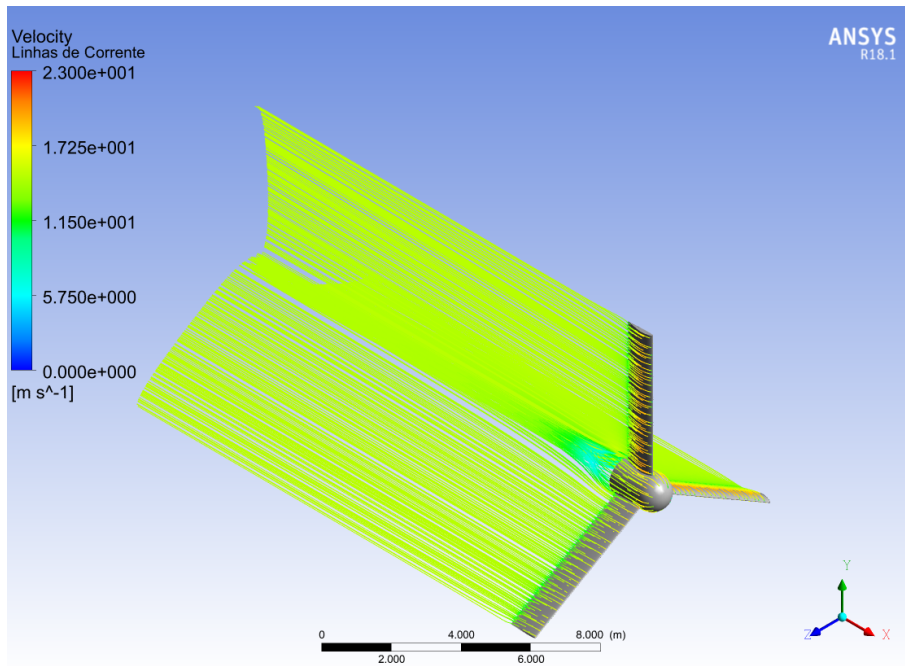


Figura 4.62: Domínio 2: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$

As linhas de corrente obtidas para o domínio 3, conforme apresentado pelas figura 4.63, são similares as linhas de corrente obtidas anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$. Além disso, elas também são similares as linhas de corrente no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.16.

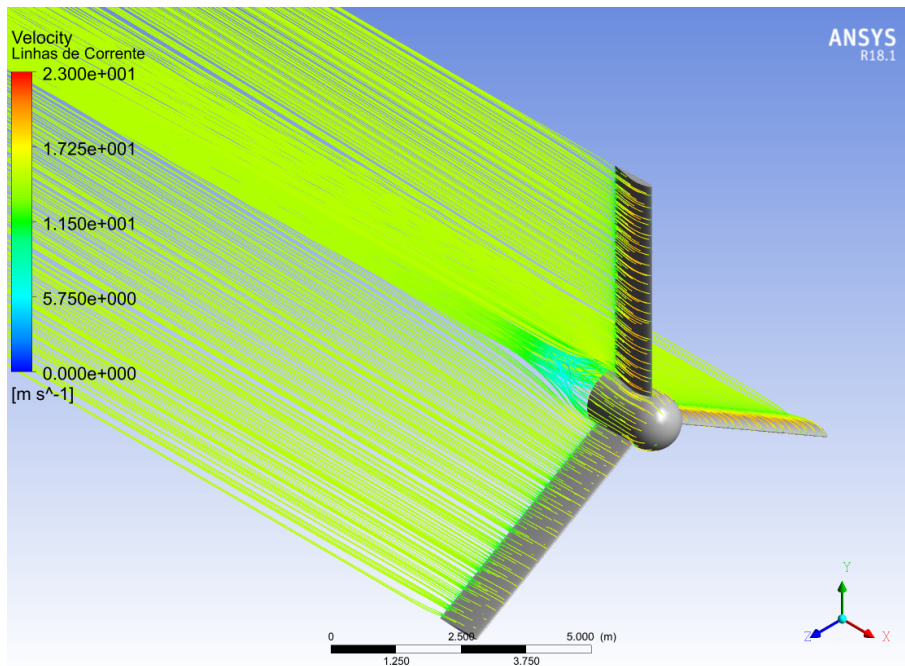


Figura 4.63: Domínio 3: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$

As figuras 4.64 e 4.65 apresentam os resultados da pressão ao redor do aeroge-

rador obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo $\kappa - \varepsilon$.

A pressão ao redor do aerogerador obtida para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.64, é similar a pressão obtida para o domínio 1 com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$, apresentada na figura 4.21.

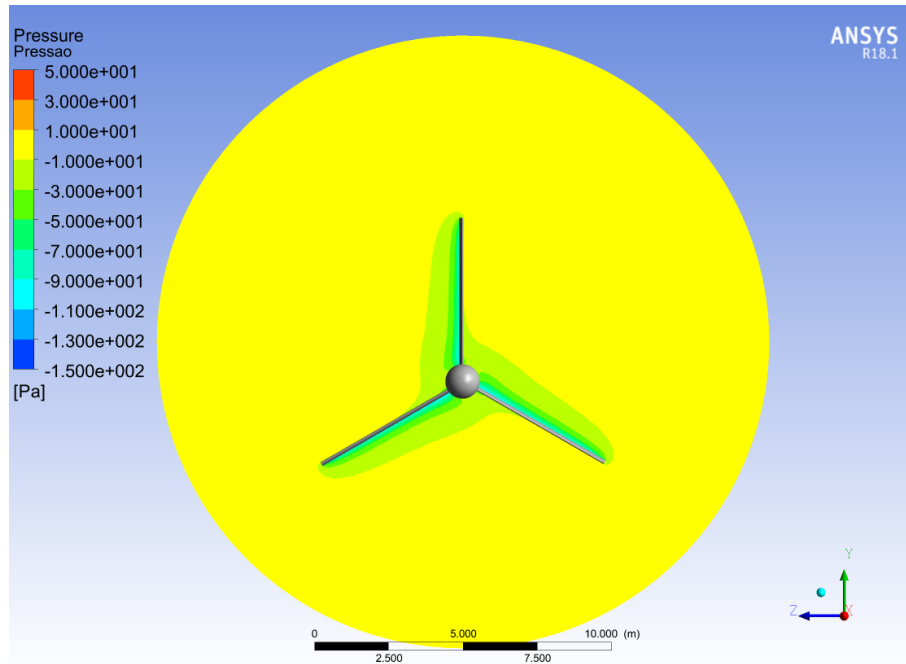


Figura 4.64: Domínio 2: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$

A pressão ao redor do aerogerador obtida para o domínio 3, conforme apresentado pelas figura 4.65, é similar a pressão obtida anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$. Além disso, ela também é similar a pressão no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.21.

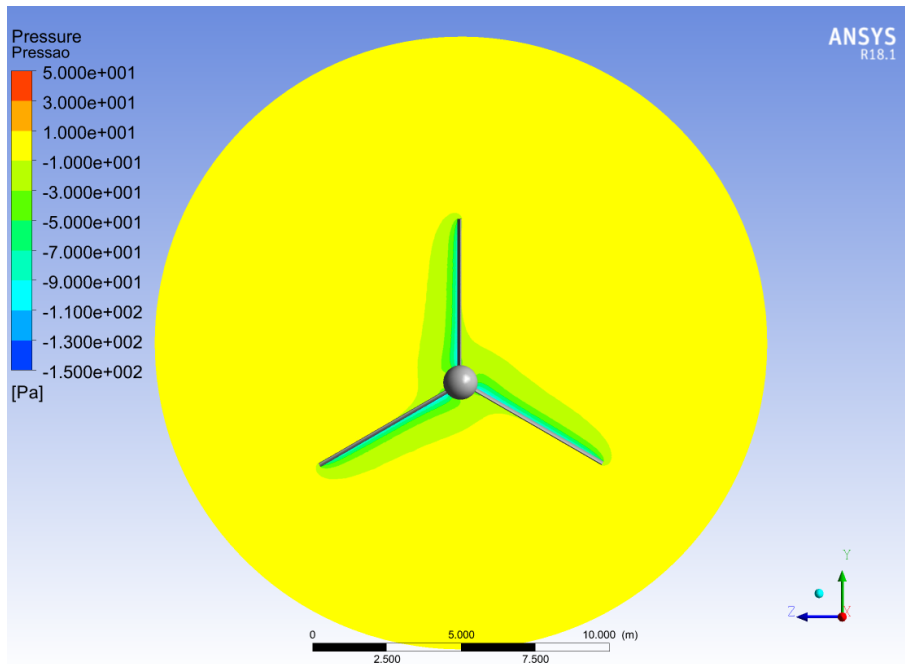


Figura 4.65: Domínio 3: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$

As figuras 4.66 e 4.67 apresentam os resultados do módulo da velocidade do ar ao redor do aerogerador obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo $\kappa - \varepsilon$.

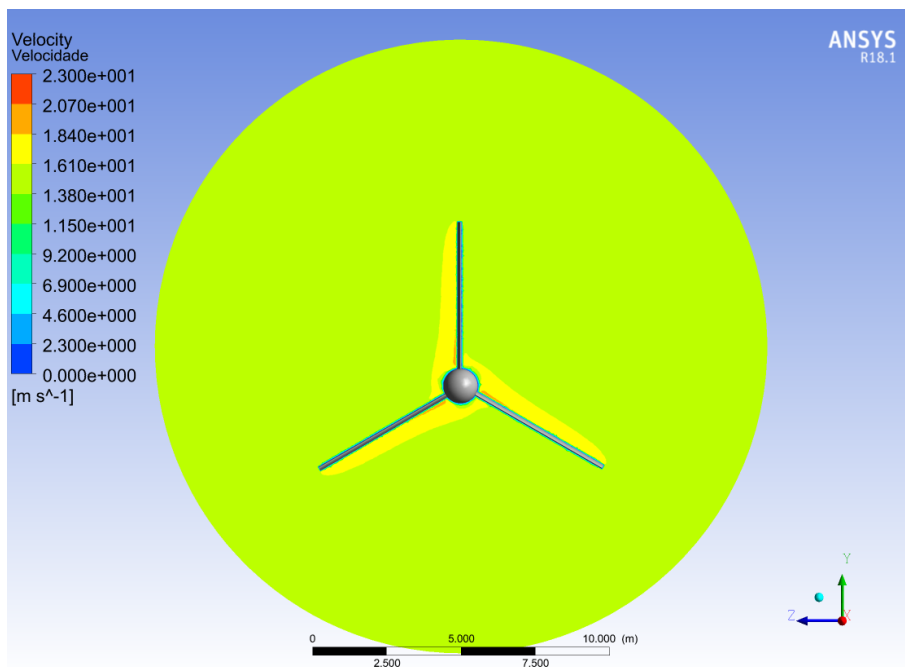


Figura 4.66: Domínio 2: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$

A velocidade do ar obtida para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.66, é similar a velocidade obtida para o domínio 1 com o modelo de turbulência

$\kappa - \varepsilon$, apresentada na figura 4.26.

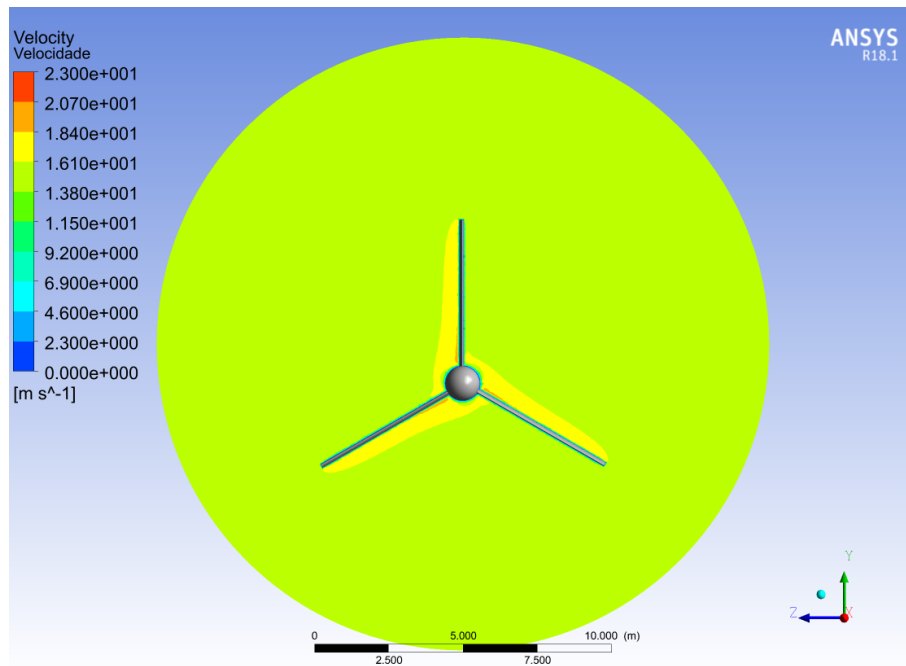


Figura 4.67: Domínio 3: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \varepsilon$

A velocidade do ar obtida para o domínio 3, conforme apresentado pela figura 4.67, é similar a velocidade obtida anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$. Além disso, ela também é similar a velocidade no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.26. Assim, acredita-se que os três domínios apresentam resultados acurados para este caso quando se utiliza este modelo de turbulência.

As figuras 4.68 e 4.69 apresentam os resultados das linhas de corrente obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo $\kappa - \omega$.

As linhas de corrente obtidas para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.68, são similares as linhas de corrente obtidas anteriormente para o domínio 1 com o modelo de turbulência $\kappa - \omega$, apresentada na figura 4.31.

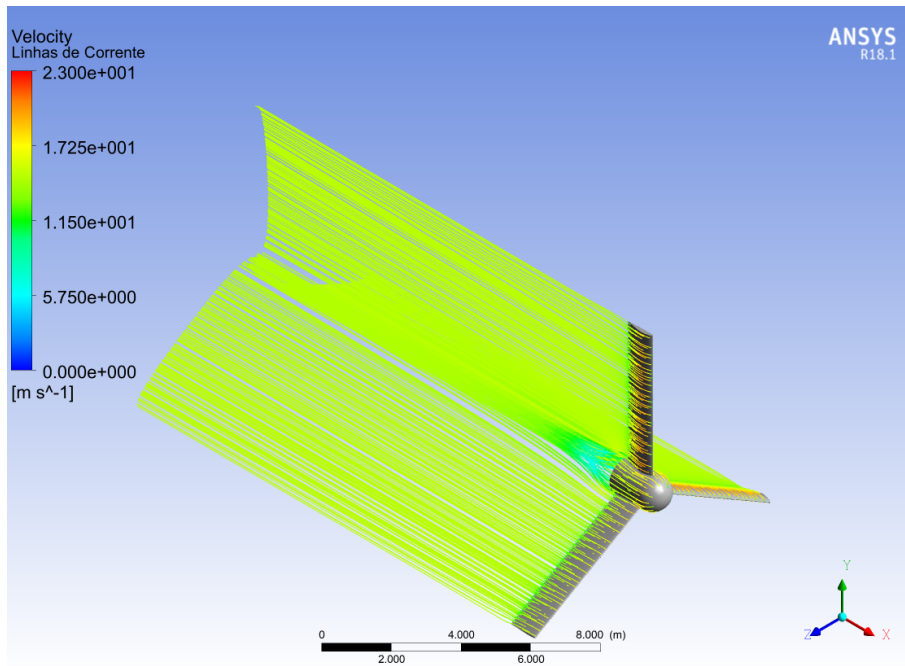


Figura 4.68: Domínio 2: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$

As linhas de corrente obtidas para o domínio 3, conforme apresentado pelas figura 4.69, são similares as linhas de corrente obtidas anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência $\kappa - \omega$. Além disso, elas também são similares as linhas de corrente no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.31.

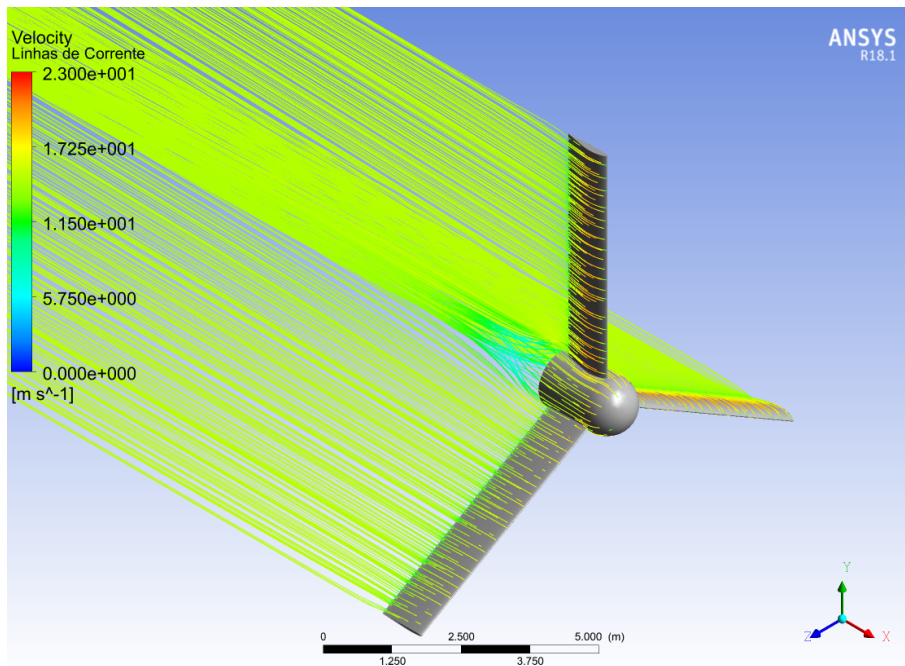


Figura 4.69: Domínio 3: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$

As figuras 4.70 e 4.71 apresentam os resultados da pressão ao redor do aeroge-

rador obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo $\kappa - \omega$.

A pressão ao redor do aerogerador obtida para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.70, é similar a pressão obtida para o domínio 1 com o modelo de turbulência $\kappa - \omega$, apresentada na figura 4.36.

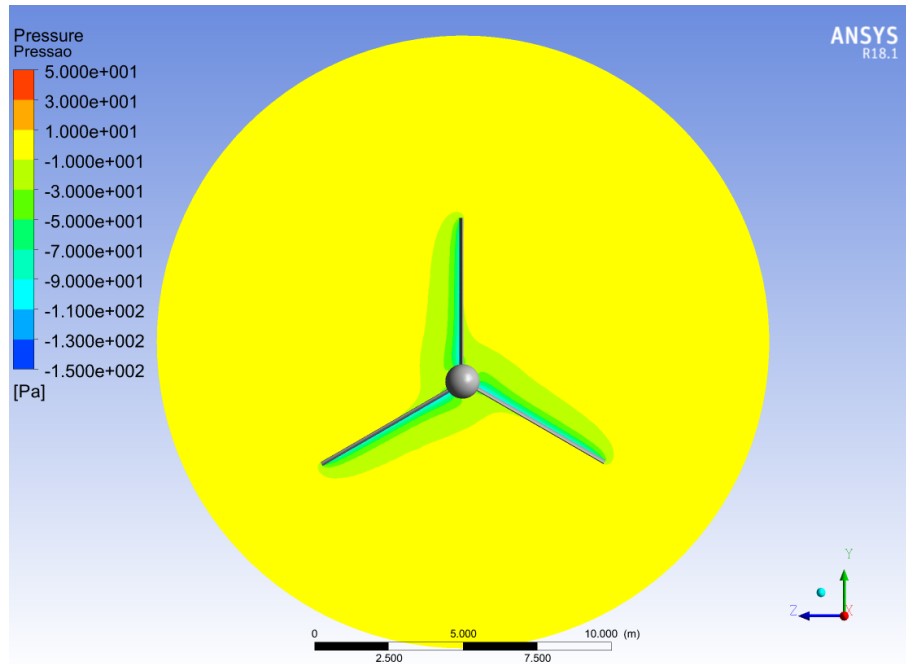


Figura 4.70: Domínio 2: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$

A pressão ao redor do aerogerador obtida para o domínio 3, conforme apresentado pela figura 4.71, é similar a pressão obtida anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência $\kappa - \omega$. Além disso, ela também é similar a pressão no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.36.

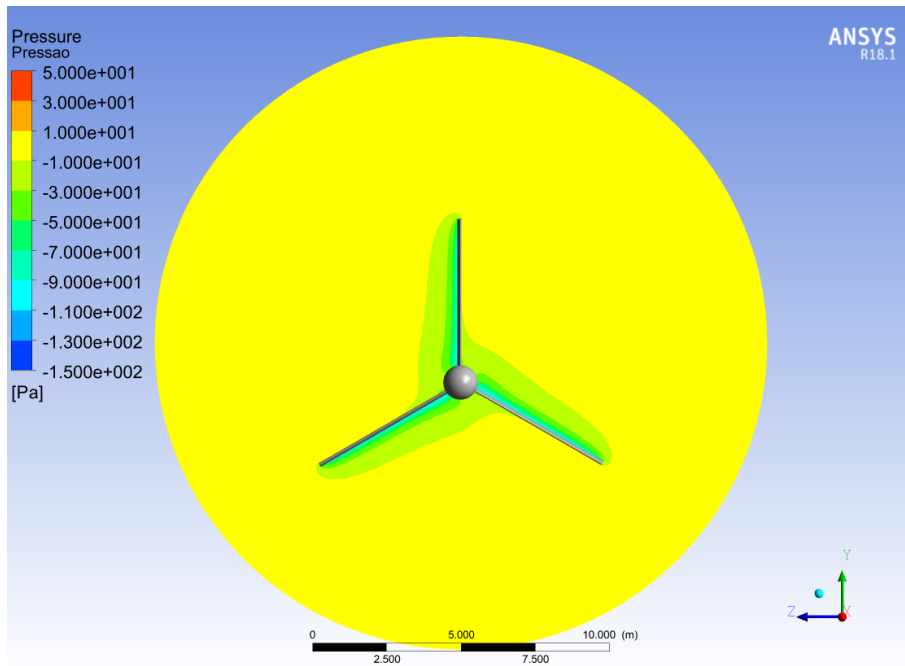


Figura 4.71: Domínio 3: Pressão no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$

As figuras 4.72 e 4.73 apresentam os resultados do módulo da velocidade do ar ao redor do aerogerador obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo $\kappa - \omega$.

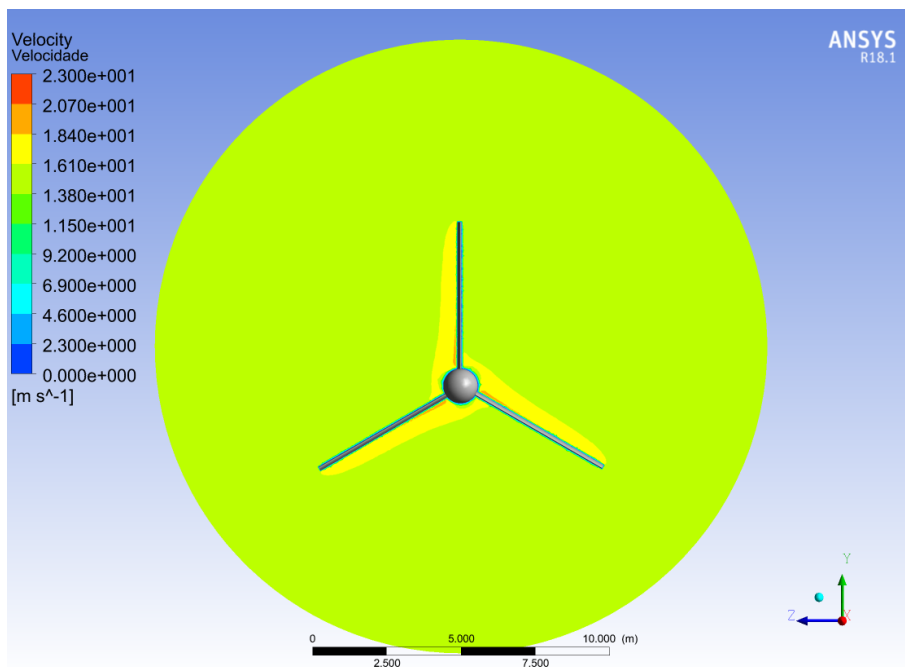


Figura 4.72: Domínio 2: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$

A velocidade do ar obtida para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.72, é similar a velocidade obtida para o domínio 1 com o modelo de turbulência

$\kappa - \omega$, apresentada na figura 4.41.

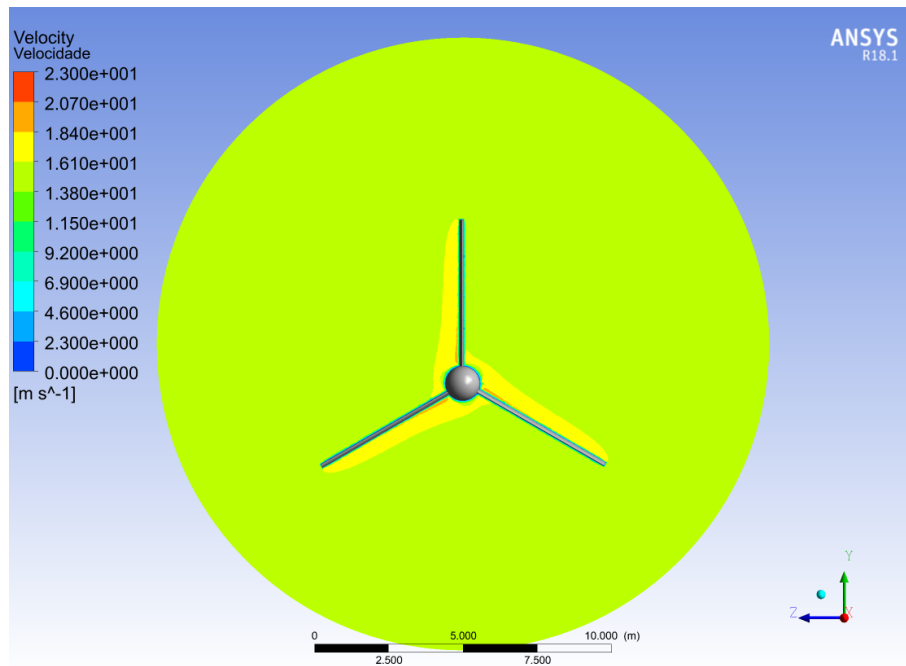


Figura 4.73: Domínio 3: Velocidade no aerogerador - Modelo $\kappa - \omega$

A velocidade do ar obtida para o domínio 3, conforme apresentado pela figura 4.73, é similar a velocidade obtida anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência $\kappa - \omega$. Além disso, ela também é similar a velocidade no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.41. Assim, acredita-se que os três domínios apresentam resultados acurados para este caso quando se utiliza este modelo de turbulência.

As figuras 4.74 e 4.75 apresentam os resultados das linhas de corrente obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo SST.

As linhas de corrente obtidas para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.74, são similares as linhas de corrente obtidas anteriormente para o domínio 1 com o modelo de turbulência SST, apresentada na figura 4.46.

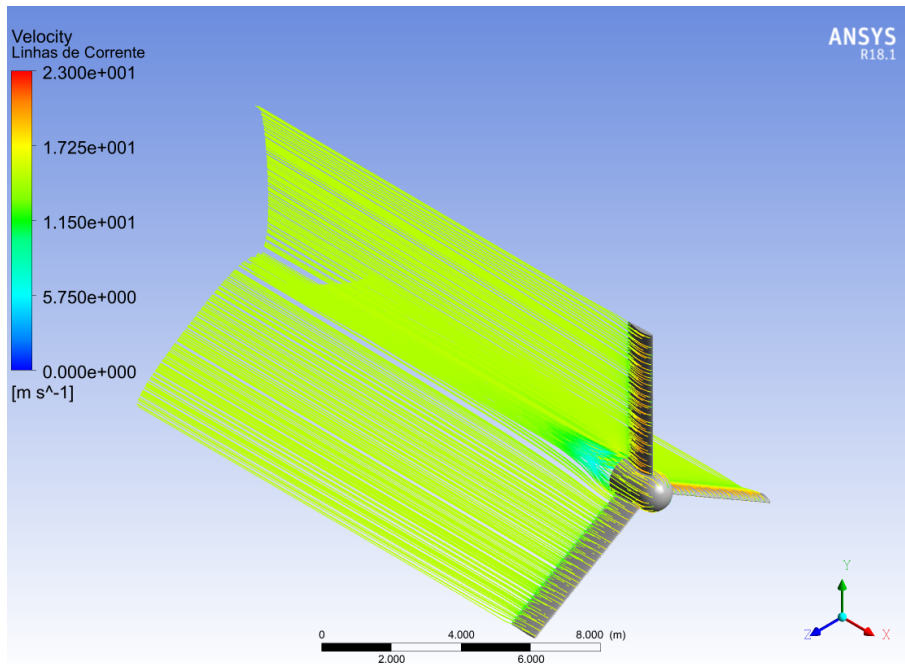


Figura 4.74: Domínio 2: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo SST

As linhas de corrente obtidas para o domínio 3, conforme apresentado pelas figura 4.75, são similares as linhas de corrente obtidas anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência SST. Além disso, elas também são similares as linhas de corrente no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.46.

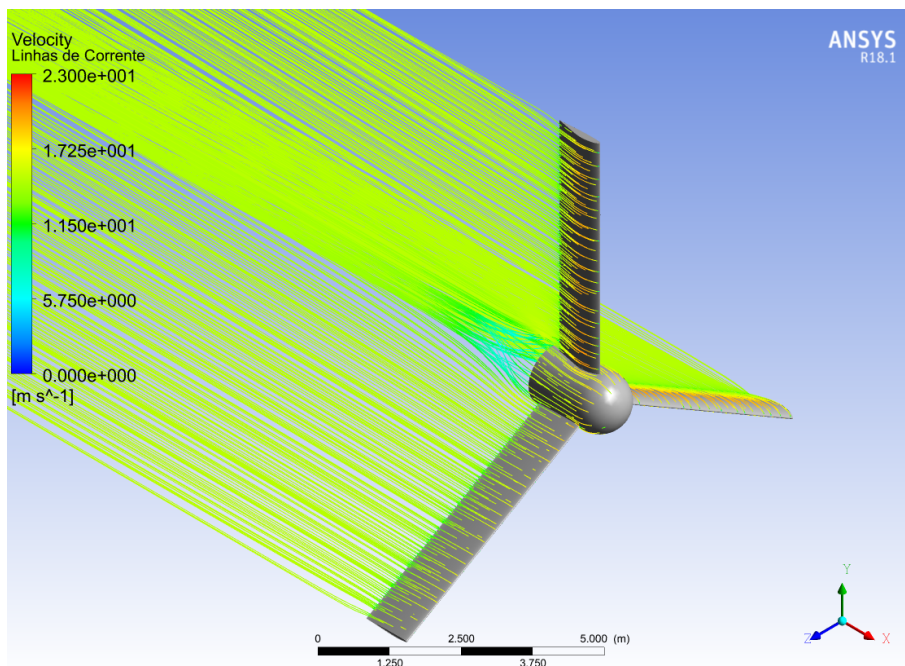


Figura 4.75: Domínio 3: Linhas de corrente no aerogerador - Modelo SST

As figuras 4.76 e 4.77 apresentam os resultados da pressão ao redor do aeroge-

rador obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo SST.

A pressão ao redor do aerogerador obtida para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.76, é similar a pressão obtida para o domínio 1 com o modelo de turbulência SST, apresentada na figura 4.51.

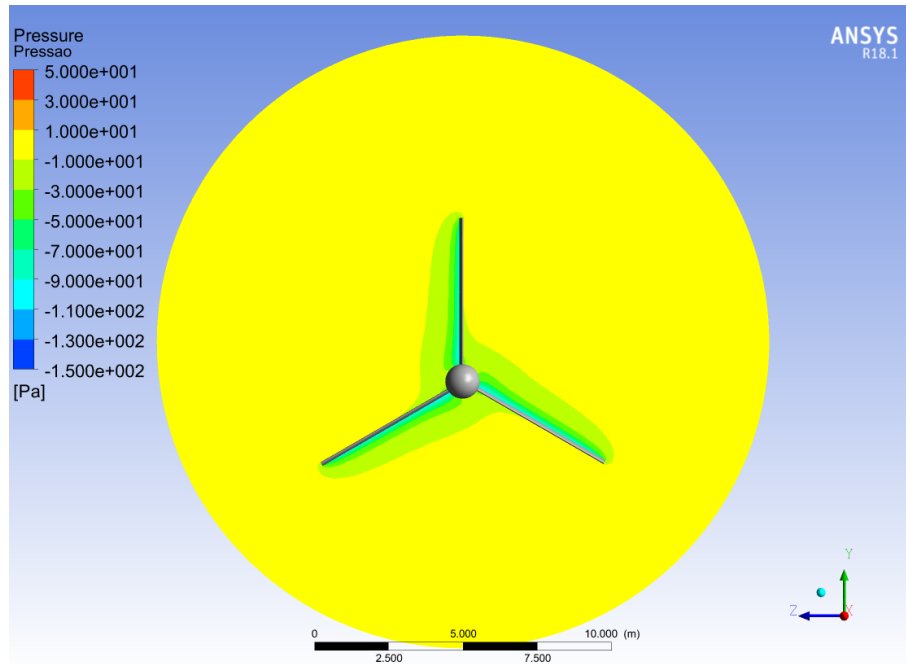


Figura 4.76: Domínio 2: Pressão no aerogerador - Modelo SST

A pressão ao redor do aerogerador obtida para o domínio 3, conforme apresentado pela figura 4.77, é similar a pressão obtida anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência SST. Além disso, ela também é similar a pressão no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.51.

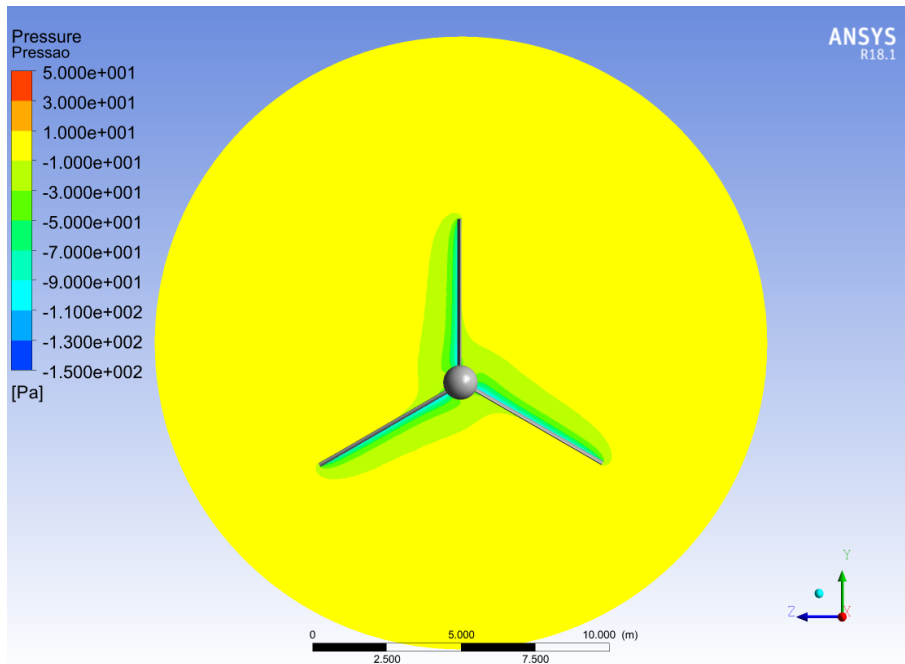


Figura 4.77: Domínio 3: Pressão no aerogerador - Modelo SST

As figuras 4.78 e 4.79 apresentam os resultados do módulo da velocidade do ar ao redor do aerogerador obtidos após a realização da simulação para os dois domínios. Os parâmetros utilizados foram os descritos anteriormente, sendo adotado como modelo de turbulência o modelo SST.

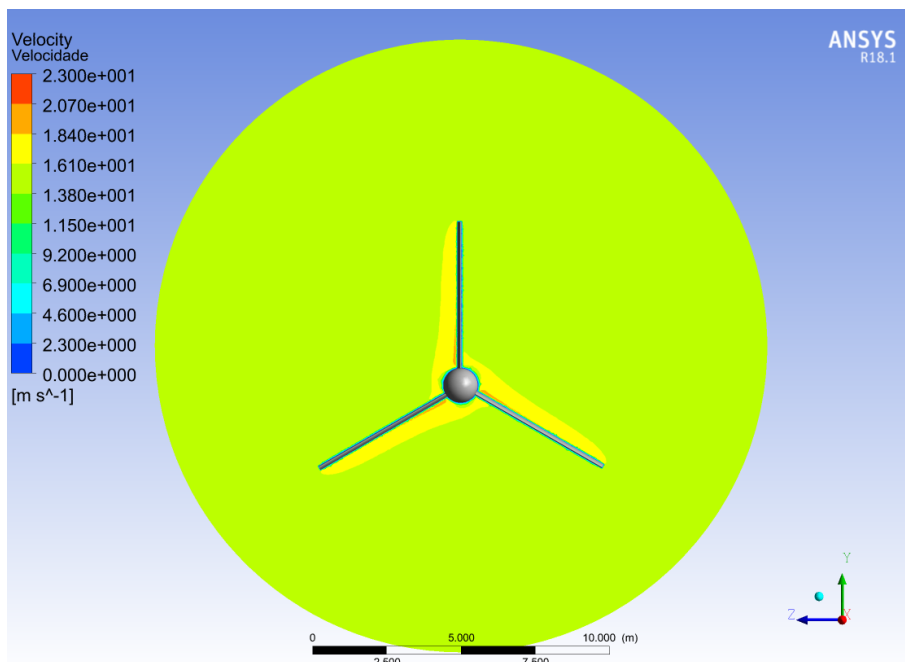


Figura 4.78: Domínio 2: Velocidade no aerogerador - Modelo SST

A velocidade do ar obtida para o domínio 2, conforme apresentado pela figura 4.78, é similar a velocidade obtida para o domínio 1 com o modelo de turbulência

SST, apresentada na figura 4.56.

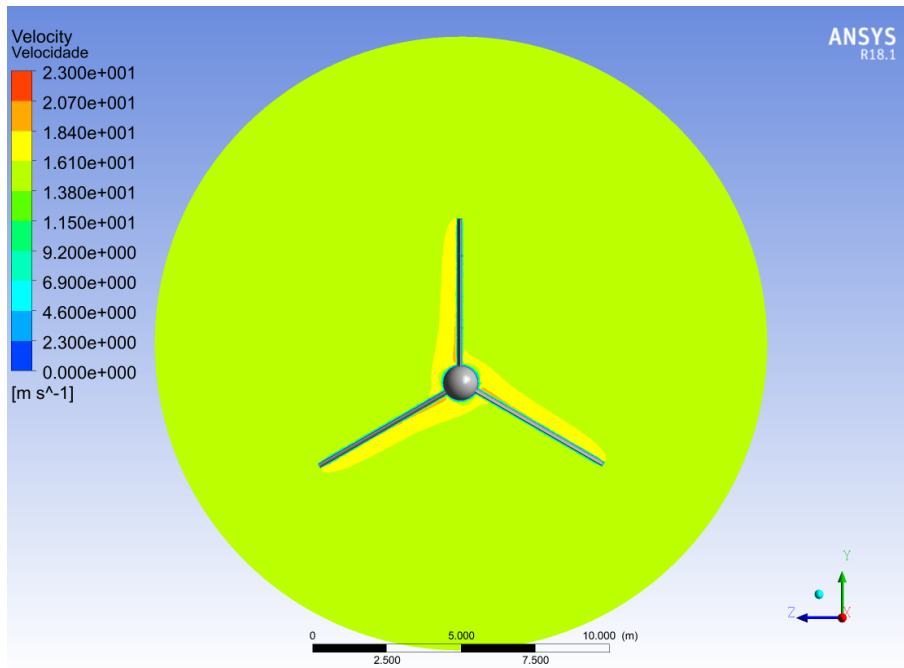


Figura 4.79: Domínio 3: Velocidade no aerogerador - Modelo SST

A velocidade do ar obtida para o domínio 3, conforme apresentado pelas figura 4.79, é similar a velocidade obtida anteriormente para o domínio 2 com o modelo de turbulência SST. Além disso, ela também é similar a velocidade no domínio 1 para o mesmo modelo de turbulência, apresentada na figura 4.56. Assim, acredita-se que os três domínios apresentam resultados acurados para este caso quando se utiliza este modelo de turbulência.

Além disso, é importante notar a semelhança entre os resultados obtidos para os três modelos, conforme já foi observado na análise de convergência de malha. Assim, é esperado que os três modelos de turbulência apresentados neste trabalho retornem resultados compatíveis.

Conforme foi feito anteriormente, calculou-se o torque de cada caso a fim de realizar uma comparação mais eficiente. Assim, a tabela 4.3 apresenta o torque no aerogerador na direção do eixo X calculado para cada domínio.

Tabela 4.3: Torques no aerogerador calculados para cada dominio

Domínio	Torque [N.m]		
	Modelo $\kappa - \varepsilon$	Modelo $\kappa - \omega$	Modelo SST
1	1823,54	1853,94	1857
2	1796,39	1835,13	1838,66
3	1812,32	1850,61	1850,66

É possível identificar uma pequena diferença entre os valores obtidos em cada

domínio, que é inferior a 2%. Outra observação é que a diferença entre os valores obtidos para cada modelo de turbulência também é pequena, inferior a 3%.

Assim, primeiramente, pode-se afirmar que o domínio 1 apresenta resultados válidos e também é o domínio mais eficiente já que necessita de um menor custo computacional. Além disso, é possível confirmar o que já estava sendo observado anteriormente, que os modelos de turbulência $\kappa - \varepsilon$, $\kappa - \omega$ e SST apresentam resultados compatíveis.

4.5 Processamento

A etapa de processamento ocorre após a definição das entradas do programa, que, neste caso, foram a malha computacional e as condições do problema, definidas neste capítulo. Essa etapa consiste na resolução numérica realizada pelo computador.

Para todas as simulações realizadas neste trabalho, foi utilizado um computador com processador 64 bits Intel Core i7-7500U CPU 2.70 GHz com arquitetura de 64 bits e com uma memória RAM de de 8 GB.

A tabela 4.4 apresenta o tempo gasto durante a etapa de processamento para cada simulação apresentada neste capítulo.

Tabela 4.4: Tempo de processamento para cada simulação

Simulação	Tempo		
	Modelo $\kappa - \varepsilon$	Modelo $\kappa - \omega$	Modelo SST
Malha 1	22 s	20 s	22 s
Malha 2	4 mins	4 mins	5 mins
Malha 3	27 mins	25 mins	29 mins
Malha 4	58 mins	46 mins	62 mins
Malha 5	1 hora	1 hora	4 horas
Domínio 2	29 mins	22 mins	36 mins
Domínio 3	60 mins	26 mins	62 mins

Analisando a tabela 4.4, é possível chegar a conclusão que, para o caso estudado, o modelo SST é o que mais demanda tempo de processamento. Em outra partida, o modelo $\kappa - \omega$ precisou, na maioria dos casos, de um menor tempo de processamento. Além disso, de uma forma geral, não há uma grande diferença do tempo exigido pelos três modelos nesta etapa, podendo, assim, utilizá-los sem desvantagens significativas em relação a esse parâmetro.

Por fim, foi definido como critério de parada da simulação que a desigualdade dos balanço de massa e de quantidade de movimento fossem inferior a 10^{-4} . Todas as simulações convergiram e atenderam a este critério.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão estudados aerogeradores de diferentes tamanhos e com diferentes tipos de aerofólios, analisando suas características e definindo os modelos mais eficientes. Para tal estudo, será utilizada a metodologia descrita no capítulo anterior.

Além destas análises citadas, também será analisado o aerogerador em um estado transiente a fim de atestar se o estado estacionário considerado nas simulações anteriores é realmente aplicável.

Será considerado um material compósito de epóxy com fibras de vidro para as pás do aerogerador e ferro fundido para o cubo do aerogerador, pois, de acordo com [19], são materiais comumente utilizados para estes componentes do aerogerador. As massas específicas destes materiais são, respectivamente, $1850\text{kg}/\text{m}^3$ e $7300\text{kg}/\text{m}^3$.

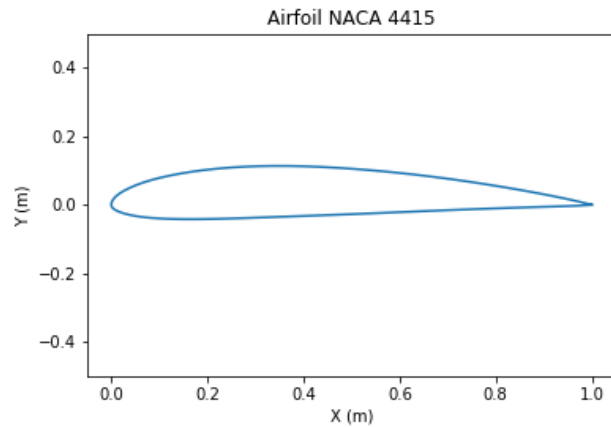
5.1 Estudo de perfis de pá

No capítulo anterior, estudou-se um aerogerador com uma pá de perfil AH-93-W-215 com 5 metros de comprimento e um cubo de 1 metro de diâmetro. Assim, pretende-se estudar um aerogerador com as mesmas dimensões mas com perfis de pá diferente e, dessa forma, avaliar o modelo de pá mais eficiente no ponto de vista aerodinâmico.

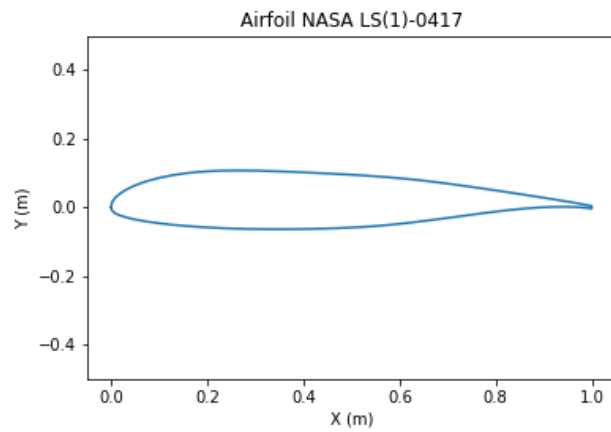
Dentre os diversos perfis de pás utilizados em aerogeradores, conforme [20], estão os perfis NACA 4415, NASA LS(1)-0417 e NREL S809. Através das coordenadas obtidas no site UIUC Airfoil Data Site, utilizou-se o software Python para gerar os perfis mostrados na figura 5.1.

Estudou-se o comportamento aerodinâmico de um aerogerador com estes três tipos de perfil de aerofólio sob as mesmas condições especificadas no capítulo anterior. Neste caso, devido a conclusão de que os modelos de turbulência geram resultados similares, optou-se pela utilização do modelo de turbulência SST. Essa escolha foi motivada pelo fato de que, apesar de que os resultados obtidos para cada modelo

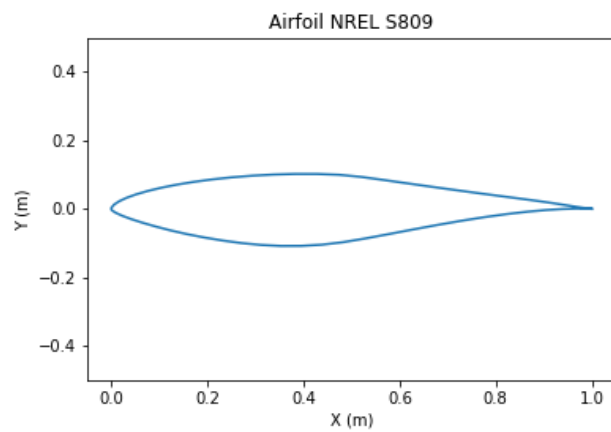
serem bem próximos, o modelo SST é, normalmente, o modelo mais acurado dentre os três.



(a) NACA 4415



(b) NASA LS(1)-0417



(c) Perfil NREL S809

Figura 5.1: Perfis de aerofólio.

Os parâmetros utilizados para estudar os casos anteriores serão usados novamente para o estudo do comportamento do fluido ao redor de aerogeradores com perfis diferentes.

Assim, as linhas de corrente, a pressão e o módulo da velocidade ao redor do aerogerador com aerófolios de perfil NACA 4415 estão representadas, respectivamente, nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4.

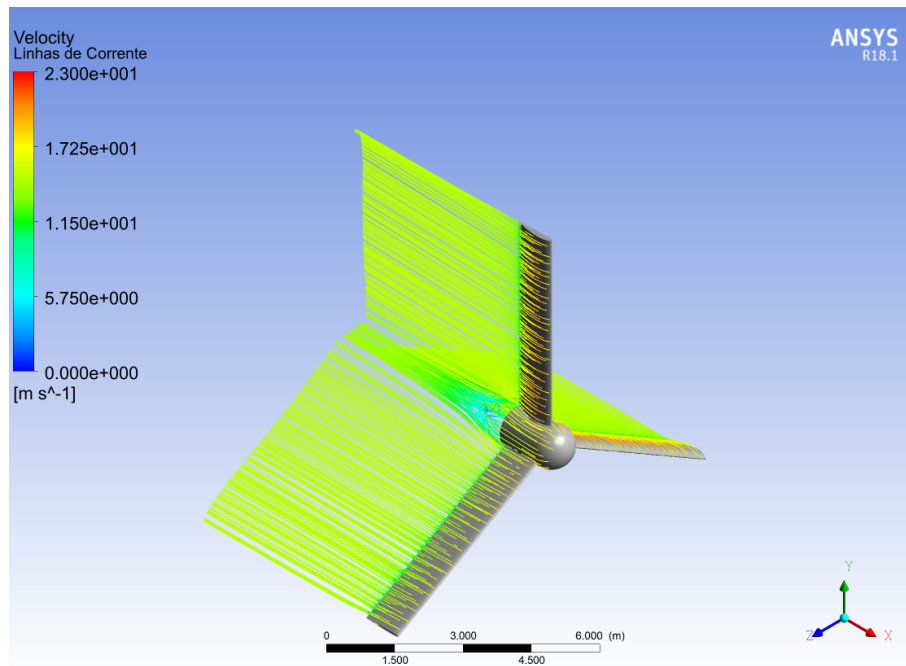


Figura 5.2: Linhas de corrente - NACA 4415

As linhas de corrente obtidas para o perfil NACA 4415 e a velocidade ao longo delas, apresentadas na figura 5.2, são semelhantes as linhas de corrente obtidas para o perfil AH-93-W-215, apresentadas na figura 4.46. Dessa forma, não é possível observar diferenças relevantes entre elas através destas figuras.

A pressão ao redor do perfil NACA 4415, apresentada na figura 5.3, é semelhante a pressão no perfil AH-93-W-215, apresentada na figura 4.51. Assim, também não é possível observar diferenças relevantes entre elas através destas figuras.

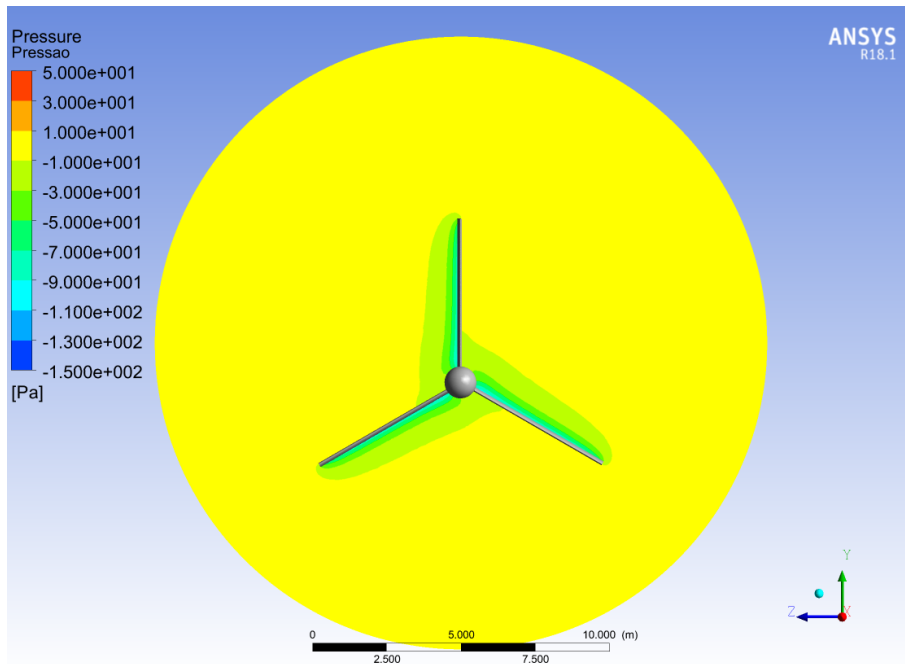


Figura 5.3: Pressão - NACA 4415

A velocidade do ar ao redor do perfil NACA 4415, apresentada na figura 5.4, é semelhante a velocidade no perfil AH-93-W-215, apresentada na figura 4.56. Mais uma vez não é possível observar diferenças relevantes entre elas através destas figuras.

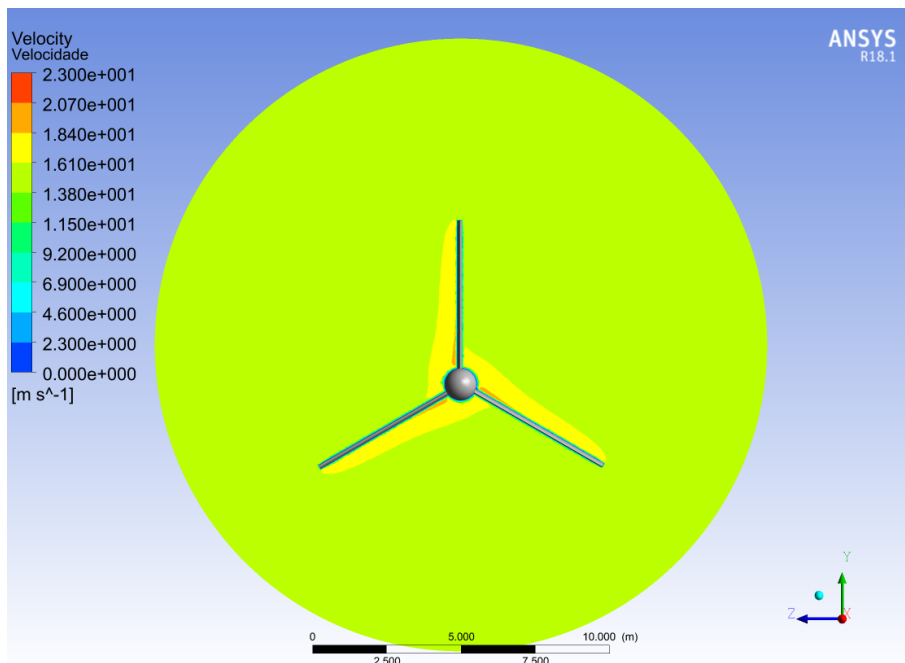


Figura 5.4: Velocidade - NACA 4415

Além disso, as linhas de corrente, a pressão e a velocidade ao redor da pá com o perfil NACA 4415 são apresentadas em detalhe, respectivamente, nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

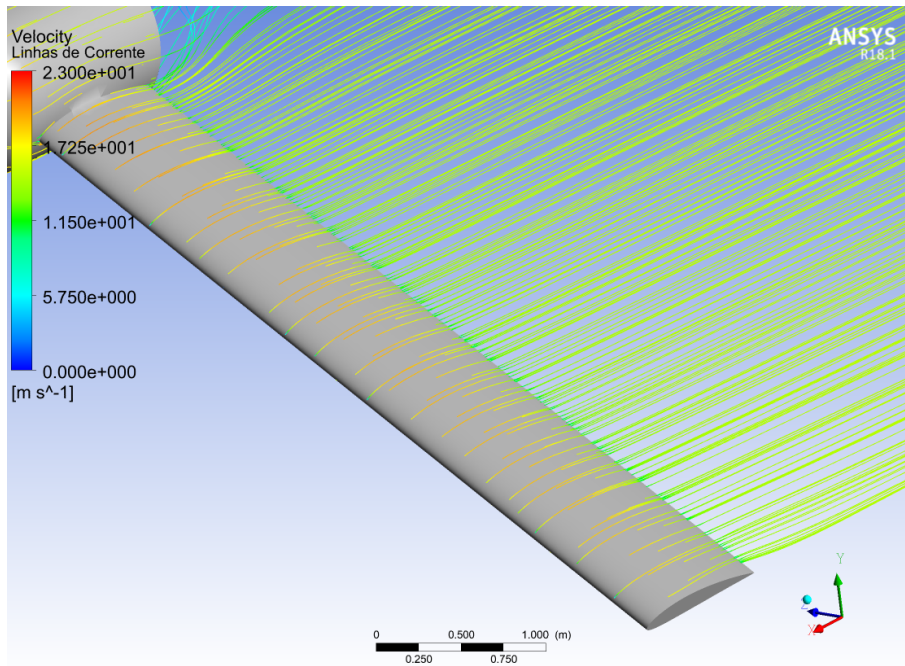


Figura 5.5: Linhas de corrente ao redor de uma das pás - NACA 4415

A figura 5.5 apresenta com mais detalhes as linhas de corrente ao redor de uma das pás com perfil de aerofólio NACA 4415. Assim, nesta figura, é possível observar melhor a velocidade do escoamento aumentando na parte superior do aerofólio.

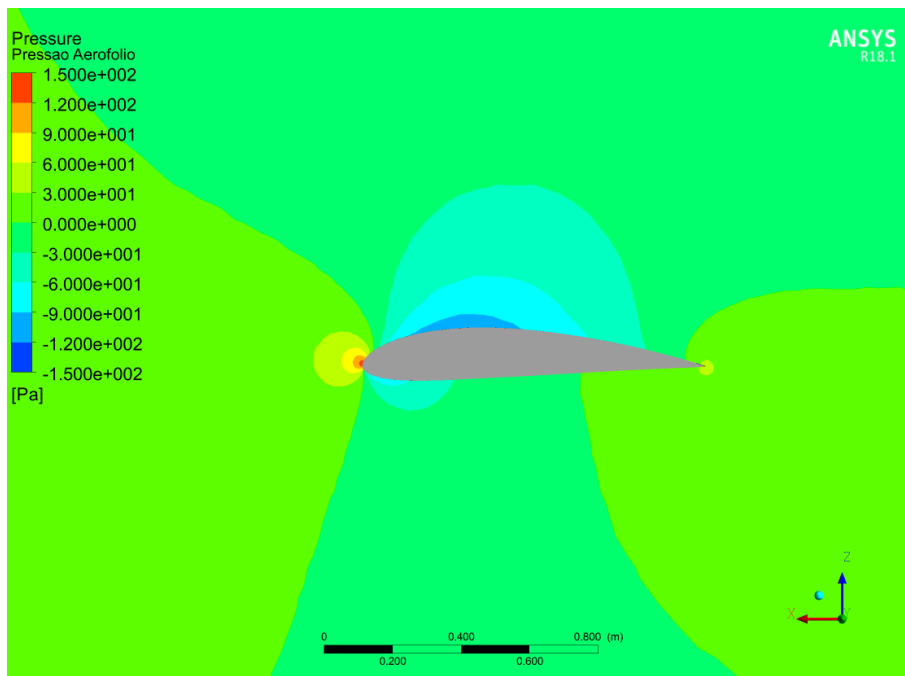


Figura 5.6: Pressão ao redor do aerofólio - NACA 4415

A figura 5.6 apresenta em detalhe a pressão ao redor do aerofólio de perfil NACA 4415. Nesta figura é possível observar com mais clareza a diferença de pressão entre a parte inferior e superior do aerofólio. Além disso, também é possível observar que

esta diferença de pressão é menor que no aerofólio AH-93-W-215, apresentada na figura 4.60.

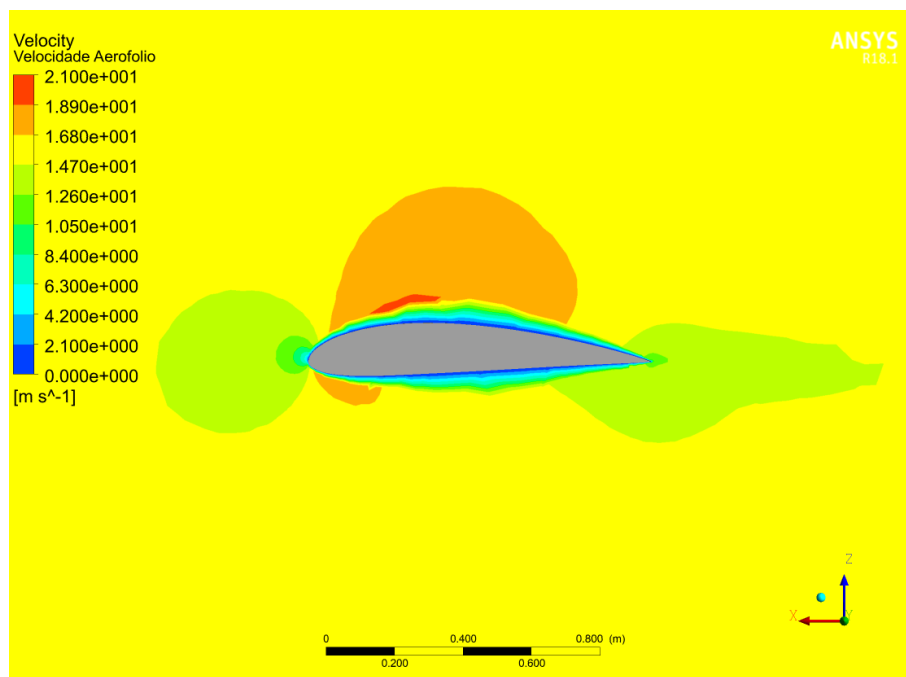


Figura 5.7: Velocidade ao redor do aerofólio - NACA 4415

A figura 5.7 apresenta em detalhe a velocidade ao redor do aerofólio de perfil NACA 4415. Nesta figura é possível observar com mais clareza a diferença de velocidades entre a parte inferior e superior do aerofólio, o que está diretamente ligado a diferença de pressão. Assim, também é possível observar uma menor diferença de velocidade entre as partes superior e inferior em relação ao aerofólio AH-93-W-215, figura 4.61, como foi observado para a pressão.

As linhas de corrente, a pressão e o módulo da velocidade ao redor do aerogerador com aerofólios de perfil NASA LS(1)-0417 estão representadas, respectivamente, nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

Comparando os resultados obtidos para as linhas de corrente para o perfil NASA LS(1)-0417, apresentados na figura 5.8, com os obtidos para o perfil AH-93-W-215, apresentados na figura 4.46, se observa que, enquanto no lado da pá em que a velocidade é maior, possui valores parecidos em ambos os perfis, o outro lado apresenta valores maiores de velocidade no perfil NASA LS(1)-0417 em comparação com AH-93-W-215.

Segundo o princípio de Bernoulli, a velocidade e a pressão de um escoamento são inversamente proporcionais. Assim, essa menor diferença entre as velocidades do ar na parte superior e inferior do perfil evidenciam uma menor diferença entre as pressões atuantes e, conseqüentemente, uma menor força resultante, um menor torque e, portanto, este aerogerador irá gerar menos energia.

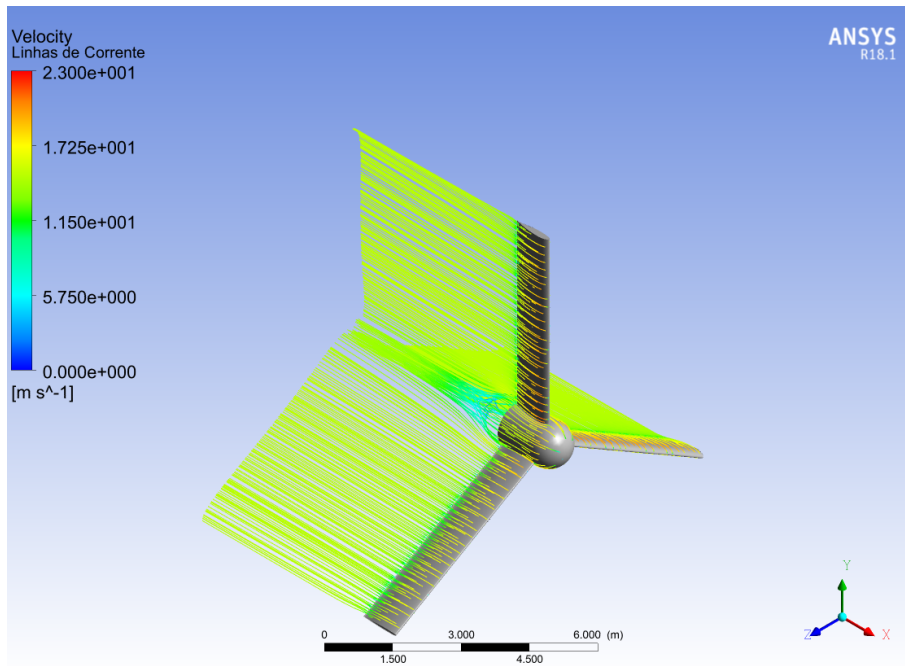


Figura 5.8: Linhas de corrente - NASA LS(1)-0417

Comparando a pressão ao redor dos perfis NASA LS(1)-0417, apresentada na figura 5.9, e AH-93-W-215, apresentada na figura 4.51, é possível concluir que a diferença entre as pressões atuando nos dois lados de cada pá do aerogerador é menor para o perfil NASA LS(1)-0417. Tal observação, corrobora com o que foi observado na comparação entre as linhas de corrente destes perfis, mostrando que o perfil NASA LS(1)-0417 irá apresentar uma menor geração de energia.

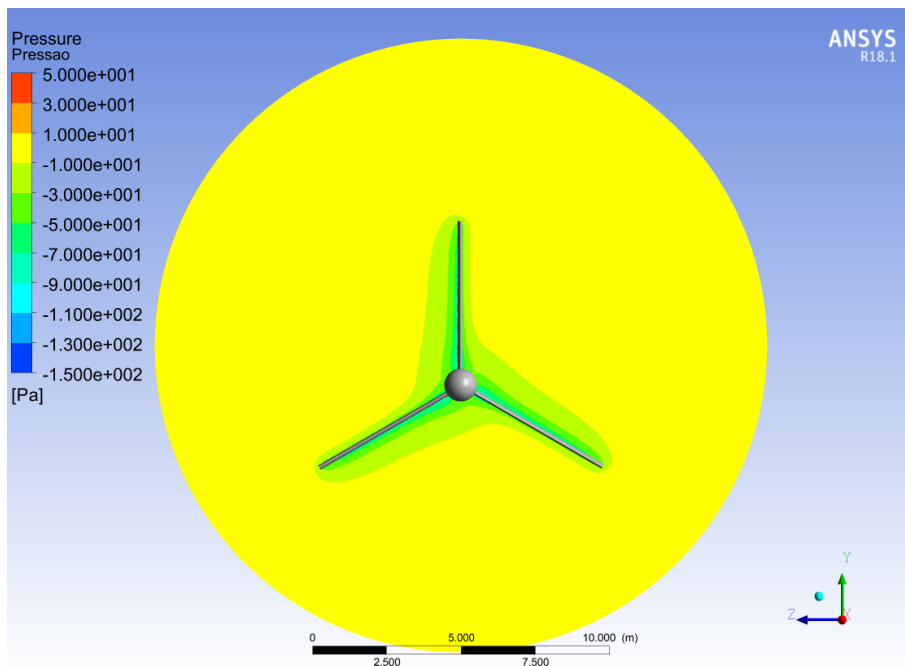


Figura 5.9: Pressão - NASA LS(1)-0417

A comparação entre a velocidade do ar ao redor dos perfis NASA LS(1)-0417 e AH-93-W-215, apresentadas, respectivamente, nas figuras 5.10 e 4.56, ratifica o que foi observado para as linhas de corrente e pressão. Assim, é possível concluir que o perfil AH-93-W-215 é o mais eficiente desta comparação.

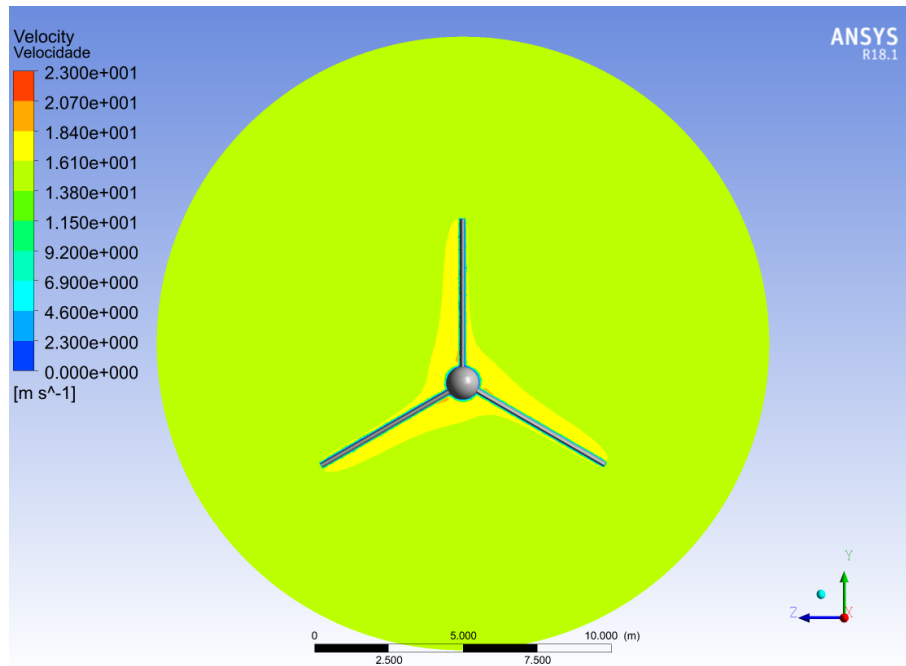


Figura 5.10: Velocidade - NASA LS(1)-0417

Além disso, as linhas de corrente, a pressão e a velocidade ao redor da pá com o perfil NASA LS(1)-0417 são apresentadas em detalhe, respectivamente, nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13.

A figura 5.11 apresenta com mais detalhes as linhas de corrente ao redor de uma das pás com perfil de aerofólio NASA LS(1)-0417. Assim, nesta figura, é possível observar melhor a velocidade do escoamento aumentando na parte superior do aerofólio.

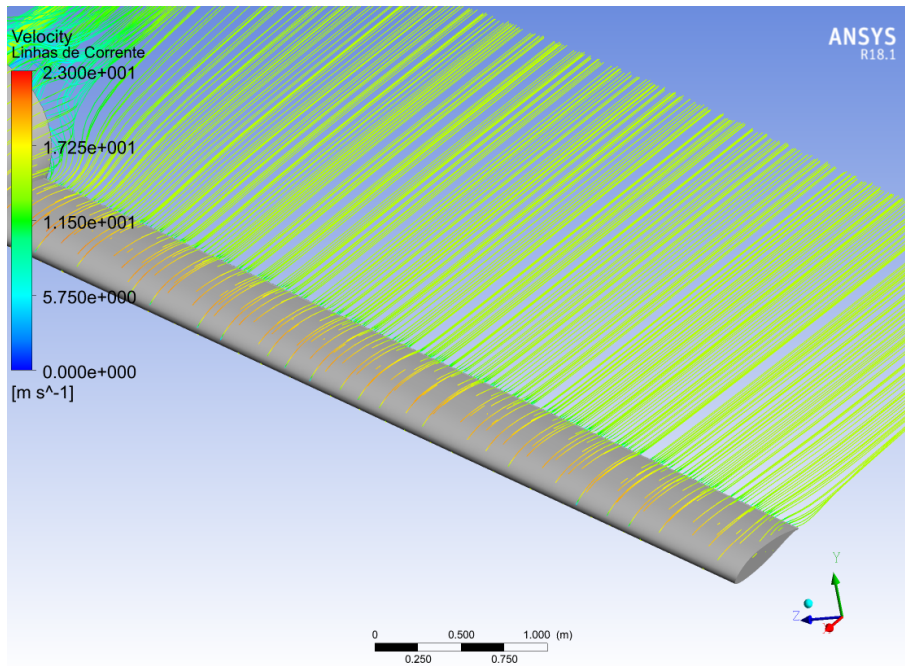


Figura 5.11: Linhas de corrente ao redor de uma das pás - NASA LS(1)-0417

A figura 5.12 apresenta em detalhe a pressão ao redor do aerofólio de perfil NASA LS(1)-0417. Nesta figura é possível observar com mais clareza a diferença de pressão entre a parte inferior e superior do aerofólio. Além disso, também é possível observar que esta diferença de pressão é menor que no aerofólio AH-93-W-215, apresentada na figura 4.60.

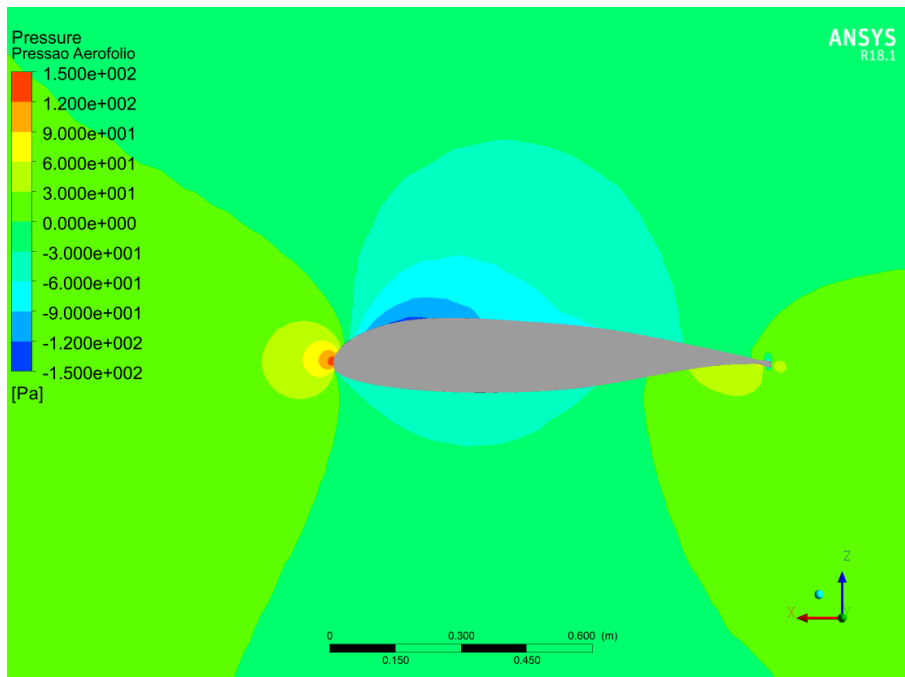


Figura 5.12: Pressão ao redor do aerofólio - NASALS(1)-0417

A figura 5.13 apresenta em detalhe a velocidade ao redor do aerofólio de perfil

NASA LS(1)-0417. Nesta figura é possível observar com mais clareza a diferença de velocidades entre a parte inferior e superior do aerofólio, o que está diretamente ligado a diferença de pressão. Assim, também é possível observar uma menor diferença de velocidade entre as partes superior e inferior em relação ao aerofólio AH-93-W-215, figura 4.61, como foi observado para a pressão.

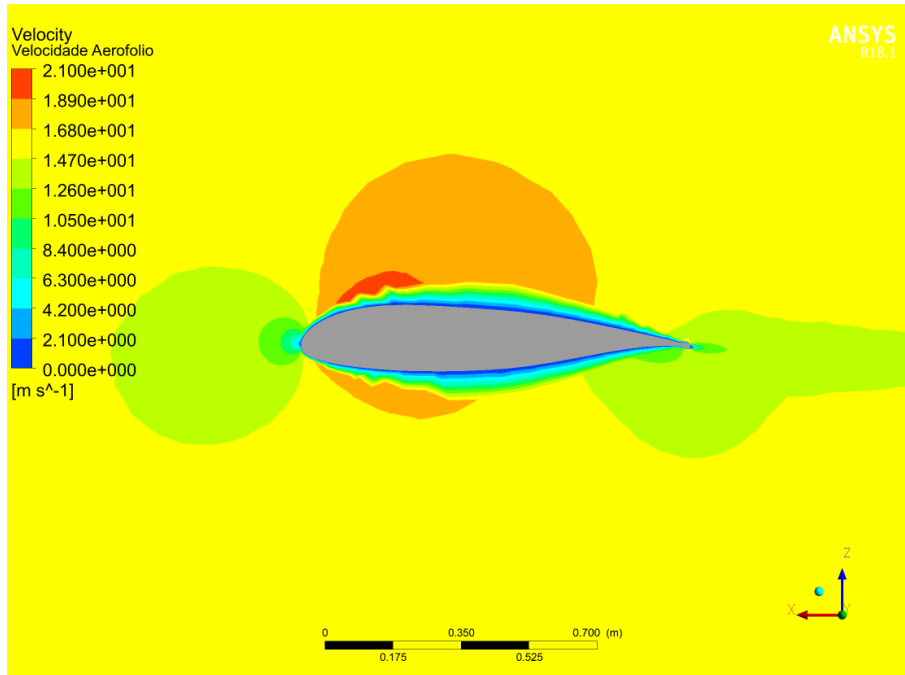


Figura 5.13: Velocidade ao redor do aerofólio - NASA LS(1)-0417

As linhas de corrente, a pressão e o módulo da velocidade ao redor do aerogerador com aerofólios de perfil NREL S809 estão representadas, respectivamente, nas figuras 5.14, 5.15 e 5.16.

Analisando as linhas de corrente no perfil S809, figura 5.14, observa-se que a velocidade do ar nos dois lados das pás são bem semelhantes. Dessa forma, é possível avaliar que a pressão atuante dos dois lados também será semelhante.

Ao contrário do perfil S809, as linhas de correntes obtidas para o perfil AH-93-W-215, apresentada na figura 4.46, indicam uma maior diferença entre os valores de velocidade do fluido nos dois lados das pás do aerogerador. Nesse sentido, o perfil AH-93-W-215 terá uma maior diferença de pressão nas pás e, conseqüentemente, será mais eficiente.

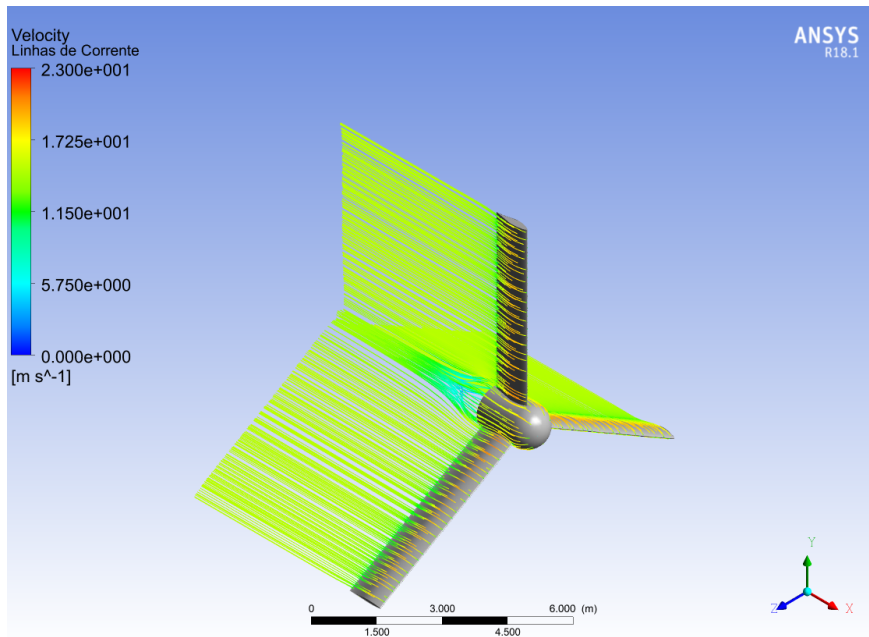


Figura 5.14: Linhas de corrente - NREL S809

Observando a figura 5.15, é possível ver que a pressão deste caso é similar em ambos os lados das pás. Por outro lado, a pressão ao redor de um aerogerador com perfil AH-93-W-215, apresentada na figura 4.51, há uma diferença da pressão nos dois lados. Assim, ratifica-se o que foi observado para as linhas de corrente.

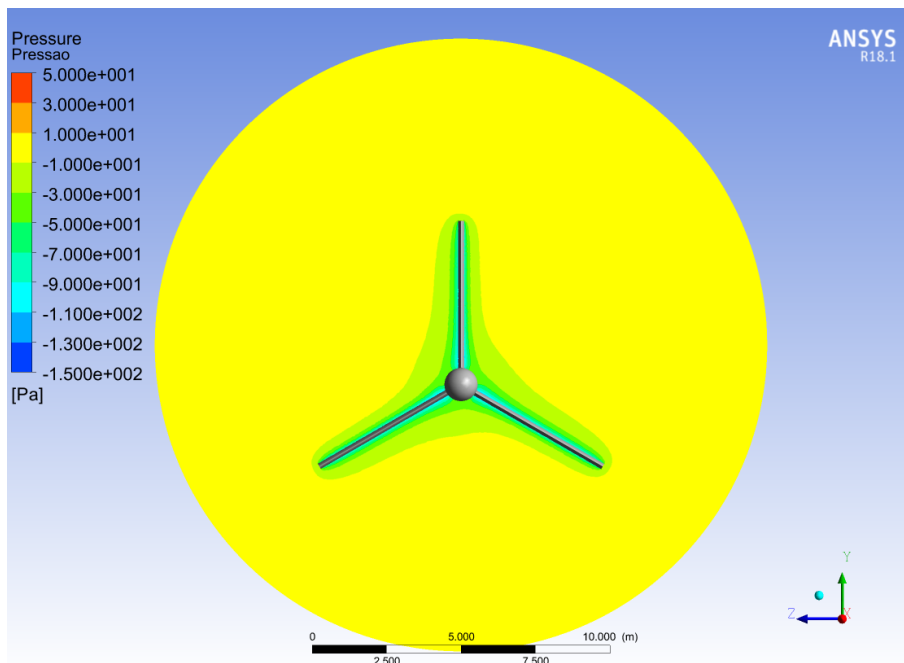


Figura 5.15: Pressão - NREL S809

Analisando a velocidade do ar ao redor do perfil S809, figura 5.16, é possível confirmar o que foi analisado anteriormente para a pressão ao redor do perfil. As

velocidades em ambos os lados das pás possuem valores parecidos, evidenciando que as pressões também são parecidas, como foi constatado anteriormente. Assim, comparando com os resultados obtidos para o perfil AH-93-W-215, apresentados na figura 4.56, chega-se a afirmar que um aerogerador com o perfil S809 será menos eficiente.

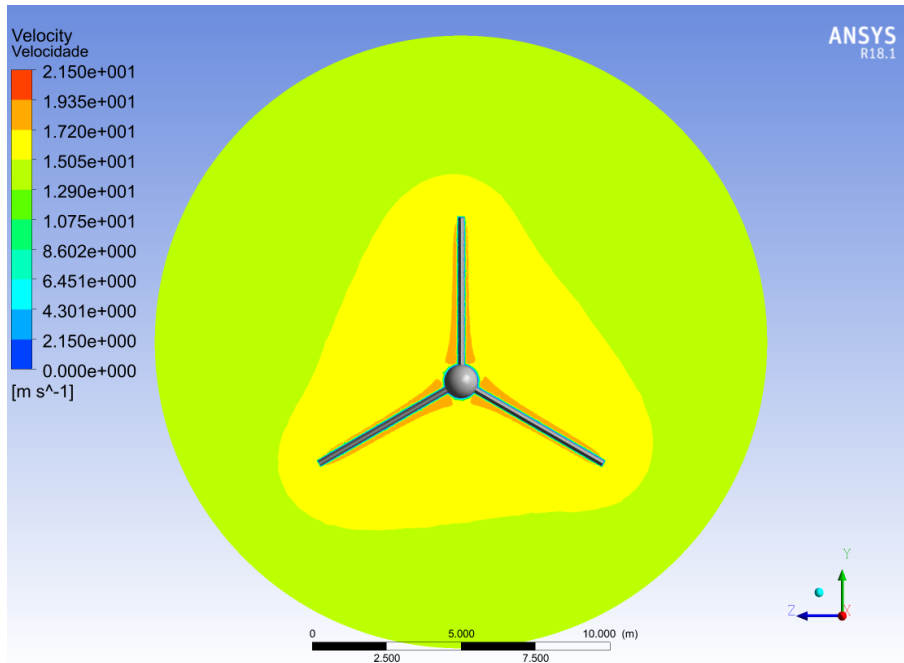


Figura 5.16: Velocidade - NREL S809

Além disso, as linhas de corrente, a pressão e a velocidade ao redor da pá com o perfil NREL S809 são apresentadas em detalhe, respectivamente, nas figuras 5.17, 5.18 e 5.19.

A figura 5.17 apresenta com mais detalhes as linhas de corrente ao redor de uma das pás com perfil de aerofólio NREL S809. Assim, nesta figura, é possível observar melhor a velocidade do escoamento aumentando na parte superior do aerofólio.

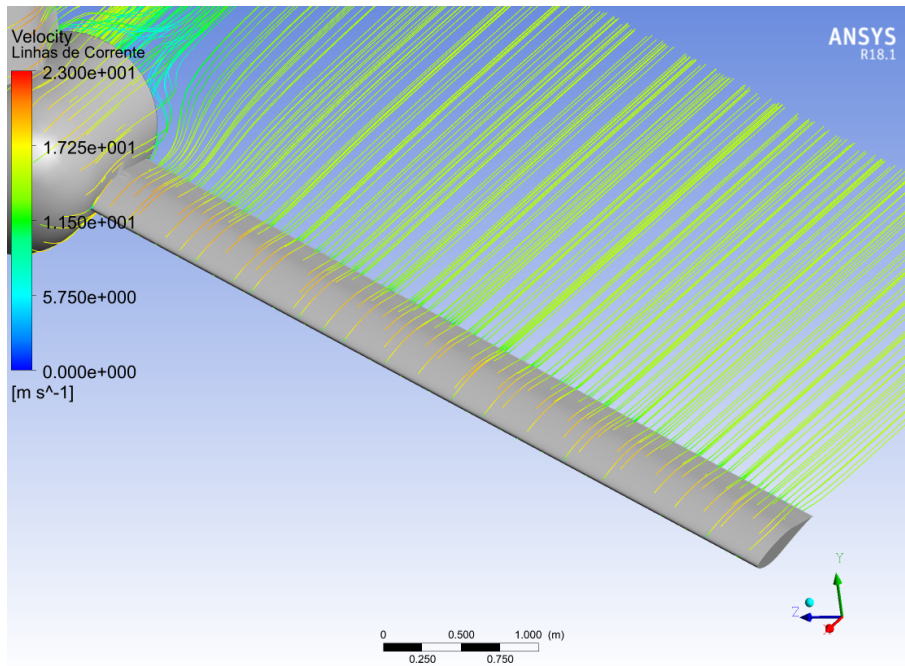


Figura 5.17: Linhas de corrente ao redor de uma das pás - NREL S809

A figura 5.18 apresenta em detalhe a pressão ao redor do aerofólio de perfil NREL S809. Nesta figura, diferentemente dos perfis anteriores, observa-se que as pressões acima e abaixo do aerofólio se assemelham mais, mesmo que ainda possa se observar uma pressão menor acima do aerofólio.

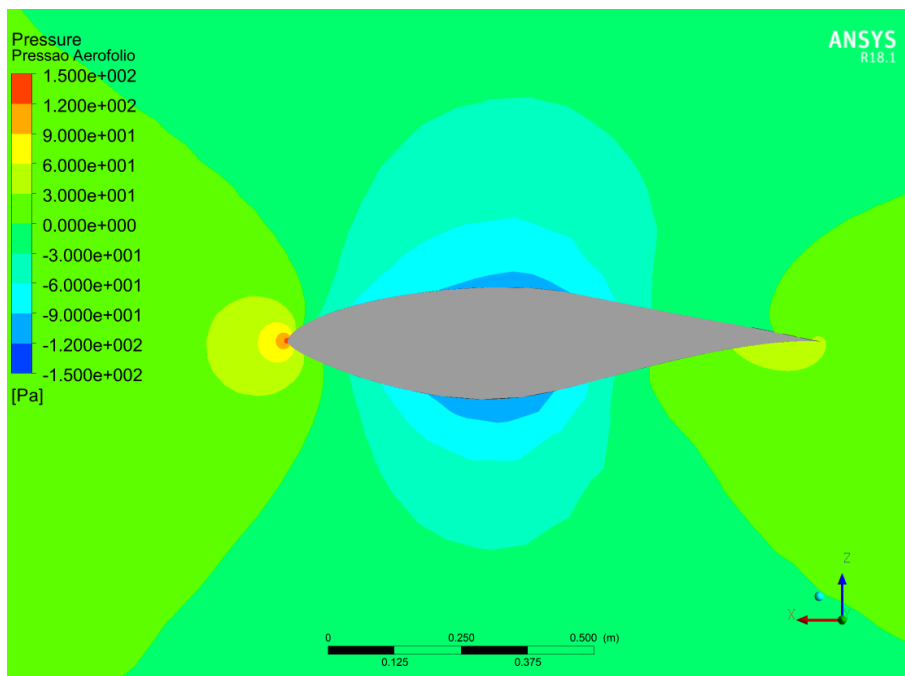


Figura 5.18: Pressão ao redor do aerofólio - NREL S809

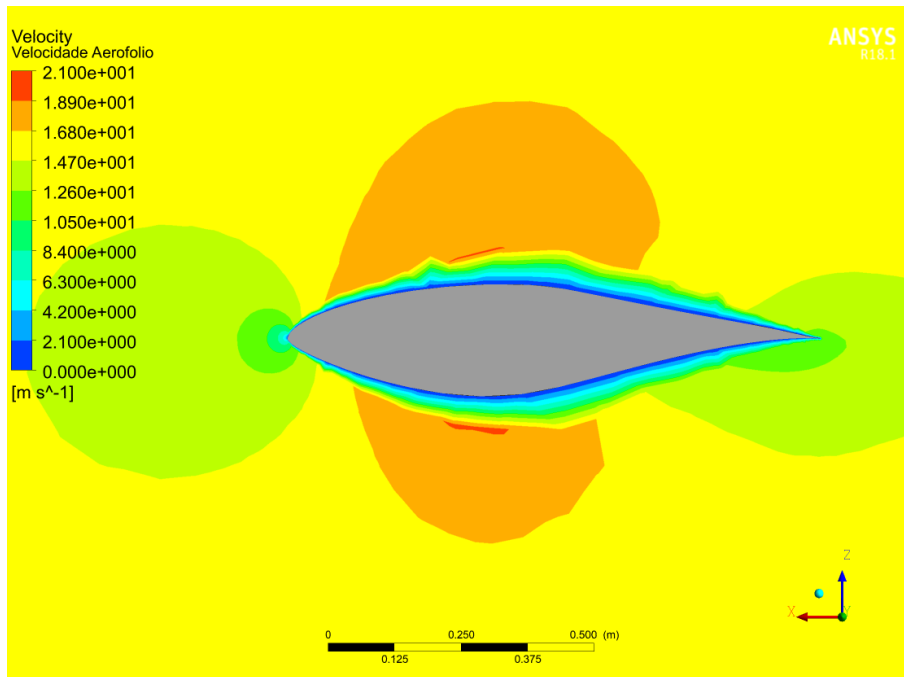


Figura 5.19: Velocidade ao redor do aerofólio - NREL S809

A figura 5.19 apresenta em detalhe a velocidade ao redor do aerofólio de perfil NREL S809. Esta figura corrobora o que foi observado para a pressão deste aerofólio, com distribuição de velocidade parecida, mas não idênticas acima e abaixo do aerofólio.

Após a análise de todos os perfis, foi observado que o perfil AH-93-W-215 apresentará uma maior força de sustentação e, portanto, possuirá uma capacidade maior de transformar a energia cinética do vento em energia mecânica. Assim, ele pode ser considerado o perfil mais eficiente para este caso.

Nesse contexto, será avaliado o torque que o vento causará no aerogerador a fim de analisar a eficácia dos perfis. A tabela 5.1 resume os torques na direção X atuando nos aerogeradores com os diferentes modelos de pás.

Tabela 5.1: Torque no aerogerador com diferentes perfis de aerofólios

Aerofólio	Torque [N.m]
AH-93-W-215	1857
NACA 4415	1846,69
NASA LS(1)-0417	1680,02
NREL S809	709,19

Diante desses dados, confirma-se que o aerofólio mais eficiente para essa ocasião é o AH-93-W-215, pois é o perfil que proporcionará um maior torque e, consequentemente, irá gerar uma potência maior.

A potência do aerogerador pode ser calculada através da equação 5.1:

$$P_T = T \cdot \omega \quad (5.1)$$

Onde P_T é a potência da turbina, T é o torque e ω é a velocidade angular.

O principal fator que irá definir a velocidade de rotação do aerogerador é a estrutura do equipamento. A velocidade que ele conseguirá atuar é limitada pela sua capacidade em resistir aos esforços produzidos pelo seu movimento.

Para esse caso, os aerogeradores possuem as mesmas dimensões e utilizam os mesmos materiais. Assim, pode-se assumir que eles possuirão a mesma velocidade de rotação.

Será adotado 150 RPM como a velocidade de rotação nominal dos aerogeradores. Esta é a velocidade do ELV-H13.2, uma turbina eólica fabricada pela Eletrovento Energia Alternativa e que possui um rotor com 13,2 metros de diâmetro, medida próxima aos 11 metros de diâmetro dos rotores estudados aqui.

A tabela 5.2 apresenta a potência dos aerogeradores apresentados, calculada através dos torques apresentados na tabela 5.1 e a velocidade angular de 150 RPM.

Tabela 5.2: Potência no aerogerador com diferentes perfis de aerofólios

Aerofólio	Potência [kW]
AH-93-W-215	29,17
NACA 4415	29,01
NASA LS(1)-0417	26,39
NREL S809	11,14

Outra análise importante que pode ser feita é sobre o movimento do aerogerador. Conhecendo os materiais dos componentes do aerogerador que estão sendo estudado, compósito de epóxy com fibras de vidro nas pás e ferro fundido no cubo, e suas respectivas massas específicas, é possível obter seu momento de inércia. Dada a complexidade da geometria estudada, o software Ansys Mechanical foi utilizado apenas para obter os momentos de inércia destes equipamentos.

Para esse caso, assumiu-se que o equipamento possuirá uma aceleração angular constante desde seu momento de partida até alcançar a sua velocidade máxima. Essa aceleração é calculada através da equação 5.2.

$$T = I \cdot \alpha \quad (5.2)$$

Onde T é o torque, I é o momento de inércia no eixo de rotação do aerogerador e α é a aceleração angular.

A tabela 5.3 apresenta, para os casos estudados, os respectivos momentos de inércia na direção do eixo de rotação, que é o eixo X, aceleração angular e o tempo que leva para o aerogerador sair do repouso até alcançar a sua velocidade máxima.

Tabela 5.3: Parâmetros do movimento do aerogerador com diferentes perfis de aerofólios

Aerofólio	I [kg.m ²]	α [rad/s ²]	Tempo [s]
AH-93-W-215	30300	0.061287	256
NACA 4415	32753	0.056382	279
NASA LS(1)-0417	36181	0.046438	339
NREL S809	39301	0.018045	871

Conforme apresentado na tabela 5.3, o perfil AH-93-W-215 também irá apresentar um menor momento de inércia. O momento de inércia caracteriza o grau de dificuldade em alterar o movimento de rotação de um corpo e, assim, um momento de inércia menor irá proporcionar uma maior aceleração angular para um mesmo torque aplicado.

Uma maior aceleração é bastante vantajosa para o aerogerador, fazendo com que ele atinja sua potência máxima de operação em menos tempo. Essa redução de tempo implica que a produção total de energia ao longo do período de operação do equipamento será maior.

5.2 Estudo do tamanho dos aerogeradores

Após concluir sobre qual é o aerofólio mais eficiente entre os citados para este caso, será estudado a influência do tamanho do aerogerador em sua aerodinâmica. Assim, estudou-se um aerogerador com dimensões maiores e outro com dimensões menores que o aerogerador que já foi apresentado neste trabalho. O aerofólio será o que foi tido com mais eficiente, que é o AH-93-W-215.

O primeiro aerogerador estudado, com dimensões maiores, possui pás com 10 metros de comprimento e um cubo com 2 metros de diâmetro. O termo Aerogerador Maior será utilizado para referenciá-lo neste texto.

O segundo aerogerador possui pás com 2,5 metros e um cubo com 0,5 metro de diâmetro. O termo Aerogerador Menor será utilizado para referenciá-lo neste texto.

Além disso, também serão utilizados os resultados obtidos anteriormente para o aerogerador com pás de 5 metros e cubo com 1 metro de diâmetro. Este será referenciado como Aerogerador Referência.

Repetindo a metodologia utilizada anteriormente, obtém-se resultados de linhas de corrente, pressão e o módulo da velocidade para o Aerogerador Maior que estão representados, respectivamente, nas figuras 5.20, 5.21 e 5.22.

As linhas de corrente do Aerogerador Maior, apresentadas na figura 5.20, possuem semelhança com as linhas de corrente do Aerogerador de Referência, apresentadas na figura 4.46. Essa semelhança é evidenciada pelas linhas de corrente

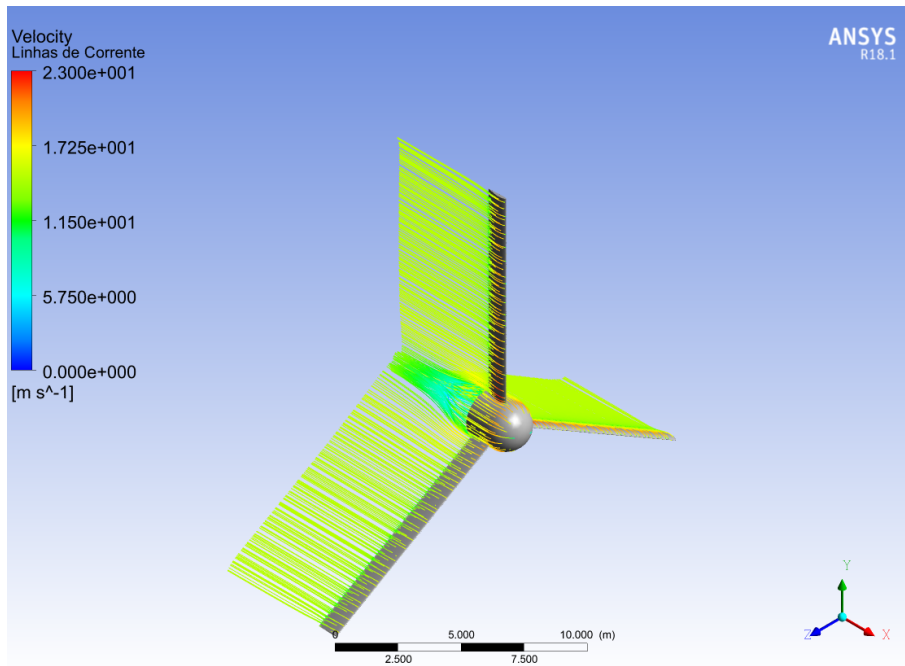


Figura 5.20: Linhas de corrente - Aerogerador com maiores dimensões

apresentando uma velocidade maior de um lado do aerofólio e menor do outro lado, tal qual no Aerogerador Referência.

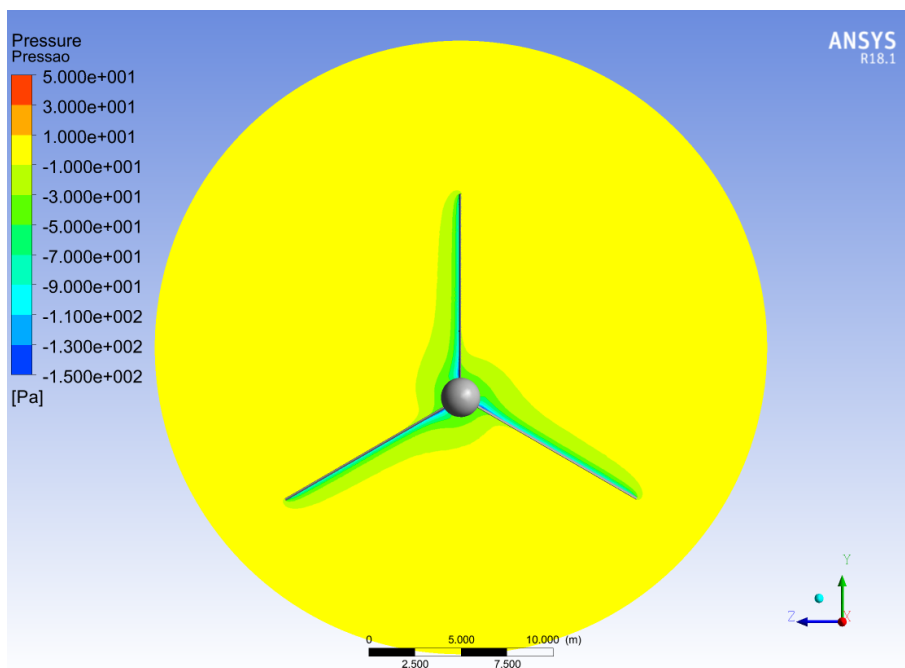


Figura 5.21: Pressão - Aerogerador com maiores dimensões

A pressão ao redor do Aerogerador Maior, apresentada na figura 5.21, se assemelha a pressão ao redor do Aerogerador Referência, apresentada na figura 4.51. Tal semelhança é evidenciada pelas zonas de menor pressão.

A velocidade do ar ao redor do Aerogerador Maior, apresentada na figura 5.22, é

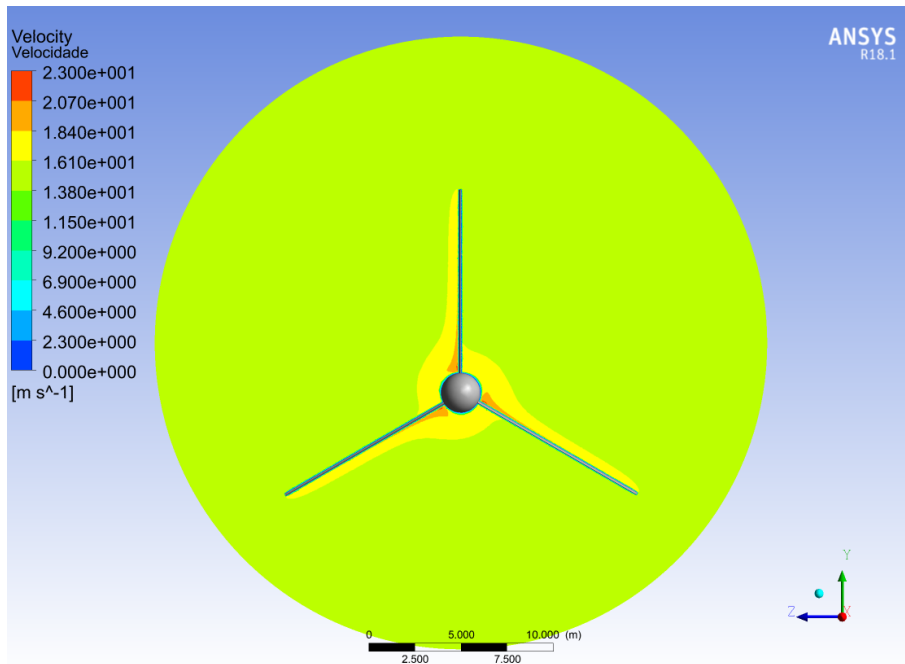


Figura 5.22: Velocidade - Aerogerador com maiores dimensões

semelhante a velocidade ao redor do Aerogerador Referência, apresentada na figura 4.56. Semelhança essa que é observada nas zonas com maiores velocidades.

Comparando os resultados obtidos para o Aerogerador Maior com os resultados obtidos para o Aerogerador Referência é possível identificar que a distribuição das linhas de corrente, pressão e velocidade são similares. Essa observação confirma que, para esse caso, esses fatores dependem apenas da geometria, não sendo influenciado pelo comprimento da pá.

Os resultados de linhas de corrente, pressão e o módulo da velocidade obtidos para o menor aerogerador estão representados, respectivamente, nas figuras 5.23, 5.24 e 5.25.

As linhas de corrente do Aerogerador Menor, apresentadas na figura 5.23, possuem semelhança com as linhas de corrente do Aerogerador de Referência, apresentadas na figura 4.46. Essa semelhança é evidenciada pelas linhas de corrente apresentando uma velocidade maior de um lado do aerofólio e menor do outro lado.

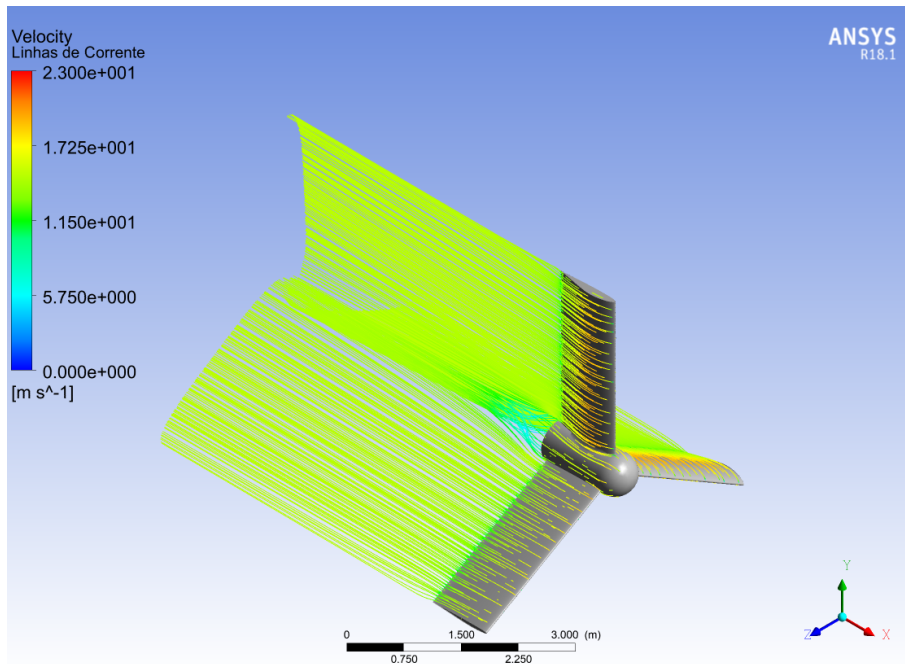


Figura 5.23: Linhas de corrente - Aerogerador com menores dimensões

A pressão ao redor do Aerogerador Menor, apresentada na figura 5.24, se assemelha a pressão ao redor do Aerogerador Referência, apresentada na figura 4.51. Tal semelhança é evidenciada pelas zonas de menor pressão.

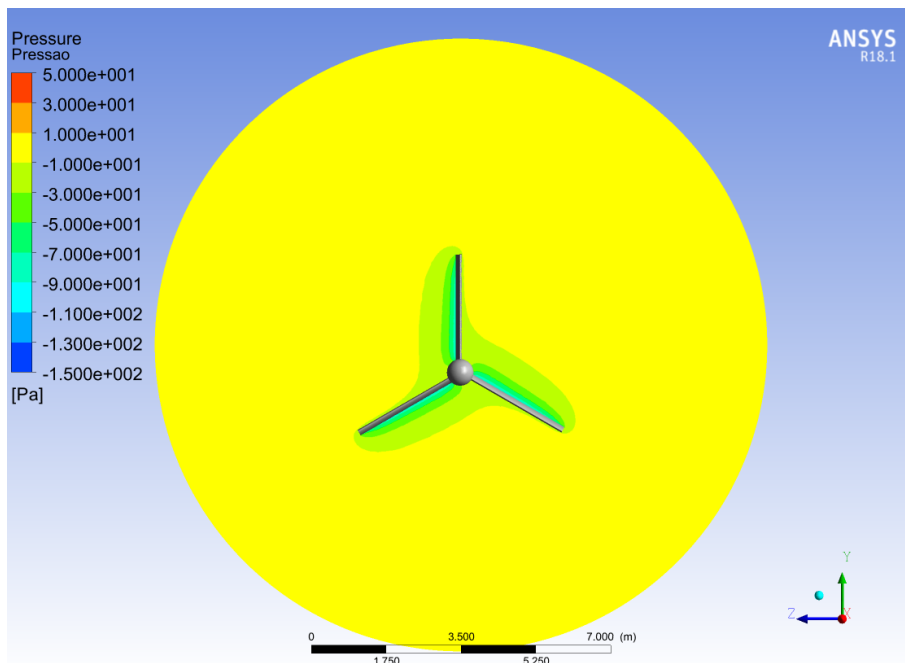


Figura 5.24: Pressão - Aerogerador com menores dimensões

A velocidade do ar ao redor do Aerogerador Menor, apresentada na figura 5.25, é semelhante à velocidade ao redor do Aerogerador Referência, apresentada na figura 4.56. Semelhança essa que é observada nas zonas com maiores velocidades.

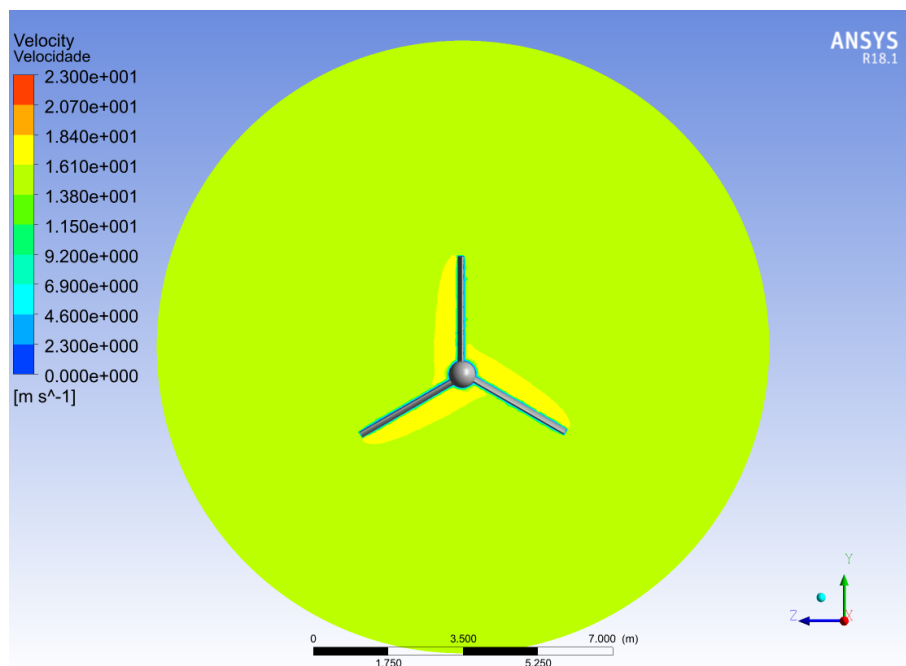


Figura 5.25: Velocidade - Aerogerador com menores dimensões

Novamente, após a comparação entre resultados obtidos para o Aerogerador Menor com os resultados do Aerogerador Referência, apresentados nas figuras 4.46, 4.51 e 4.56, é possível concluir que o tamanho do aerogerador, no caso estudado, não influencia na distribuição da linha de corrente, pressão e velocidade.

Entretanto, apesar destas distribuições serem semelhantes, é importante perceber que o desempenho do aerogerador será influenciado por suas dimensões. Além da diferença da área onde a pressão irá atuar, o seu tamanho irá alterar a dinâmica de movimento da máquina.

Nesse sentido, os torques que atuam nestes aerogeradores, na direção X, são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Torque no aerogerador com diferentes dimensões

Aerogerador	Torque [N.m]
Referência	1857
Maior	8908,25
Menor	344,72

Analisando os valores obtidos de torque para os aerogeradores é possível observar que aerogeradores com maiores dimensões sofrerão um torque maior. Essa situação ocorre devido ao fato de que as pás possuirão uma maior área para que a diferença de pressão atue.

Para verificar a potência destes aerogeradores, será utilizado como parâmetro, a velocidade de rotação de dois aerogeradores da Eletrovento Energia Alternativa,

conforme foi feito anteriormente com o aerogerador de referência. Para o aerogerador menor, será adotada uma velocidade de 240 RPM, a mesma que opera o ELV-H6.4 que possui 6,4 metros de diâmetro de rotor. Para o maior, a velocidade será de 60 RPM, igual ao ELV-H20.8 com 20,8 metros de rotor.

Entretanto, apenas a potência não é suficiente para avaliar o rendimento do equipamento, também sendo importante calcular a sua eficiência. A eficiência de um aerogerador é representada pelo seu coeficiente de potência.

O coeficiente de potência equivale à razão entre a potência fornecida pela turbina e a potência eólica disponível e é apresentado pela equação 5.3:

$$C_P = \frac{P_T}{P_E} \quad (5.3)$$

Onde C_P é o coeficiente de potência, P_T é a potência fornecida pela turbina, calculada pela equação 5.1, e P_E é a potência eólica disponível. A potência eólica disponível é, por sua vez, calculada através da equação 5.4:

$$P_E = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (5.4)$$

Onde ρ é a massa específica do ar, A é área varrida pelo rotor da turbina e v é a velocidade do vento que chega ao rotor.

A tabela 5.5 apresenta a potência da turbina e a potência eólica disponível para os casos de diferentes tamanhos além dos respectivos coeficientes de potência. A potência da turbina é calculada através da equação 5.1, considerando-se uma rotação constante, e a potência eólica disponível é calculada através da equação 5.4, considerando a massa específica do ar como 1,225 kg/m³ e a velocidade do ar como 15 m/s. O coeficiente de potência é obtido através da equação 5.3.

Tabela 5.5: Potência e coeficiente de potência do aerogerador com diferentes dimensões

Aerogerador	ω [rpm]	Torque [N.m]	P_T [kW]	P_E [kW]	C_P
Referência	150	1857	29,17	196,45	0,148
Maior	60	8908,25	55,97	785,81	0,071
Menor	240	344,72	8,66	491,12	0,176

Conforme resultados apresentados na tabela 5.5 é possível avaliar que o aerogerador de 22 metros de rotor é o que, dentre os três, irá fornecer uma maior potência. Enquanto isso, o aerogerador de 5,5 metros de diâmetro irá possuir o maior coeficiente de potência, ou seja, será mais eficiente.

É importante dizer que os aerogeradores estudados possuem razões de velocidade diferentes e que eles possuem dimensões tais que os efeitos viscosos irão exercer

grande influência no escoamento, diferente do que é observado em aerogeradores maiores. Nesse sentido, tais fatos dificultam que seja possível fazer uma análise mais precisa destes resultados.

Por fim, o momento de inércia do eixo de rotação, a aceleração angular e o tempo decorrido do início do movimento até alcançar a velocidade nominal de rotação para cada turbina é apresentado na tabela 5.6 para melhor entendimento sobre a dinâmica destas máquinas.

Tabela 5.6: Parâmetros do movimento do aerogerador com diferentes dimensões

Aerogerador	I [kg.m ²]	α [rad/s ²]	Tempo [s]
Referência	30300	0.061287	256
Maior	254320	0.035028	180
Menor	3690	0.09342	269

A tabela 5.3 mostra que o aerogerador maior será o que atingirá a velocidade de operação mais rápido. Aliando isso ao fato de que este é o aerogerador que produz maior potência, conclui-se que, considerando o mesmo tempo de operação para os três equipamentos, este gerará mais energia.

5.3 Regime transiente

Todas as simulações anteriores neste trabalho consideraram a condição de regime estacionário. Apesar de parecer razoável esta consideração, será estudado o mesmo caso em um regime transiente a fim de comparar com as simulações realizadas e, assim, validar esta hipótese. Neste caso, a simulação foi realizada considerando um tempo de 1 segundo.

Nesse sentido, mantendo as demais condições já estabelecidas para este caso, considerou-se que inicialmente o fluido possuiria uma velocidade nula e estaria sob a pressão atmosférica.

As figuras 5.26, 5.27 e 5.28 apresentam, respectivamente, as linhas de corrente, a pressão e o módulo da velocidade ao redor do aerogerador ao tempo de 0,1 segundo.

As linhas de corrente depois de 0,1 segundo passado do tempo inicial, apresentadas na figura 5.26, são parecidas com as linhas de corrente obtidas para o caso estacionário, apresentadas na figura 4.46, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

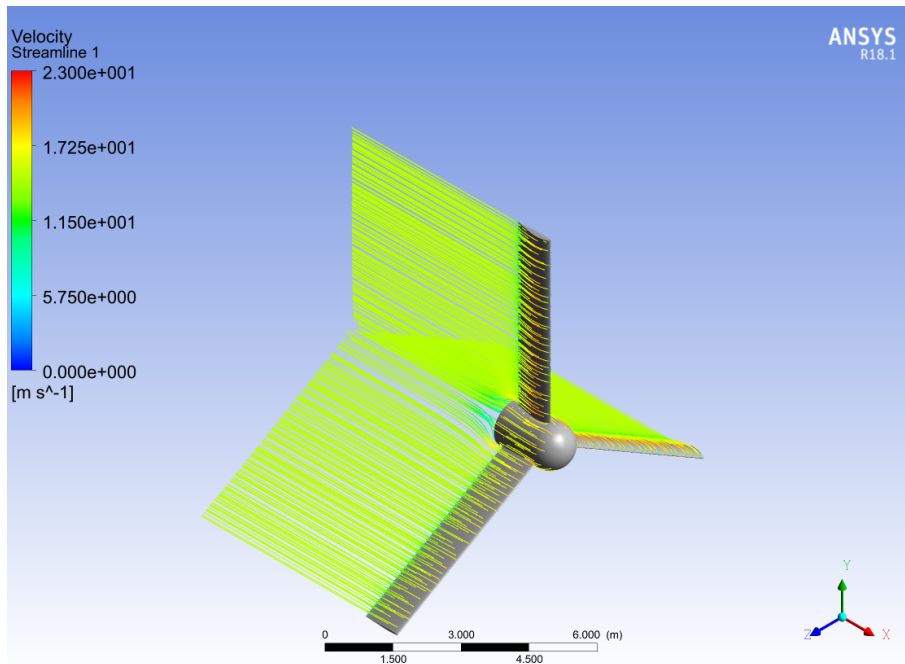


Figura 5.26: Linhas de corrente - 0,1 segundo

A pressão ao redor do aerogerador depois de 0,1 segundo passado do tempo inicial, apresentadas na figura 5.27, se mostra bem diferente da pressão obtida para o modelo estacionário, apresentada na figura 4.51. Tal diferença é evidenciada por pressões muito menores neste passo de tempo.

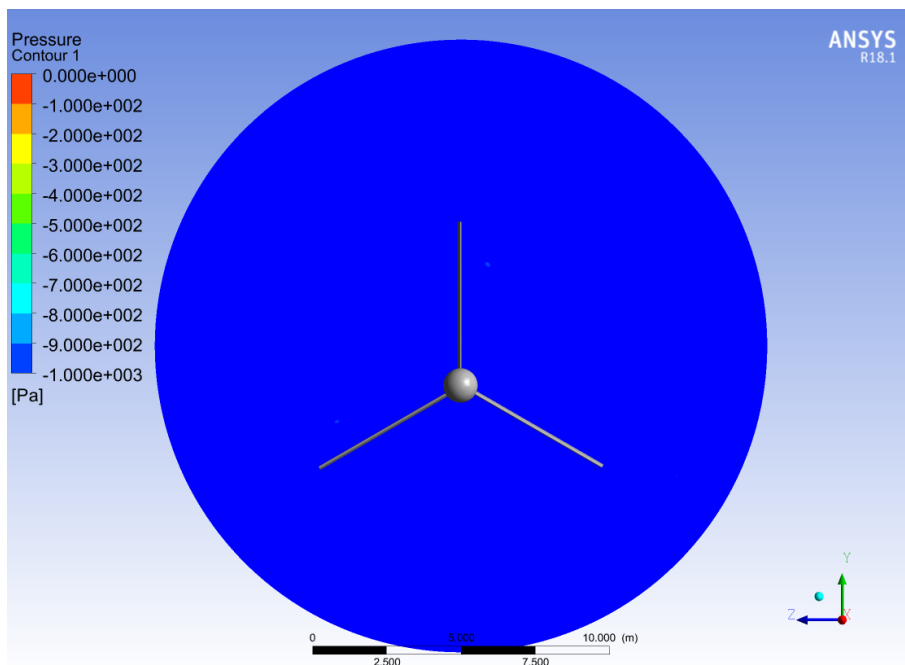


Figura 5.27: Pressão - 0,1 segundo

A velocidade do ar ao redor do aerogerador depois de 0,1 segundo passado do tempo inicial, apresentada na figura 5.28, é semelhante a velocidade obtida para

o caso estacionário, apresentadas na figura 4.56, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

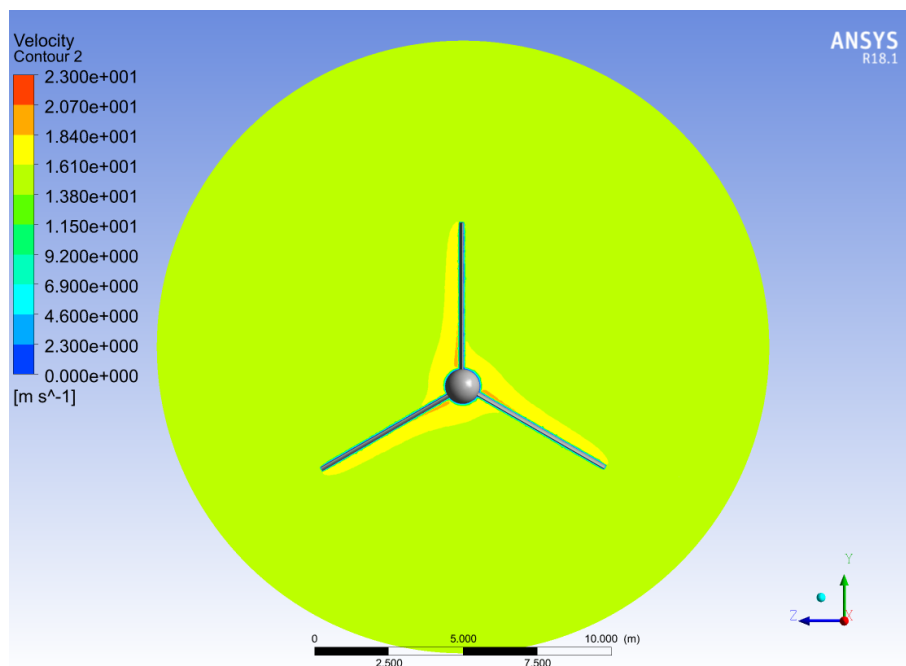


Figura 5.28: Velocidade - 0,1 segundo

Nesse sentido, é possível avaliar que, enquanto os resultados de linhas de corrente e velocidade ao passo de 0,1 segundo parecem estar condizentes com os resultados obtidos para o regime estacionário, os resultados de pressão evidenciam a diferença entre estes resultados. Assim, deve-se avaliar os próximos passos de tempo a fim de verificar como os novos resultados irão se comportar.

Avaliando o próximo passo do tempo, as figuras 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam, respectivamente, as linhas de corrente, a pressão e o módulo da velocidade ao redor do aerogerador ao tempo de 0,2 segundos.

As linhas de corrente depois de 0,2 segundos passados do tempo inicial, apresentadas na figura 5.29, são parecidas com as linhas de corrente obtidas para o caso estacionário, apresentadas na figura 4.46, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

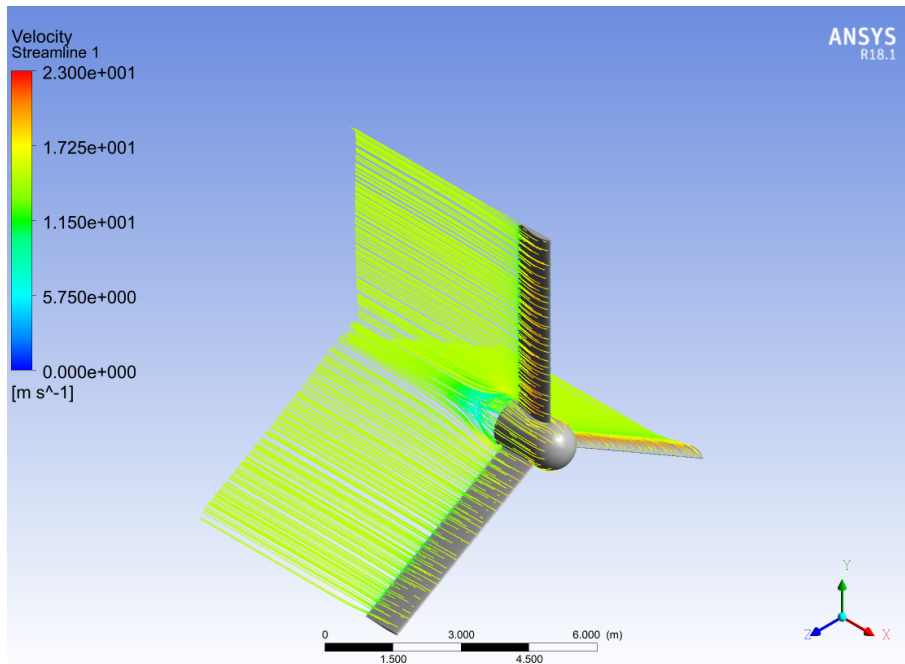


Figura 5.29: Linhas de corrente - 0,2 segundos

A pressão ao redor do aerogerador depois de 0,2 segundos passados do tempo inicial, apresentadas na figura 5.30, é semelhante à pressão obtida para o caso estacionário, apresentada na figura 4.51, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

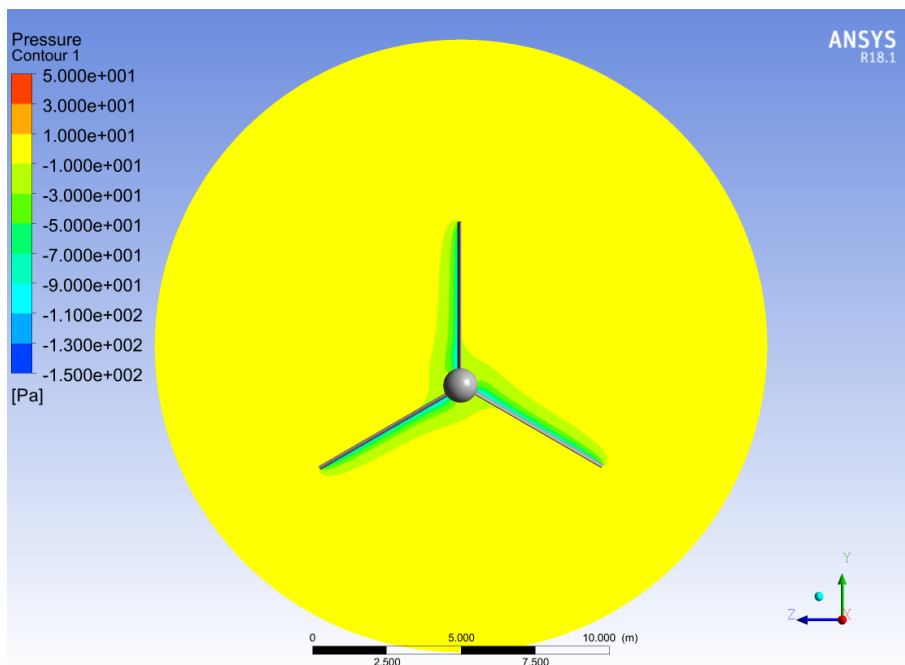


Figura 5.30: Pressão - 0,2 segundos

A velocidade do ar ao redor do aerogerador depois de 0,2 segundos passados do tempo inicial, apresentada na figura 5.31, é semelhante a velocidade obtida para

o caso estacionário, apresentadas na figura 4.56, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

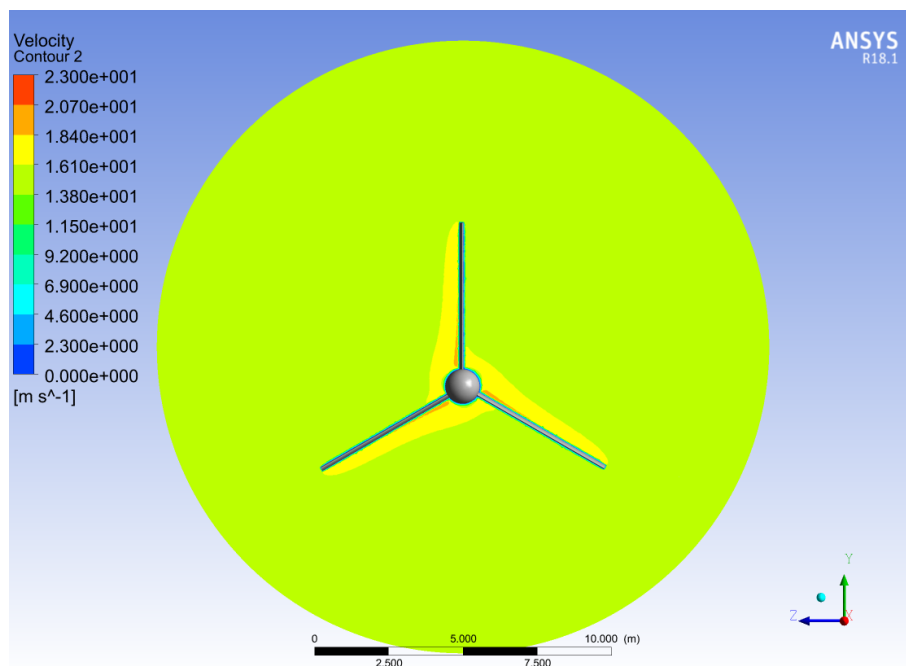


Figura 5.31: Velocidade - 0,2 segundos

Neste passo de tempo já é possível observar semelhança com o caso estacionário para as linhas de corrente, pressão e velocidade. Assim, há um indício que o sistema já se encontra em um regime estacionário.

A fim de avaliar o próximo passo de tempo, analisa-se as figuras 5.32, 5.33 e 5.34, que apresentam, respectivamente, as linhas de corrente, a pressão e o módulo da velocidade ao redor do aerogerador ao tempo de 0,3 segundos.

As linhas de corrente depois de 0,3 segundos passados do tempo inicial, apresentadas na figura 5.32, são parecidas com as linhas de corrente obtidas para o caso estacionário, apresentadas na figura 4.46, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

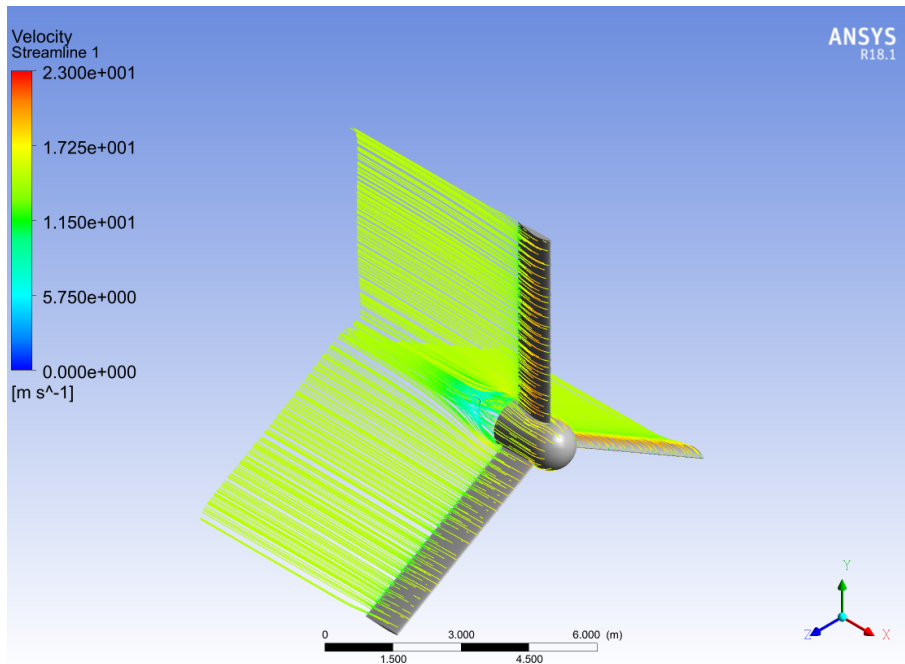


Figura 5.32: Linhas de corrente - 0,3 segundos

A pressão ao redor do aerogerador depois de 0,3 segundos passados do tempo inicial, apresentadas na figura 5.33, é semelhante a pressão obtida para o caso estacionário, apresentada na figura 4.51, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

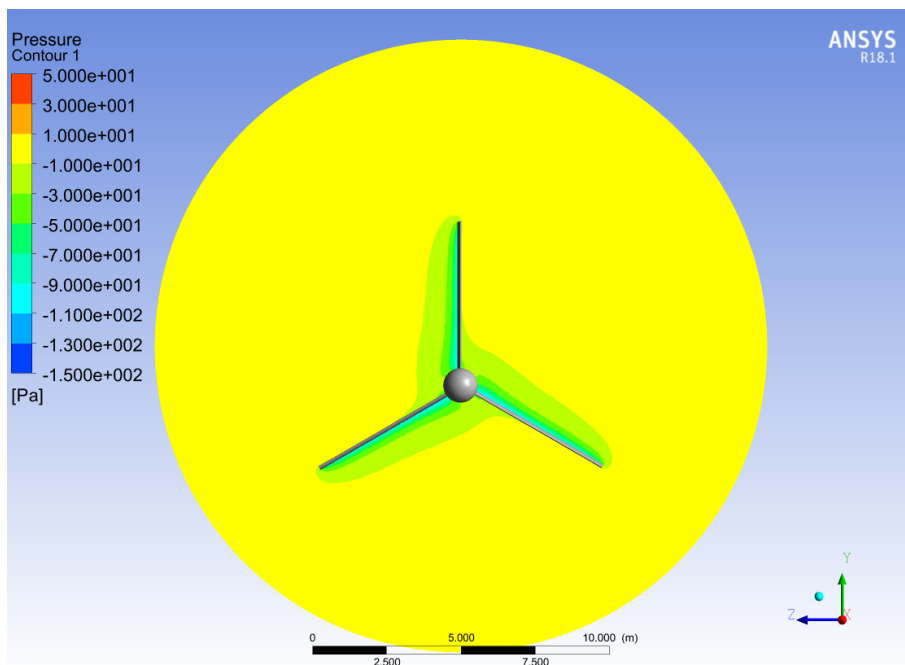


Figura 5.33: Pressão - 0,3 segundos

A velocidade do ar ao redor do aerogerador depois de 0,3 segundos passados do tempo inicial, apresentada na figura 5.34, é semelhante a velocidade obtida para

o caso estacionário, apresentadas na figura 4.56, de tal forma que não é possível observar diferenças significativas.

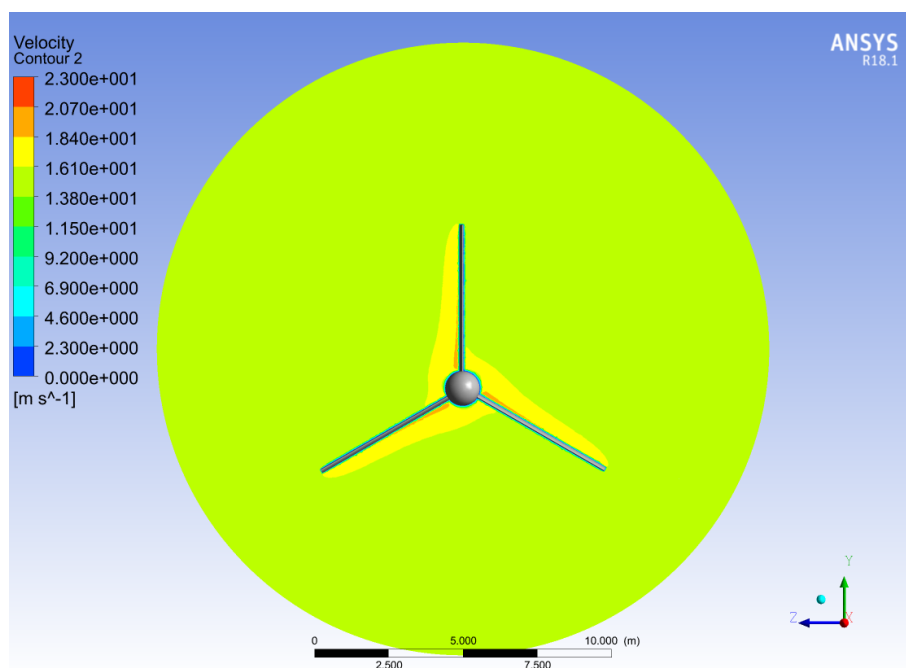


Figura 5.34: Velocidade - 0,3 segundos

Os resultados obtidos para o passo de tempo de 0,3 segundos são semelhantes ao passo de tempo anterior e, conseqüentemente, aos resultados do regime estacionário. Assim, percebe-se que o sistema já se encontra no regime estacionário e que este apresenta resultados iguais à simulação anterior que considerava o sistema em regime estacionário, ratificando que os resultados desta simulação estavam corretos.

A fim de confirmar essa transição de estado transiente para o permanente, comparou-se os torques obtidos para cada passo de tempo. A tabela 5.7 apresenta os torques atuando nos aerogeradores em cada passo de tempo.

Tabela 5.7: Torque no aerogerador em cada passo de tempo

Passo de tempo [s]	Torque [N.m]
0,1	1610,58
0,2	1813,47
0,3	1863,78

A discrepância entre os torques atuantes no aerogerador no passo de 0,1 segundo e 0,2 segundos é de cerca de 11 % enquanto a diferença entre os passos de tempo de 0,2 e 0,3 segundos é de cerca de 3 %. Nesse contexto, evidencia-se que a partir de 0,3 segundos o sistema está no estado permanente.

Além disso, o torque no passo de tempo de 0,3 segundos possui uma diferença em relação ao torque obtido quando considera-se um regime permanente inferior a 1 %,

mostrando a compatibilidade entre os resultados. Nesse sentido, é possível afirmar que esse sistema leva pouco tempo até alcançar o regime permanente, podendo, assim, considerá-lo apenas como regime permanente.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma metodologia para o estudo de aerogeradores. Para isso, foi utilizado o software ANSYS CFX para a obtenção dos resultados. Além dele, outros softwares foram utilizados para auxiliar nas análises realizadas, como o Python e o ANSYS MECHANICAL.

Primeiramente, foi feito um estudo de convergência de malha para decidir qual malha deveria ser utilizada. Também foi feito um estudo acerca do tamanho do domínio, a fim de verificar que as dimensões consideradas para o domínio não causavam erro nos resultados. Estes estudos proporcionam uma alta confiabilidade para os resultados das simulações.

É importante notar que também foi realizado um estudo sobre o modelo de turbulência empregado. Para tal, verificou-se três modelos de turbulência a fim de observar as variações que eles causariam nos resultados. Diante dos resultados que foram obtidos, observou-se resultados similares para os três casos, indicando que todos estes modelos retornariam resultados válidos. Assim, preferiu-se utilizar o modelo SST, que é estabelecido pela literatura como o mais completo entre os três que foram apresentados.

Com os parâmetros de simulação bem estabelecidos, foi feito um estudo acerca da influência das dimensões do equipamento e do perfil de aerofólio utilizado no desempenho do aerogerador. Essas análises foram feitas considerando quatro perfis diferentes e três casos com dimensões distintas.

Analisando os perfis apresentados neste trabalho, foi possível chegar a conclusão que o perfil AH-93-W-215 é o que retorna os melhores resultados dentre os apresentados. Este perfil proporciona uma potência maior ao equipamento.

Com as simulações onde foram consideradas diferentes comprimentos de pá e diâmetros do cubo para os aerogeradores, mantendo para os três casos o perfil AH-

93-W-215, foi possível chegar à conclusão de que o Aerogerador Maior fornece a maior potência dentre os três. Entretanto, também se observou que o Aerogerador Maior era o que apresentava um menor coeficiente de potência, sendo, assim, menos eficiente que os demais. Neste sentido, o equipamento mais eficiente seria o Aerogerador Menor.

No último caso estudado foi considerado regime transiente. Neste caso, foi possível observar como o escoamento se comportava ao longo do tempo e, por fim, foi possível comparar este caso com o anterior, onde era considerado regime permanente, confirmando, assim, que os resultados obtidos com regime permanente eram válidos.

Neste trabalho, portanto, foram realizadas simulações complexas, sendo estas tridimensionais e com malhas não-estruturadas, onde os resultados foram testados a fim de confirmar sua validade. Assim, resultados adequados ao que foi proposto neste trabalho foram alcançados e a metodologia apresentada aqui pode ser utilizada futuramente para estudos similares.

Por último, é importante destacar que os resultados obtidos neste trabalho apresentam uma baixa resolução para a camada limite que é formada no aerofólio. Isto ocorre, provavelmente, por que a malha perto da pá ainda é grosseira. Assim, seria necessário que a malha fosse mais refinada para que fosse possível captar efeitos próximo da pá, como os vórtices de ponta de asa.

6.2 Trabalhos Futuros

Atingindo o objetivo deste trabalho, fica como sugestão para trabalhos futuros a utilização desta metodologia para mais estudos, utilizando diferentes geometrias, tanto da pá quanto do cubo, ou utilizando diferentes parâmetros, como o ângulo de ataque da pá ou a velocidade do vento. Também é sugerido que seja feita uma análise considerando toda estrutura do aerogerador, não só a pá e o cubo.

Não apresentou-se uma comparação dos resultados apresentados com resultados experimentais. Nesse sentido, outra sugestão para os próximos trabalhos é a comparação de dados experimentais com os dados gerados por essa metodologia a fim de avaliar sua acurácia.

Finalmente, a metodologia utilizada não considerou a rotação do equipamento na simulação e, assim, muitos efeitos foram desconsiderados. Nesse sentido, também é sugerido que seja elaborada uma simulação considerando a rotação e compare com a metodologia deste trabalho em termos de acurácia dos resultados e custo computacional.

Referências Bibliográficas

- [1] SUTHERLAND, H. J., BERG, D. E., ASHWILL, T. D. *A Retrospective of VAWT Technology*. Sandia National Laboratories, 2012.
- [2] MOURA, A. S. *Avaliação de Metodologias de Projeto de Fundações Superficiais de Aerogeradores Assentes em Areia de Duna* Tese de D.Sc., UnB, Brasília, DF, Brasil, 2007.
- [3] NAMIRANIAN, A. *3D Simulation of a 5MW Wind Turbine*. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, 2011.
- [4] MALALASEKERA, W., VERSTEEG, H. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*. 2 ed. , Pearson Education Limited, 2007.
- [5] HARTWANGER, D., HORVAT, A. "3D MODELLING OF A WIND TURBINE USING CFD", *NAFEMS UK Conference 2008 "Engineering Simulation: Effective Use and Best Practice"*, Cheltenham, United Kingdom, Jun. 2008.
- [6] LAURSEN, J., ET AL. "3D CFD Quantification of the Performance of a Multi-Megawatt Wind Turbine", *Journal of Physics: Conference Series*, v. 75, n. 7, Ago. 1996.
- [7] OKITA, W. M. *Simulação Numérica do Desempenho Aerodinâmica de Aerogeradores de Eixo Horizontal*. Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2017.
- [8] SUMMER, J., WATTERS, C. S., MASSON, C. "CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel", *Energies*, v. 3, n. 5, pp. 989–1013, Mai. 2010.
- [9] PLECH, F. C., TOFANELI, L. A., OLIVEIRA, T. D. "DESEMPENHO DE PERFIS AERODINÂMICOS PARA AEROGERADORES", *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, Brasil*, Ago. 2016.

- [10] PIRES, J. C., OLIVEIRA, B. F. “Modelagem e Simulação Virtual de Pá para Aerogerador de Pequeno Porte”, *Design e Tecnologia*, v. 1, n. 2, pp. 69–76, Dez. 2010.
- [11] RODRÍGUEZ, E., ET AL. “OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR DE 2 MW, MEDIANTE UN MODELO CFD”, *Pistas Educativas*, v. 40, n. 130, Nov. 2018.
- [12] FERZIGER, J. H., PERIĆ, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3 ed. , Springer-Verlag, 2002.
- [13] FOX, R. W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 8 ed., LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998.
- [14] SOUZA, J. F., OLIVEIRA, L., AZEVEDO, J. L., SOARES, I., MATA, M. “Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem”, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, n. 1, Jan./Mar. 2010.
- [15] POPE, S. B. *Turbulent Flows*. 1 ed. , Cambridge University Press, 2000.
- [16] ANSYS. *ANSYS CFX - Solver Theory Guide*.
- [17] F. R. MENTER “Zonal Two Equation k-w, Turbulence Models for Aerodynamic Flows.”, *24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida*, Jul. 1993.
- [18] EPE. “Caracterização do Recurso Eólico e Resultados Preliminares de sua Aplicação no Sistema Elétrico”, *Rio de Janeiro, Brasil*, Ago. 2013.
- [19] BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E. *Wind Energy Handbook*. John Wiley and Sons Ltd, 2001.
- [20] MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. *Wind Energy Explained: theory design and application*. 2 ed., John Wiley and Sons Ltd, 2009.