



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Curso de Engenharia Mecânica

THALYSON RAMON COSTA SANTOS

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA E ANÁLISES DE
FENÔMENOS AERODINÂMICOS PARA AEROGERADORES DE BAIXA
POTÊNCIA**

SÃO LUÍS

2018

THALYSON RAMON COSTA SANTOS

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA E ANÁLISES DE
FENÔMENOS AERODINÂMICOS PARA AEROGERADORES DE BAIXA
POTÊNCIA**

Projeto de trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Estadual do Maranhão, para o curso de
graduação em Engenharia Mecânica, como requisito para a
apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

SÃO LUÍS

2018

Santos, Thalyson Ramon Costa.

Modelagem e simulação fluidodinâmica e análises de fenômenos aerodinâmicos para aerogeradores de baixa potência / Thalyson Ramon Costa Santos. – São Luís, 2018.

99 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho.

1. Dinâmica dos fluidos computacionais - CFD.

2. Aerogerador de baixa potência. 3. Fenômenos aerodinâmicos.

I. Título.

CDU 621:533.6

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA E ANÁLISES DE
FENÔMENOS AERODINÂMICOS PARA AEROGERADORES DE BAIXA
POTÊNCIA**

THALYSON RAMON COSTA SANTOS

Monografia aprovada em: ____ de _____ de 2018.

Prof. Dr. Lourival Matos, de Sousa Filho.
(Orientador)

Prof. Me. Louryval Coelho Paixão
(Membro da Banca Examinadora)

Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira.
(Membro da Banca Examinadora)

*A meus pais (Francely e Rosinete) irmãos e minha família,
por sempre me apoiar e me incentivar para conseguir
realizar esse e outros sonhos que já foram e que ainda
virão, à minha namorada por sempre ter me animado, e a
minha vó (Maria Cardoso), por nossas brincadeiras e
risos, saudades eternas vovó*

Agradecimentos

Ao bom Deus que sempre me deu forças todos os dias para hoje realizar esse sonho. “Consagre ao Senhor tudo que o faz, e os seus planos serão bem-sucedidos”, p.v 16:3.

Ao professor e orientador Dr. Lourival Matos de Sousa Filho pelo seu auxílio que foi fundamental para o êxito do presente estudo.

Aos familiares que sempre estiveram me incentivando para não desistir nem desanimar, e isto foi relevante para a realização desse sonho principalmente meus pais (Rosinete e Francely) amo vocês.

A minha namorada Daiane por me dar forças, por estudarmos juntos durante essa jornada e por sempre estar presente e incentivando a alcançar esse objetivo, amo-a.

Aos amigos que desde o início da graduação pude contar e compartilhar desses cinco anos de muito estudo, ajuda, diversão e conhecimento, em especial: Marcos Cosse, João Afonso, André Luís e Caroline Barros, sempre terão minha amizade e respeito.

À minha força de vontade, garra e orações que fiz para Deus, pedindo forças todos os dias para que pudesse atingir mais esse objetivo.

“Sejam quais forem os resultados, com êxito ou não, o importante é que no final cada um possa dizer: fiz o que pude”.

Louis Pasteur

RESUMO

Neste trabalho foram realizadas simulações fluidodinâmicas com o objetivo de avaliar a influência da mudança do ângulo da pá em fenômenos aerodinâmicos as quais prejudicam a potência útil retirada do vento por aerogeradores, tais simulações partiram da ideia de análises em turbinas eólicas de baixa potência, ou seja, dispositivos as quais podem ser instalado em lugares onde não demandem grandes quantidades de energias como residências ou pequenas propriedades, uma vez que, o estudo de microgeração de energia eólica no Brasil ainda estar em desenvolvimento. Utilizou-se *softwares* referência de modelagem e simulação, como o SolidWorks e o ANSYS *academic*, e desta maneira o referente estudo obteve excelentes resultados. A turbina foi desenhada no SolidWorks, e essa possui tamanho total de 6,7 m com pá de perfil da família EPLER, o E387, com envergadura de pá de 1,5m. A partir da modelagem, foi simulado no fluent do ANSYS aderindo a uma metodologia de túnel de vento, onde se avaliou fenômenos reais descritos na literatura, como as esteiras formadas, além do efeito *downwash*, então, conseguiu-se selecionar um rotor com maior potencial de aplicação em análises de potências, ou seja, o rotor com ângulo de 10°.

Palavras-chaves: Dinâmica dos fluidos computacional-CFD. Aerogerador de baixa potência. Fenômenos Aerodinâmicos.

ABSTRACT

In this work, we performed fluid dynamics simulations with the objective of evaluating the influence of the paddle angle change, in aerodynamic phenomena that impair the useful power withdrawn from the wind by wind turbines, our simulations started from the idea of analyzes in low power wind turbines, in other words, devices that can be installed in places where they don't demand large amounts of energy such as homes or small properties, once the microenergy study of wind energy in Brazil is still under development. We used modeling and simulation reference software, such as SolidWorks and Ansys academic, and in this way the referent study obtained excellent results. The turbine was designed in SolidWorks, and it has a total size of 6.7 m with profile blade of the EPLER family, the E387, with a wingspan of 1.5 m. From the modeling, it was simulated in the ANSYS Fluent by adhering to a wind tunnel methodology, where it was possible to evaluate real phenomena described in the literature, like mats formed in addition to the downwash effect, then it was possible to select a rotor with greater potential of application in analyzes of powers, that is to say, the rotor with angle of 10° .

Keywords: Fluid dynamics computational-CFD. Low power wind turbine. Aerodynamic Phenomena.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Capacidade mundial acumulada.....	5
Figura 2.2. <i>Hanking</i> de 2017	6
Figura 2.3. Líderes mundiais em capacidade acumulada, 2017	6
Figura 2.4. Matriz energética brasileira.....	7
Figura 2.5. Moinho de vento	8
Figura 2.6. Marco histórico da energia eólica	9
Figura 2.7. Moinho de vento de Blyth, 1891, Escócia	10
Figura 2.8. Moinho de vento de Brush	10
Figura 2.9. Funcionamento de um aerogerador.....	11
Figura 2.10. Turbina eólica de eixo vertical.....	12
Figura 2.11. Componentes de um aerogerador.....	13
Figura 2.12. Turbinas Savonius e Darrieus	15
Figura 2.13. Vento em um cilindro	17
Figura 2.14. Perfil aerodinâmico e seus parâmetros.....	18
Figura 2.15. Formação dos vórtices na ponta das asas.....	20
Figura 2.16. Influência do ângulo de ataque induzido na seção da asa.....	21
Figura 2.17. Representação da lei de Betz.....	25
Figura 2.18. Valores de coeficiente de potência.....	28
Figura 2.19. (a) Área varrida pelo elemento de pá e (b) elemento de pá	29
Figura 2.20. Velocidade do vento relativamente ao elemento de pá.....	30
Figura 2.21. Forças aerodinâmicas	31
Figura 2.22. Valores e coeficiente para o modelo	41
Figura 2.23. (a) algoritmo acoplado, (b) Algoritmo segregado para o pressure based	42
Figura 2.24. " <i>Density based</i> ", método de solução	43
Figura 2.25. Malha estruturada.....	47
Figura 2.26. (a) Malha não estruturada triangular e (b) malha não estruturada quadrilateral ..	48
Figura 2.27. Malha híbrida	48
Figura 2.28. Condição de contorno de parede	50
Figura 2.29. Condição de contorno no infinito.....	50
Figura 3.1. Perfil E387, <i>software</i> XFLR5	53

Figura 3.2. Perfil S8036, <i>software</i> XFLR5.....	54
Figura 3.3. Comparação dos perfis E387 e S8036, e seus valores de arrasto.....	54
Figura 3.4. Comparação dos perfis E387 e S8036, e seus valores de C_l/C_d	55
Figura 3.5. Ferramenta Imagem de esboço.....	56
Figura 3.6. Pá montada.....	57
Figura 3.7. Comando dimensionar entidades.....	57
Figura 3.8. Base montada.....	58
Figura 3.9. Ferramenta Revolução.....	58
Figura 3.10. Suporte 1.....	59
Figura 3.11. Suporte 2.....	59
Figura 3.12. Ferramenta Ressalto/Base extrudado.....	60
Figura 3.13. Ferramenta Padrão circular.....	60
Figura 3.14. Narcele.....	61
Figura 3.15. Turbina eólica montada.....	62
Figura 3.16. Rotor da turbina para estudo e análise no ANSYS 16.....	62
Figura 3.17. Domínio computacional.....	63
Figura 3.18. Comando <i>face meshing</i>	64
Figura 3.19. Malha e suas características.....	65
Figura 3.20. <i>Solve “Pressure based”</i>	66
Figura 3.21. Condições de contorno.....	66
Figura 3.22. Método de solução.....	67
Figura 4.1. Formação dos vórtices, ângulo de 2°.....	68
Figura 4.2. Formação dos vórtices, ângulo de 5°.....	68
Figura 4.3. Formação dos vórtices, ângulo de 10°.....	69
Figura 4.4. Formação dos vórtices, ângulo de 20°.....	69
Figura 4.5. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 2°.....	710
Figura 4.6. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 5°.....	731
Figura 4.7. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 10°.....	71
Figura 4.8. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 20°.....	71
Figura 4.9. Prolongamento da esteira, ângulo de 2°.....	743
Figura 4.10. Prolongamento da esteira, ângulo de 5°.....	73
Figura 4.11. Prolongamento da esteira, ângulo de 10°.....	74
Figura 4.12. Prolongamento da esteira, ângulo de 20°.....	744

LISTA DE FORMULAS

Equação 1	16
Equação 2	16
Equação 3	17
Equação 4	19
Equação 5	19
Equação 6	21
Equação 7	21
Equação 8	22
Equação 9	22
Equação 10	23
Equação 11	23
Equação 12	23
Equação 13	24
Equação 14	24
Equação 15	24
Equação 16	24
Equação 17	24
Equação 18	24
Equação 19	24
Equação 20	26
Equação 21	26
Equação 22	26
Equação 23	26
Equação 24	27
Equação 25	27
Equação 26	27
Equação 27	27
Equação 28	27
Equação 29	27
Equação 30	27
Equação 31	28

Equação 32	30
Equação 33	30
Equação 34	30
Equação 35	31
Equação 36	31
Equação 37	31
Equação 38	31
Equação 39	32
Equação 40	32
Equação 41	34
Equação 42	34
Equação 43	35
Equação 44	35
Equação 45	35
Equação 46	35
Equação 47	37
Equação 48	37
Equação 49	38
Equação 50	38
Equação 51	39
Equação 52	39
Equação 53	40
Equação 54	40
Equação 55	40
Equação 56	40
Equação 57	40
Equação 58	40
Equação 59	40
Equação 60	41
Equação 61	41
Equação 62	41
Equação 63	41
Equação 64	44

Equação 65	44
Equação 66	44
Equação 67	44
Equação 68	44
Equação 69	45
Equação 70	45
Equação 71	45

LISTA DE SIMBOLOS

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivos geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Energia eólica.....	4
2.1.1 A questão eólica no brasil e no mundo.....	5
2.1.2 A história da energia eólica no mundo.....	7
2.2. Aerogeradores.....	11
2.2.1 Componentes de aerogeradores.....	13
2.2.1.1 Rotor.....	13
2.2.1.2 Narcele.....	14
2.2.1.3 Gerador elétrico.....	14
2.2.1.4 Torre.....	14
2.2.1.5 Pás.....	16
2.3 Forças do vento.....	16
2.4 Perfil aerodinâmico.....	18
2.5 Escoamento em torno dos perfis.....	18
2.6 Forças em asas finitas.....	19
2.6.1 Sustentação em asas finitas.....	19
2.6.2 Força de arrasto em asas finitas.....	22
2.7 Conceitos preliminares para estudo e modelagem dos aerogeradores.....	23
2.7.1 Teoria da quantidade de movimento.....	23
2.7.2 Limite de Betz.....	25
2.7.3 <i>BEM THEORY</i> (Teoria do elemento de pás).....	28

2.8 SOLID WORKS	32
2.9 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAIS- CFD	33
2.9.1 Metodologia numérica.....	33
2.9.1.1 Método dos volumes finitos	33
2.9.2 Modelagem matemática.....	34
2.9.3 Modelagem turbulenta.....	36
2.9.3.1 Modelo $k\varepsilon - RNG$	36
2.9.3.2 Modelo $k\omega-SST$	38
2.9.3.3 Modelo Spalart e Allmaras	39
2.9.3.4 Algoritmos para determinação dos campos de pressão e velocidade.....	42
2.10 ANSYS.....	45
2.10.1 Pré processamento.....	46
2.10.1.1 ANSYS fluent <i>Geometry</i>	47
2.10.1.2 ANSYS fluent <i>Mesh</i>	47
2.10.1.3 ANSYS fluent Mesh.....	49
2.10.1.4 Condições de contorno de parede.....	49
2.10.1.5 Condições de contorno no infinito.....	50
2.10.1.6 <i>Solver</i>	51
3 METODOLOGIA.....	52
3.1 Etapas de execução para o presente estudo	52
3.2 <i>Software XFLR5</i>	52
3.3 SOLIDWORKS 2016 - Modelagem e montagem da turbina.....	55
3.4 Simulação fluidodinâmica – ANSYS FLUENT academic.	62
3.4.1 <i>Geometry</i>	63
3.4.2 <i>mesh</i>	64
3.4.3 <i>Setup</i>	65

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1 Análises dos vórtices: ângulos de 2°, 5°, 10° e 20°.....	68
4.2 Análises da esteira na secção das pás: ângulos de 2°, 5°, 10° e 20°.....	70
4.3 Análises das esteiras: ângulos de 2°, 5°, 10° e 20°.....	73
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica, no Brasil, detém um avanço quase de forma assídua, apesar da maior busca de eficiência energética em equipamentos devido à maior utilização de aparelhos que consomem energia elétrica (BARDELIN, 2004). No entanto, nos últimos anos, a expansão acentuada do consumo de energia e a crise no setor elétrico agravada pelas ameaças de falta de abastecimento chamam a atenção para a matriz energética do país.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energias, após a crise de racionamento em 2001, houve incentivos governamentais para a construção de novas termelétricas para suprimento elétrico nacional. Em 2001 a fatia térmica já representava 18% e em 2012 atingia 24%.

Então, a microgeração de energia, além de reduzir a sobrecarga e repassar as sobras dessa energia para a linha de distribuição, poderia ser um estímulo para milhares de consumidores. No caso da geração eólica em pequena escala, esta é uma tecnologia menos desenvolvida quando comparada com a eólica de grande potência (INIECO, 2011). Entretanto, no Brasil esse campo de energia vem crescendo ano após ano. “A energia eólica também se destaca na matriz de capacidade elétrica brasileira, e vem sendo muito expandida nos últimos anos. Em comparação com janeiro de 2016, a capacidade instalada eólica cresceu 31%, ficando na frente de outras fontes como hidráulica (6,5%) e térmica (4,1%)”, (MME, 2017). Então, isto abre uma gama de possibilidades neste campo a serem exploradas, principalmente na área de eficiência.

Desta maneira, têm-se vantagens no uso da simulação computacional como ferramenta de implementação dos modelos matemáticos na avaliação de fenômenos reais de complexidades variadas, representa economia de tempo e dinheiro minimizando gastos com materiais e experimentos durante a pesquisa como a confecção de perfis, rotores, hélices, túneis de vento, além de melhorar a eficiência dos resultados, uma vez que, há softwares que são referências em simulações fluidas dinâmicas.

1.1. Justificativa

O estudo de aerodinâmica aplicada ao estudo de otimização e eficiência de aerogeradores de baixa potência através de fluidodinâmica computacional causa um impacto relativamente positivo em três áreas: tecnológica, econômica e ambiental.

No que diz respeito à área tecnológica, este trabalho busca soluções de engenharia utilizando as modernas técnicas computacionais de análises de escoamentos que vem sendo empregadas nos últimos anos a nível internacional.

A busca pela otimização geométrica em aerogeradores de baixa potência, ou seja, aerogeradores que podem ser aplicados em uma residência comum ou até em lugares onde as redes de energia elétrica ainda não chegaram, pode representar um avanço científico em eficiência energética, apesar dessa área ainda estar em desenvolvimento, além de possuir um caráter desafiador por requerer interações de múltiplas áreas do conhecimento como métodos numéricos, implementação computacional, escoamento, modelagem matemática, geometria etc.

No ponto de vista econômica, essa proposta visa o desenvolvimento de pesquisa tecnológica de complexidade elevada sem requerer grandes recursos financeiros como equipamentos, instrumentação, túnel de ventos etc. Além de buscar resultados que tornem a microgeração de energia mais rentável pelo melhor aproveitamento do potencial eólico.

O fomento da microgeração de energia através de projetos mais eficientes fornecerá a base tecnológica necessária para melhorar a matriz energética brasileira com fontes limpas e renováveis como a energia eólica. Por isto, a importância em estudar e desenvolver pesquisas voltadas a aerogeradores de baixa potência através de simulação de perfis, pás e etc.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos geral

Avaliar a influência do ângulo entre o plano de rotação e as pás em fenômenos aerodinâmicos, uma vez que, esses possuem influências nos valores dos coeficientes de potência para aerogeradores.

1.2.2 Objetivos específicos

- Selecionar o perfil para aerogerador de baixa potência com base nos coeficientes de arrasto e coeficientes de desempenho aerodinâmico através do *software* XFLR5;
- Modelar o aerogerador no *software* SolidWorks;
- Analisar a influência do ângulo em fenômenos aerodinâmicos através do ANSYS *academic*;
- Avaliar o ângulo com maior potencial para análises de potência útil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia eólica

Sabe-se que desde os primórdios até os tempos atuais, o homem sempre vem buscando novos meios para suprir suas necessidades, desta maneira, novas tecnologias são criadas, no entanto, é conhecido que a evolução é diretamente proporcional aos recursos energéticos disponíveis, ou seja, os recursos para desenvolver qualquer produto. Diante disso a preocupação que se perdura é até quando esses recursos são suficientes para suprir o avanço, e a partir disso, vem o conceito de energias renováveis e não renováveis.

Para Da Costa; Prates (2005) energia renovável, faz ênfase sobre uma vasta fonte de recursos energéticos que são facultados pela natureza de forma intermitente, tais como o vento, o sol ou até as marés.

Já energia não renovável são energias que são facultadas pelo tempo e natureza, no entanto, esse tempo de formação ou criação não acontece dentro de um ciclo acessível. Além disso, as fontes de energias não renováveis em sua grande maioria emitem gases estufas as quais são responsáveis pelo efeito estufa, fazendo com que uma parte considerável de calor fique retida na atmosfera, o que resulta em um aumento gradativo de temperatura ocasionando efeitos catastróficos.

Diante disso, busca-se cada vez mais modos de inverter essa problemática mundial e para tal, o estudo e aprimoramento das energias eólicas é uma saída para reverter esse quadro. Para Dutra (2008), o vento é resultado do aquecimento da atmosfera terrestre, ou seja, o sol é o grande responsável pela criação deste, logo a energia eólica pode ser vista como decorrente da energia solar.

De outro modo, dizemos que energia eólica é uma energia renovável, a qual sua matriz energética é o vento, ademais, energia eólica é converter a energia cinética gerada pela interação do vento com o aerogerador, a partir daí se obtém energia elétrica.

2.1.1 A questão eólica no Brasil e no mundo

Dentre as muitas formas de energias renováveis, a eólica tem crescido muito em todo mundo, segundo Barbosa (2018) em 2017 a produção eólica mundial totalizou 539,58 GW de capacidade instalada, ou seja, o mundo instalou um total de 52.57 GW de potência à produção mundial chegando a essa capacidade.

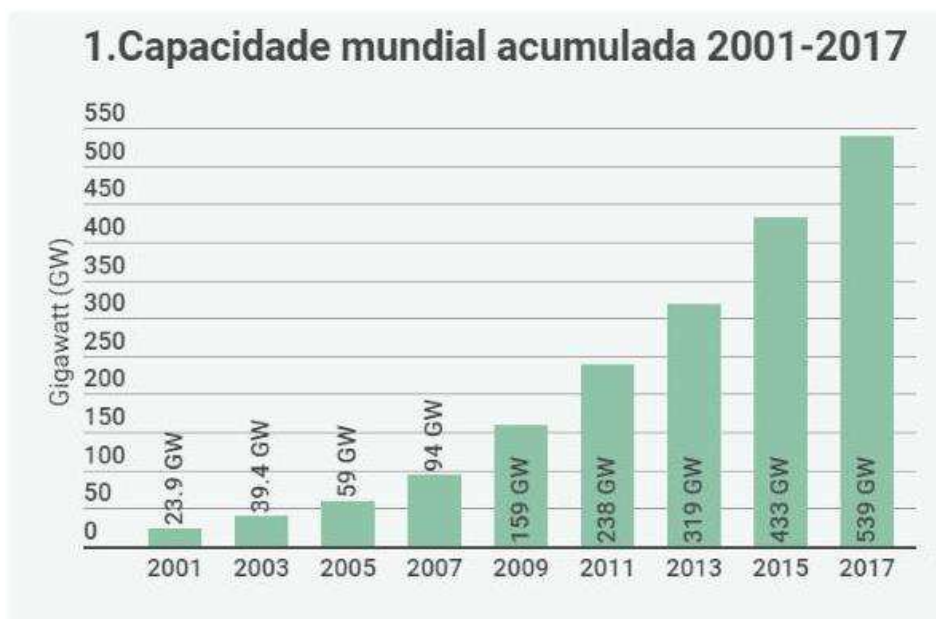


Figura 2.1. Capacidade mundial acumulada

Fonte: global wind statistic (2017).

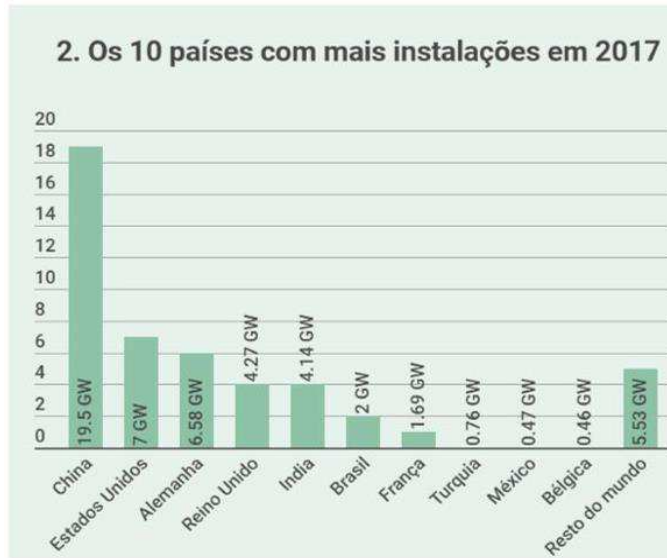


Figura 2.2. Ranking de 2017

Fonte: global wind statistic (2017).

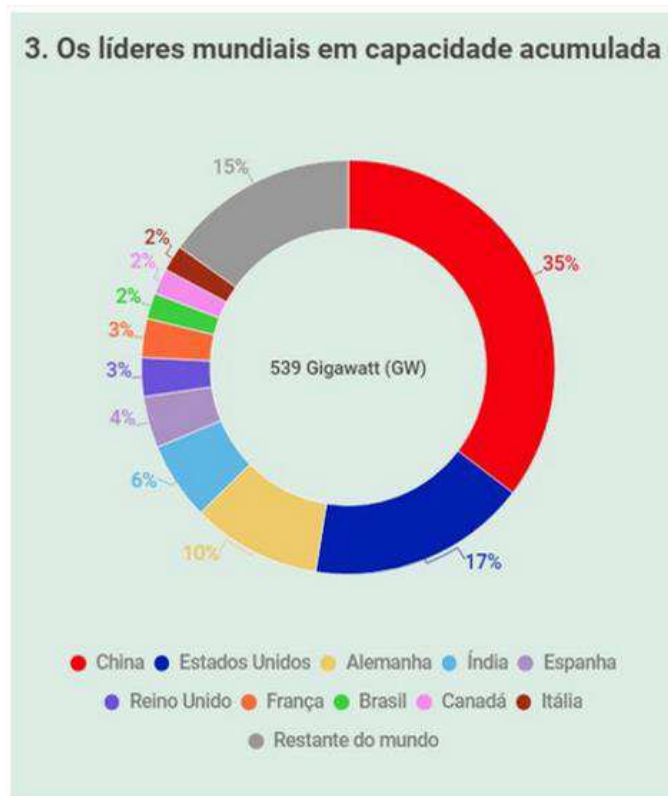


Figura 2.3. Líderes mundiais em capacidade acumulada, 2017

Fonte: global Wind.

E no Brasil, esse crescimento é evidente ano após ano, segundo o Ministério de Minas e Energias, o Brasil teve um aumento considerável de produção eólica, e isto o colocou entre os

dez países com maior capacidade instalada de geração dessa energia, uma vez que, o número de usinas de geração de energia eólica já está próximo de 500 instalações. Maia (2017) diz que “Os projetos de energia eólica no Brasil atingiram 12,7 gigawatts (GW) em 2017, aumento de 19% em relação a 2016, segundo informações da Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica) ”.

Ainda sobre a energia eólica e demais fontes no Brasil, um aspecto que deixa este país em destaque com relação aos demais países é que o mesmo possui uma das matrizes energética mais renovável do mundo, conforme a figura 2.4.

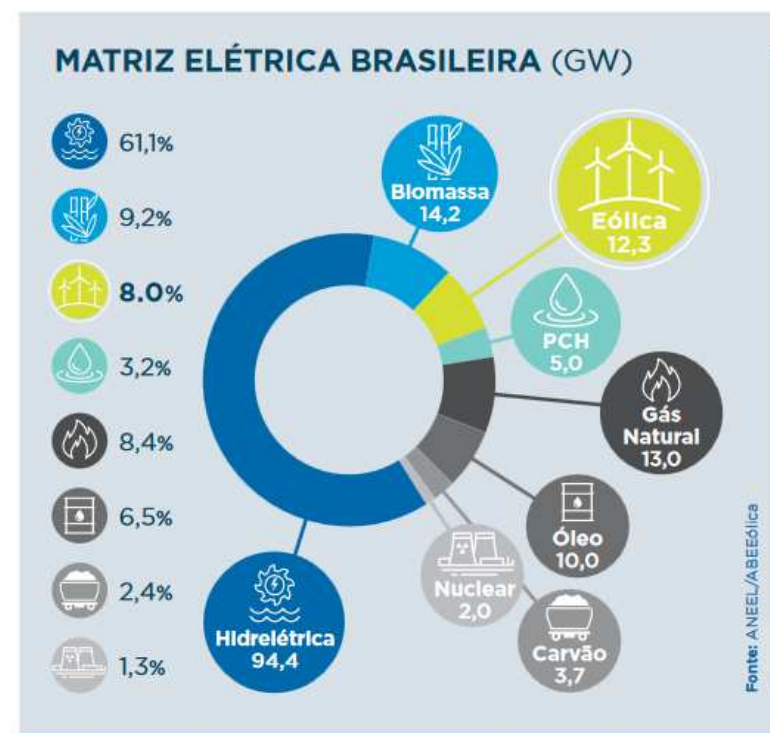


Figura 2.4. Matriz energética brasileira

Fonte: aneel/ abeeólica.

Então, além deste ser referência por sua matriz energética pouco poluente, o Brasil possui um grande potencial de instalação de usinas eólica, e isto abre grande possibilidade de estudo nessa área.

2.1.2 A história da energia eólica no mundo.

Acredita-se que as primeiras formas de utilização do vento foram feitas no transporte de escravos na antiga Grécia, usavam-se velas nos cargueiros para navegar nos oceanos. Já os persas utilizaram as forças do vento em moinhos principalmente de eixo vertical para serem

usados como força para moer grãos. Segundo Marques (2004) meados de 500-900.d.c, na Pérsia, surgiram os primeiros moinhos de vento criados para automatizar tarefas como: moer grãos e bombear água.

Existem relatos que antes dos cata-ventos na Pérsia, a China em meados de 2000 A.C e o império Babilônico por volta de 1700 anos, também utilizavam cataventos para a irrigação (SHEPHERD, 1994). Já na Europa no período da idade média, há relatos que os cataventos foram utilizados principalmente no período das cruzadas, movimento a qual tinham características políticas, econômicas e principalmente religiosa. Mas, o moinho mais utilizado e disseminado em todo o continente Europeu foi sem dúvida o moinho de vento holandês, este se aproximava dos atuais de eixo horizontal, pois, utilizam deste eixo, no entanto, ainda era muito voltado para o campo com tarefas de moer grãos

Segundo Marques (2004) esse tipo de moinho usava como ferramenta uma engrenagem que transmitia o movimento do eixo horizontal a uma pedra que girava e tinha como função moer os grãos. Não há dúvidas que a Holanda marcou a Europa com seu moinho de eixo horizontal, ela proporcionou a evolução dessa tecnologia como reforça Dutra (2008) segundo o referido autor, com o desenvolvimento de eixos, sistemas de controle, tecnologia das pás, os moinhos de vento propiciaram a otimização de atividades se utilizando a força dos ventos.

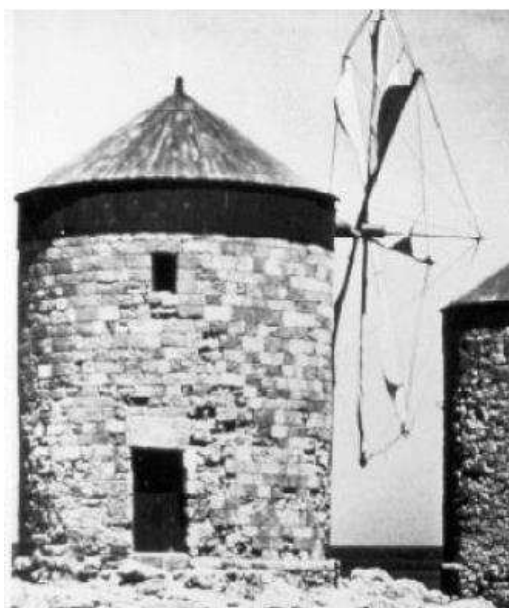


Figura 2.5. Moinho de vento

Fonte: Marques (2004).

“As principais tarefas na operação do moinho de vento eram: ajustar o rotor do moinho de vento na direção do vento, içar ou enfileirar as velas de acordo com a velocidade do vento para controle de potência e frear o rotor suficientemente cedo quando o astor estiver sendo preparado”, (GASH, 2011, p.25).

Já no final do século XIX houve a revolução industrial, fato que mudou totalmente a forma de pensar, trabalhar e produzir, as grandes fabricas de manufatura agora passaram a automatizar o processo surgiram as máquinas e a mão de obra braçal foi substituída por esses novos mecanismos, principalmente a máquina a vapor, e os processos fabris passaram a ser realizados com um tempo menor e em quantidades cada vez maiores de produto.

“Com o surgimento da máquina a vapor, iniciou-se o declínio do uso de energia eólica na Holanda” (DUTRA, 2008, p. 10), e isto pode ser visto na figura abaixo, a qual apresenta um breve marco histórico sobre a energia eólica.

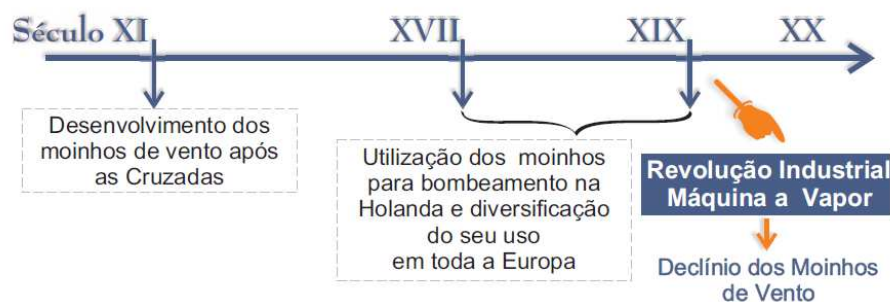


Figura 2.6. Marco histórico da energia eólica

Fonte: Dutra (2001).

Freitas (2008) diz que, as energias mecânicas resultantes das forças do vento eram utilizadas apenas para realização de trabalho mecânico e isso perdurou até no final do século XIX. Apesar disso, o primeiro moinho de vento (em pequena escala) utilizado para gerar eletricidade foi construído ainda no século XIX, por Jamys Blyth, na Escócia. Tinha 10m de altura e eixo vertical, foi instalada na casa de Blyth, tinha função de carregar os acumuladores de Camille Alphonse Faure e alimentava a iluminação da casa (PINTO, 2014).

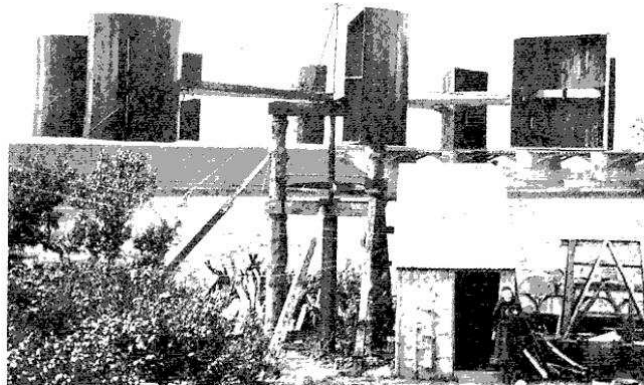


Figura 2.7. Moinho de vento de Blyth, 1891, Escócia

Fonte: domínio público.

Sem dúvida a máquina mais colossal destinada a gerar energia elétrica em uma maior escala comparada a máquina de Blyth, foi desenvolvida por Charles. F. Brush, era um cata-vento em proporções jamais vista antes, como Shefherd (1994) explica, se tratava de um cata-vento que fornecia 12kW para carregamento de baterias, isto em corrente contínua, as baterias eram destinadas para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes.

Marques (2004) nos detalha a estrutura dessa máquina, segundo ele, a máquina de Brush abrangia 144 pás de madeira 17 metros de diâmetro que utilizava um gerador CC, além de possuir uma cauda a qual permitia o rotor ficar na direção do vento.

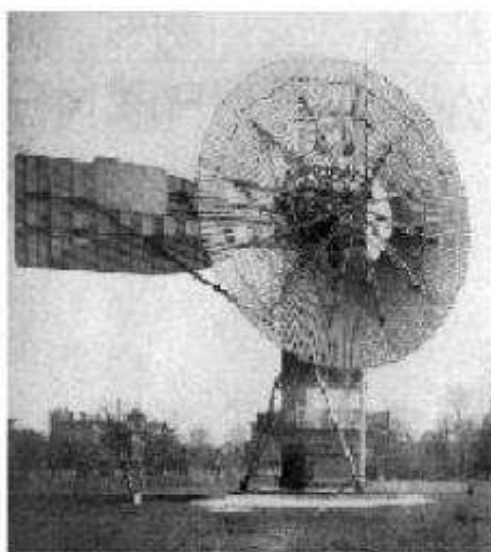


Figura 2.8. Moinho de vento de Brush

Fonte: Spera (2009).

2.2. Aerogeradores.

A função essencial de uma turbina eólica é de converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica (PINTO, 2013). Logo, aerogeradores são dispositivos que captam a energia cinética dos ventos e transformam tais energias em mecânica no rotor em seguida em energia elétrica.

Segundo Pinto (2013) o funcionamento da turbina segue duas etapas, o rotor juntamente com a turbina remove a energia cinética dos ventos para conversão em energia mecânica, após esse processo, o gerador converte energia mecânica em energia elétrica. Segue, o esquema na imagem.

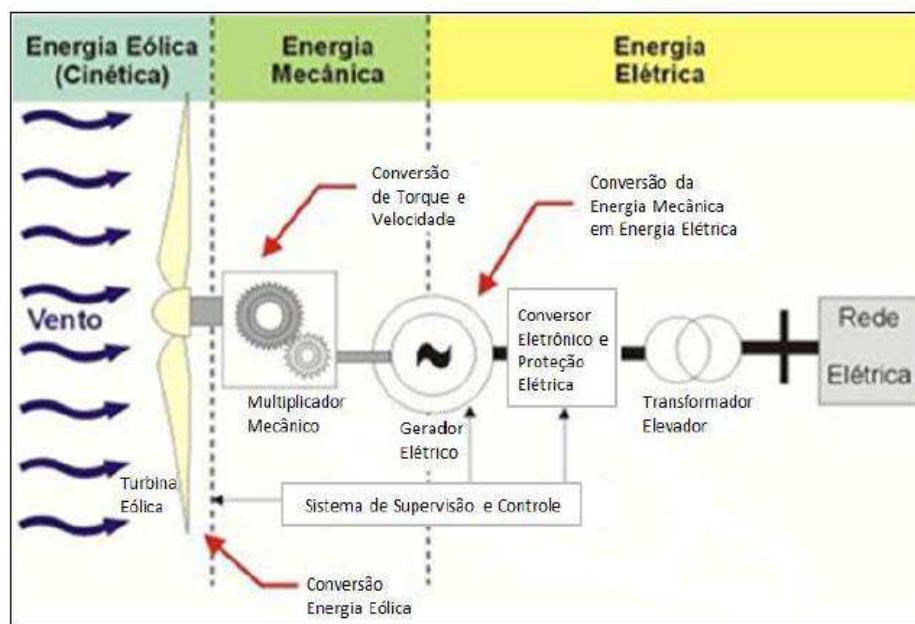


Figura 2.9. Funcionamento de um aerogerador

Fonte: Centrais elétricas (2013).

As turbinas eólicas podem ser classificadas em 2 tipos de acordo com sua geometria construtiva as quais podem ser:

1. TEEH- turbinas eólicas de eixo horizontal;
2. TEEV- turbinas eólicas de eixo vertical.

E podem ser classificadas quanto a sua capacidade de geração de energia:

1. Grande Porte -acima de 1MW de potência;
2. Médio Porte-potência de 50kW a 1MW;
3. Pequeno Porte -até 50kW .

TEEH: São as turbinas mais utilizadas, são movidas pela energia cinética dos ventos além das forças associadas a ele, que são a sustentação e o arrasto. Segundo Guzzeta (2007) essas turbinas possuem lâminas direcionadas ao vento e o eixo que é horizontal ao chão liga as pás da turbina a qual estão conectadas.



Figura 2.10. Turbina eólica de eixo vertical

Fonte: Dutra (2007).

Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) são as mais utilizadas em toda parte do mundo como já mencionado, Pinto (2013) nos relaciona as características que fazem com que essa turbina seja mais utilizada, de acordo com o autor, o que faz esse modelo manter a sua ascendência é por conta das seguintes características:

- Com o conhecimento de ângulo de pás é possível controlar a velocidade do rotor e a saída da potência;

- A configuração das pás do rotor pode ser otimizada aerodinamicamente, ou seja, é possível melhorar estudando os perfis das pás para otimizar e ganhar eficiência;
- Liderança em pesquisas tecnológicas no desenvolvimento e otimização de hélices.

2.2.1 Componentes de aerogeradores

Segundo Wenzel (2007) os aerogeradores possuem 3 componentes essenciais, o rotor a qual compõem as pás, a gôndola (narcele), e a torre. Na gôndola ficam os principais componentes tais como: gerador, eixos, mancais além do freio e sistemas de controle da turbina.

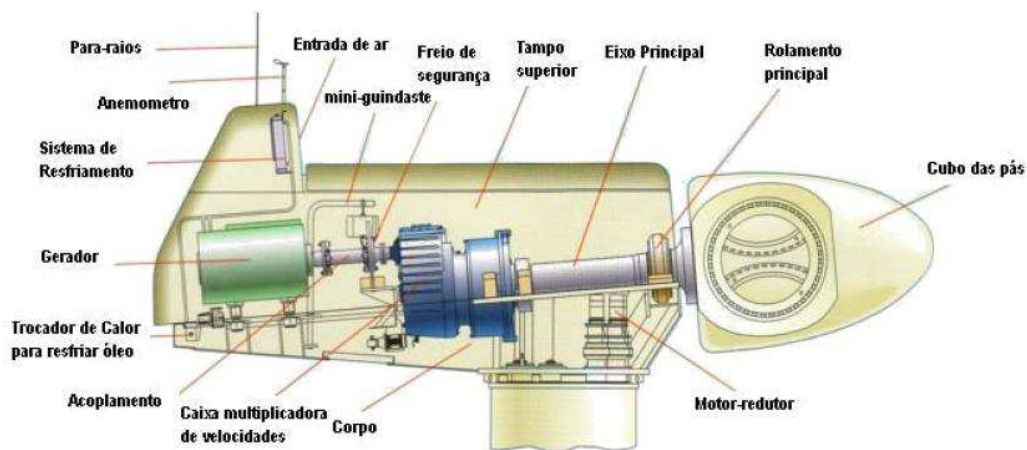


Figura 2.11. Componentes de um aerogerador

Fonte: Wenzel (2007).

2.2.1.1 Rotor

Rotor trata-se da parte aerodinâmica do sistema, é o componente a qual receberá a otimização, ou seja, nas pás que compõem esse sistema. Segundo Gasch (2011) o coração de uma aerogerador é o rotor a qual converte a energia eólica em energia mecânica de rotação, ou

seja, é o principal componente do aerogerador, razão pela qual este componente é o principal foco de estudo em todo o mundo.

Freitas (2008) complementa o que é o rotor, segundo o referido autor, esse componente é responsável pela transformação da energia dos ventos em energia mecânica, e, por conseguinte, transmitir aos outros elementos da turbina.

2.2.1.2 Narcele

Segundo Dutra (2008) trata-se da carcaça montada sobre a torre de sustentação onde fica o gerador elétrico, além das outras partes essenciais para funcionamento como freio, rotores, além dos sistemas de controle.

2.2.1.3 Gerador elétrico

Esse é o principal componente de conversão da energia elétrica, podem ser CC ou AC. Para Dutra (2008), a integração de geradores no sistema de energia eólica resulta em:

- Dificuldade de instalação, manutenção e operação para o sistema;
- Variações do torque de entrada, pois, essas variações induzem variações de potência disponível no eixo;
- Imposição de frequência e tensão constante no produto da energia.

2.2.1.4 Torre

Basicamente a torre tem como função a sustentação da narcele e esse componente fica em uma altura desejada para a aplicação, mas, é preciso ter controle desta altura para não acarretar em problemas, como diz Dutra (2008) é desejável para o projeto que o rotor esteja a uma altura

maior possível do plano, contudo, a altura acarretar em custos de fabricação além de comportamentos dinâmicos diferentes do desejável.

TEEV- Segundo Dutra (2008) esses rotores não necessitam de mecanismos de acompanhamento da direção do vento. Gasch, (2011) diz que, os principais tipos de rotores dessas torres são Darrieus, Savonius e turbinas com torres de vórtices.

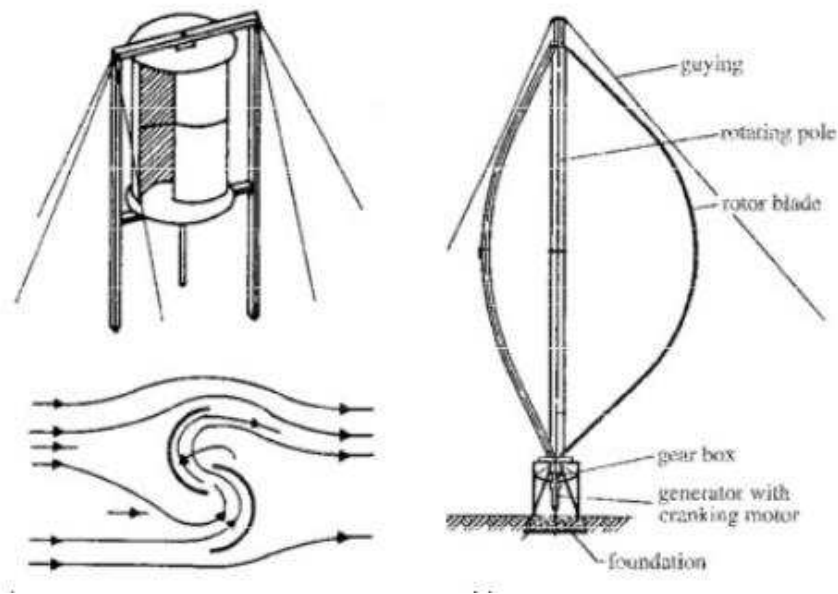


Figura 2.12. Turbinas Savonius e Darrieus

Fonte: Gasch (2011).

Segundo Meyers (2013) as turbinas Darrieus tem boa eficiência, no entanto, produzem elevada torção de torque e tensão cíclica na torre, além disso o torque de partida é muito baixo. As turbinas savonius são turbinas de arrasto e são mais utilizadas em casos de alta confiabilidade, além disso, esse tipo de turbina tem um desempenho favorável em áreas de vento turbulento e auto arranque, conforme o referido autor.

2.2.1.5 Pás

Componente mais importante ao se tratar de eficiência energética, potência e desempenho do aerogerador. Segundo Pinto (2013) as pás dos aerogeradores são responsáveis pela captação do vento, e desta forma a conversão em energia mecânica.

Pinto (2013) nos apresenta características as quais as pás se diferenciam, são estas:

- Tamanho da corda do perfil aerodinâmico;
- O perfil das pás;
- Tamanho da área de varredura destas;
- Ângulo da corda do perfil e a direção da corrente de ar;
- A largura a qual é determinada pelo comprimento da corda dos perfis aerodinâmicos.

2.3 Forças do vento.

Segundo Jansen, Wim Am; Smulders (1977) o ar tem massa, no entanto, a densidade desta é relativamente baixa. Quando o vento a qual possui velocidade igual a v tem energia cinética expressa por:

Equação 1

$$E = \frac{m * v^2}{2}$$

Para uma densidade de fluido do ar igual a ρ , essa energia cinética por volume de ar passa a ser igual a:

Equação 2

$$E = \frac{\rho * v^2}{2}$$

Onde

E= energia cinética, [J]
 ρ = densidade do fluido, [kg/m³]
 v = velocidade do fluido [m/s]

Se considerarmos o fluido em escoamento através de uma área A perpendicular à direção do vento como pode ser visto na figura a seguir, então o fluido poderá ser representado por $\phi_v = V_\infty * A$.

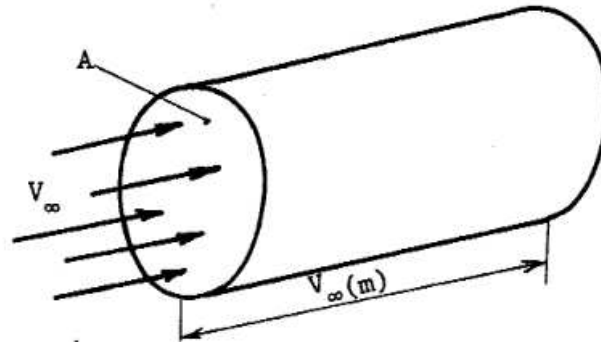


Figura 2.13. Vento em um cilindro

Fonte: Jansen, Wim AM; Smulders (1977).

Sendo assim, a potência do vento varia de acordo com os parâmetros estudados a cima e pode ser representado por:

$$P_{ar} = \frac{\rho * v^2 * A}{2} \quad \text{Equação 3}$$

Para.

P_{ar} =potência [W];
 ρ =densidade do fluído [kg/m³];
 v = velocidade do vento [m/s];
 A = área [m²]

Gasch (2011) faz uma importante observação, ele diz que, caso o ar flua através da área sem nenhuma desaceleração da velocidade, não haveria conversão de energia, logo, deve ter um ótimo de conversão de energia eólica através da desaceleração de fluxo.

2.4 Perfil aerodinâmico

Os primeiros aerofólios patenteados foram desenvolvidos por Horácio F. Phillips em 1914, eles foram os pioneiros em testes com túnel de vento em aerofólios. A priori, os projetos dos perfis aerodinâmicos eram basicamente personalizados e somente por volta dos anos de 1930, a NASA iniciou um programa de pesquisa desenvolvendo séries de aerofólios construídos em forma racional e sistemática que estão em uso em grande parte das aeronaves atuais (ISMAIL, 2007).

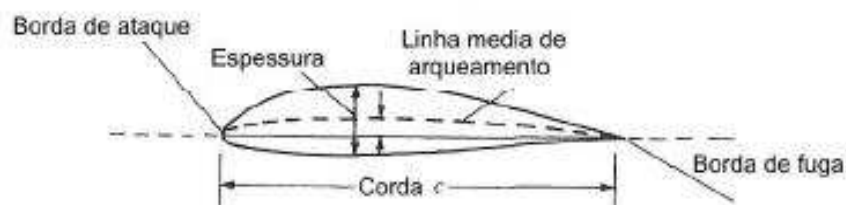


Figura 2.14. Perfil aerodinâmico e seus parâmetros

Fonte: Ismail (2007).

2.5 Escoamento em torno dos perfis

De acordo com Çengel; Cimbala (2007) um fluido quando sai da inercia sobre um corpo rígido, este efetua forças de pressão normais à superfície e forças de cisalhamento paralelas ao plano da superfície ao longo da fronteira externa. Então, essas forças são as forças de sustentação e arrasto e são de relevância no dimensionamento de pás e otimização destas, uma vez que, essas características influenciam no desempenho dos aerogeradores.

A sustentação trata-se particularmente da diferença de pressão da camada inferior e superior, ou seja, a pressão na camada inferior é maior do que a da camada superior respeitando assim o princípio de Bernoulli, e o arrasto é a resistência do ar ao movimento do corpo. Essas forças são representadas pelas seguintes equações.

$$Cl = \frac{L}{\frac{1}{2} V^2 * S * \rho}$$

Equação 4

L é a força de sustentação; [N]

ρ é a massa específica do ar; [kg/m³]

V é a velocidade do fluido; [m/s]

S é área da forma em planta; [m²]

Cl é o coeficiente de sustentação. [Adimensional]

$$Cd = \frac{D}{\frac{1}{2} V^2 * S * \rho}$$

Equação 5

Onde:

D é a força de arrasto; [N]

ρ é a massa específica do ar; [kg/m³]

V é a velocidade do fluido; [m/s]

S é área da forma em planta; [m²]

Cd é o coeficiente de arrasto. [Adimensional]

Outra característica, trata-se do ângulo de ataque que é formado entre a corda do aerofólio e a incidência do fluido com relação ao seu movimento, este possui ascendência relativa sobre os coeficientes de sustentação e arrasto e provoca um fenômeno que por vezes torna-se catastrófico, a perda de sustentação que é o estol ou estolamento.

2.6 Forças em asas finitas

2.6.1 Sustentação em asas finitas

Como é conhecido, a sustentação é dita como a diferença de pressão do intradorso para com o extradorso. Em asas esse efeito precisa ser abordado mais a fundo, já que ocorre os

mesmos efeitos em pás de rotores e quando comparado a perfis aerodinâmicas, os efeitos são distintos, já que, agora trata-se de escoamento tridimensional, ou seja, existe uma componente do fluxo na direção da envergadura. Esse componente tem efeito na ponta da asa, conforme a figura abaixo:

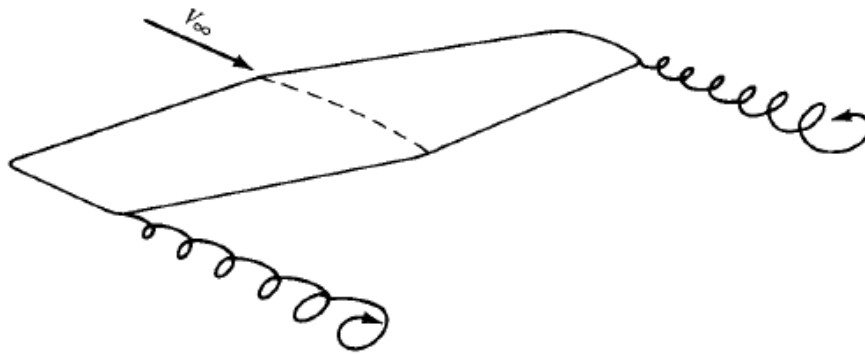


Figura 2.15. Formação dos vórtices na ponta das asas

Fonte: Anderson Junior (2010).

Anderson Junior (2010) diz que, o fluxo que se localiza próximo das pontas se enrola em torno destas e isto faz com que a corrente a qual se encontra na alta pressão em baixo da ponta da asa migre para a baixa pressão a cima da ponta desta, ou seja, no topo. E isto tem por consequência a geração de vórtices na ponta da asa se dobrando em direção a raiz.

Existem diferenças entre os coeficientes de sustentação da asa e do perfil, razão que se dá por conta das mudanças de velocidade nas asas em virtude da criação desses vórtices que também afeta no campo de pressão (RODRIGUES, 2014).

Uma componente surge através do movimento secundário dos vórtices que arrasta o ar circundante com eles, este componente é o *downwash*, este combina com a velocidade do V_∞ fazendo a produção de um vento relativo local, a qual é forçado para baixo na proximidade de cada seção do aerofólio da asa, conforme esclarece Anderson Junior (2010). A perda do coeficiente de sustentação nas asas é devido a velocidade induzida que tem por efeito a redução do ângulo de ataque (SANTOS apud RODRIGUES, 2016).

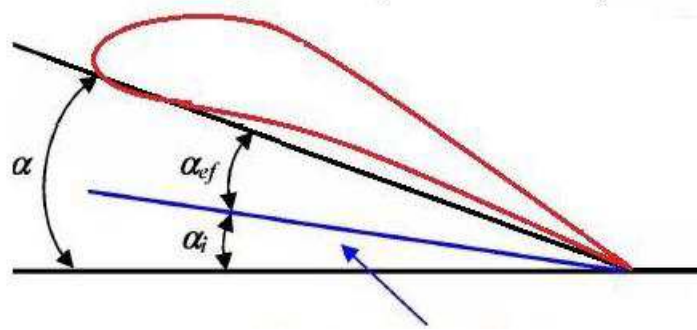


Figura 2.16. Influência do ângulo de ataque induzido na seção da asa

Fonte: Rodrigues (2014).

O ângulo de ataque observado pela seção de aerofólio local é o ângulo que está entre a linha de acordes e o vento relativo local, em consequência do efeito *downwash*, verifica-se o ângulo efetivo de ataque que se forma entre a corda e o vento relativo, a qual é menor que o ângulo de ataque do perfil, conforme Santos (2016). O ângulo efetivo de ataque pode ser determinado por:

$$\alpha_{ef} = \alpha - \alpha_i \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

- α_{ef} ângulo de ataque efetivo; [graus]
- α ângulo de ataque; [graus]
- α_i ângulo de ataque induzido; [graus]

De acordo com a figura e aplicando relações trigonométricas o ângulo de ataque induzido pode ser dado pela equação 7.

$$\alpha_i = \frac{w}{V_\infty} \quad \text{Equação 7}$$

Para:

- α_i ângulo de ataque induzido; [graus]
- w velocidade induzida; [m/s]
- V_∞ representa a velocidade livre do fluido; [m/s]

De acordo com Santos (2017 apud Rodriguez, 2016), a determinação do ângulo de ataque efetivo por vezes se torna complicada, devido à velocidade induzida, fazendo com que tenha uma dependência desses parâmetros. Então, o ângulo de ataque induzido devido sua complexidade de dedução pode ainda ser determinado pela equação 8.

$$\alpha_i = \frac{Cl}{\pi AR}$$

Equação 8

Onde α_i é igual ao ângulo de ataque induzido em graus, Cl trata-se do coeficiente de sustentação da asa grandeza adimensional, enquanto que AR representa o alongamento também adimensional

Logo, no fluxo tridimensional ocorrem formações de vórtices nas pontas da asa, e esses alteram o arranjo de pressão na asa, que tem por efeito a perda de sustentação por conta desse desequilíbrio, isto pode ser chamado de “pressão de arrasto”.

2.6.2 Força de arrasto em asas finitas

É irrelevante a abordagem da força de arrasto em asas finitas, uma vez que em estudos voltados a aerogeradores, manipular essas forças é otimizar a potência gerada nestes aparelhos.

De acordo com Anderson Junior (2010) o arrasto em um asa finita é resultado da soma do arrasto induzido D_i , o arrasto de atrito D_f juntamente com o arrasto de pressão D_p em virtude da separação do fluxo ambos os coeficientes são adimensionais. O arrasto pode ser escrito pela equação 9.

$$C_{D,i} = \frac{D_f + D_p}{q_\infty S}$$

Equação 9

O coeficiente de arrasto induzido pode ser definido como:

$$C_{D,i} = \frac{Di}{q_{\infty}S} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

O coeficiente de arrasto total para asa finita é dado pela equação 11.

$$C_d = C_f + C_{d_p} \quad \text{Equação 11}$$

Para

C_D é coeficiente de arrasto induzido; [adimensional]

C_f é o coeficiente de arrasto de atrito; [adimensional]

C_{d_p} é o coeficiente de arrasto de pressão; [adimensional]

2.7 Conceitos preliminares para estudo e modelagem dos aerogeradores

2.7.1 Teoria da quantidade de movimento.

Segundo Wenzel (2007) o rotor é considerado como um disco permeável e este exerce uma força e um torque por conta do fluxo a qual atravessa o rotor. Então, os elementos são considerados como segmentos anulares.

Nesta teoria, considera-se uma força axial, em um segmento anular. Esta força é dada por:

$$dFn = (V_0 - u_1) dm \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 12}$$

Onde u_1 trata-se da velocidade distante após o rotor e esta é dada por:

$$u_1 = Vo(1 - 2a) \quad (\text{m/s}) \quad \text{Equação 13}$$

Além disso, o $d\dot{m}$ que é o fluxo mássico, é dado por:

$$d\dot{m} = \rho Vo(1 - a)(2\pi r dr) \quad (\text{kg/s}) \quad \text{Equação 14}$$

Então, a força axial em um rotor é dada por:

$$dF_n = \rho Vo^2 a(1 - a)4\pi r dr \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 15}$$

Na teoria da quantidade de movimento, a cooperação da força tangencial é facultada como:

$$dF_t = wr d\dot{m} \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 16}$$

$$dF_t = wr d\dot{m} \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 17}$$

$$w = 2\Omega a' \quad (\text{rad/s}) \quad \text{Equação 18}$$

$$dF_t = \rho [Vo(1 - a)][\Omega ra']4\pi r dr \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 19}$$

2.7.2 Limite de Betz

Correia (2014) diz que, trata-se de um modelo a qual é usado para determinar a potência e o funcionamento de um rotor ideal, este foi desenvolvido por Albert Betz, tal modelo tem por base a teoria da quantidade de movimento.

Betz analisou um disco em um tubo a qual escoava o ar sobre este comparando esse sistema a um escoamento através de uma turbina, como segue a figura:

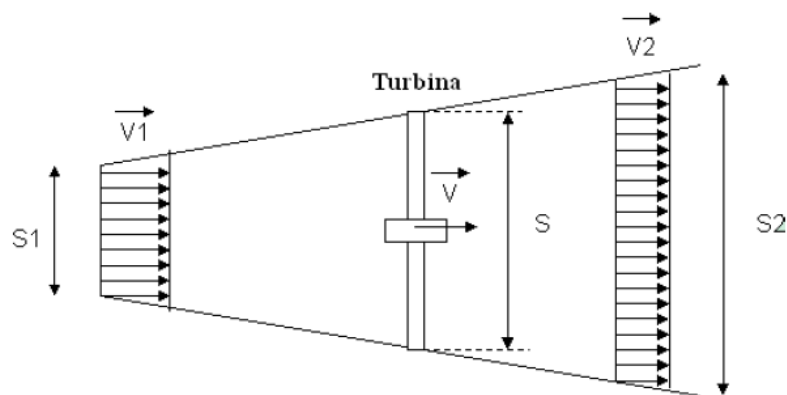


Figura 2.17. Representação da lei de Betz

Fonte: Correia (2014).

Pinto (2012) ressalta-nos sobre tal fenômeno, segundo o mesmo, após o vento deixar a turbina, esse tem velocidade e pressão reduzidas, e isto faz com ocorra uma expansão do ar atrás da turbina e esta não extrai toda a energia cinética inicial contida no vento.

A remoção de potência aerodinâmica do ar pelo disco atuador passa pela percepção do empuxo, podendo ocorrer por imposição de um salto de pressão por meio de uma superfície ou mediante um sumidouro de quantidade de movimento dentro de uma região volumétrica, como explica Lovato (2013).

Betz estabeleceu seu limite teórico através de análises do escoamento e pressão. O modelo do disco nos descreve este processo, tal processo é descrito abaixo de acordo com (LOVATO 2013, apud Burton et al., 2001.)

Primeiramente a potência elétrica é descrita pela equação 20.

$$P_{ele} = \eta P_{ext} \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 20}$$

P_{ext} trata-se da potência extraída pelo vento e η trata-se do rendimento da turbina, este depende da geometria do perfil, das condições do vento, forças e torques.

$$P_{ext} = F U_D \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

$$\begin{aligned} P_{ext} &= \text{potência extraída do vento [W]} \\ U_D &= \text{Velocidade do vento; [m/s]} \\ F &= \text{força do empuxo; [N]} \end{aligned}$$

A força do empuxo pode ser calculada por:

$$F = \Delta U \dot{m} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \text{variação do vento na transição no rotor; [m/s]} \\ \dot{m} &= \text{vazão mássica do fluído; [kg/s]} \end{aligned}$$

Então, a força de empuxo pode ser representada como:

$$F = (U_\infty - U_w) \rho A_d U_d \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$$\begin{aligned} U_\infty &= \text{velocidade da corrente livre do vento; [m/s]} \\ U_w &= \text{velocidade teórica do vento na esteira; [m/s]} \\ \rho &= \text{massa específica do ar; [kg/m}^3\text{]} \\ A_d &= \text{área varrida pelo rotor; [m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Burton et al. (2001), definiu U_d como:

$$U_d = U_\infty(1-a) \quad \text{Equação 24}$$

a é chamado de fator de indução axial

Substituindo a equação 24 na equação 23, tem-se uma nova equação para a força do empuxo definida pela equação 25.

$$F = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty(1-a) \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 25}$$

Então ao se aplicar Bernoulli antes e depois do rotor, ou plano de rotação. (Burton et al., 2001), prova que:

$$F = \frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2)A_d \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 26}$$

Logo, igualando as equações 26 e 25, tem-se:

$$U_w = (1-2a)U_\infty \quad (\text{m/s}) \quad \text{Equação 27}$$

Daí as equações 25 e 27 fornecem a equação fundamental para o cálculo do empuxo e modelagem da esteira, representada pela equação 28.

$$F = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1-a) \quad (\text{N}) \quad \text{Equação 28}$$

Das equações 21, 24 e 28, tem-se a equação 29.

$$P_{ext} = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1-a) \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 29}$$

Burton et al. (2001) definiu o coeficiente de potência como:

$$C_p = \frac{P_{ext}}{P_\infty} \quad \text{Equação 30}$$

$$C_p = 4a(1-a)^2$$

Equação 31

C_p = coeficiente de potência de Betz; [adimensional]

Betz estimou que o máximo rendimento possível de um rotor eólico é 59.35%, como explica Correia (2014), segundo o referido autor, o máximo valor de C_p ocorre quando $a = 1/3$, ou seja, a derivada em relação à a é nula resultando em $C_p = \frac{16}{27} = 0.593$ este valor é conhecido como o limite de Betz.

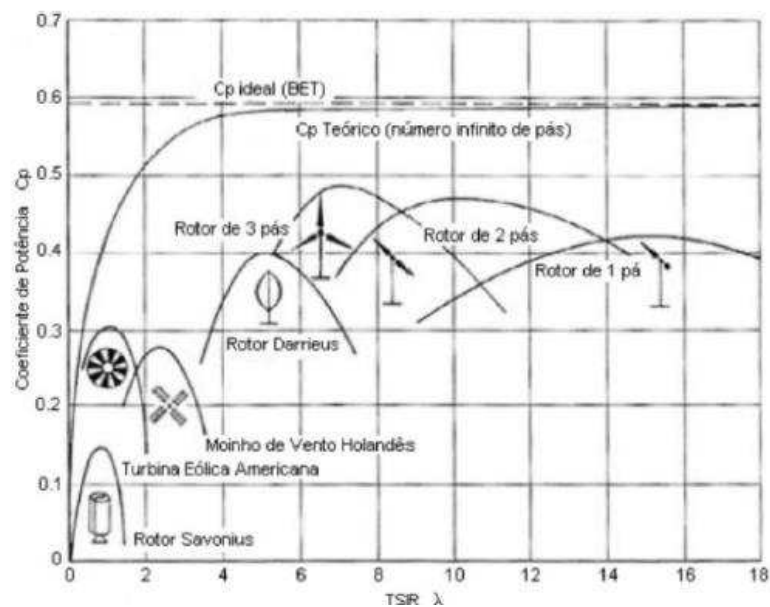


Figura 2.18. Valores de coeficiente de potência

Fonte: Correia (2014).

2.7.3 BEM THEORY (Teoria do elemento de pás)

Trata-se de um modelo a qual possibilita os cálculos de cargas estáveis para diferentes configurações de velocidade do vento, rotação, ângulos de ataque, além de ângulo de inclinação. Sousa (2014) reforça esse conceito, segundo o mesmo, esse modelo proporciona avaliar a eficiência de turbinas eólicas e projetos de dinâmica dos fluidos das pás do rotor.

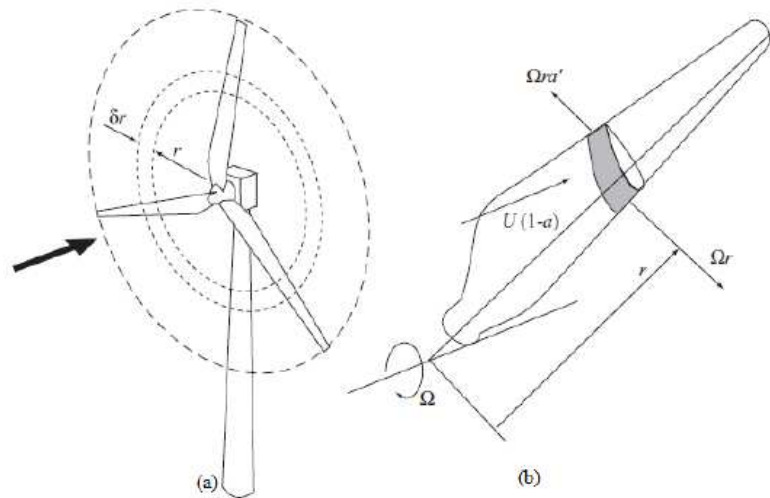


Figura 2.19. (a) Área varrida pelo elemento de pá e (b) elemento de pá

Fonte: Sousa (2014).

Segundo Hansen (2008) no modelo BEM as características a seguir são assumidas para os elementos anulares:

1. Nenhuma dependência radial, ou seja, o que acontece em um elemento é isolado somente a ele não podendo ser sentido por outros.
2. A força das lâminas no fluxo é constante em cada elemento anular.

Através da teoria do elemento de pás (BEM) é possível calcular forças fundamentais as quais são comuns em pás de rotores, como:

- Velocidades de incidência do fluido no rotor;
- Ângulos relativos à incidência do vento nas pás;
- Forças de arrasto e sustentação.

Sendo a figura, seguir.

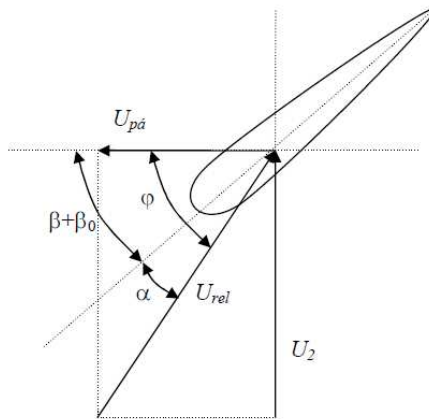


Figura 2.20. Velocidade do vento relativamente ao elemento de pá

Fonte: Freitas (2008).

É possível calcular as forças atuantes sobre as pás, forças as quais são representadas na figura 2.20 através da decomposição da velocidade do vento em um componente axial U_2 , consegue-se encontrar os valores do ângulo de incidência do fluido (φ) e a velocidade relativa (U_{rel}).

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad [\text{m/s}] \quad \text{Equação 32}$$

Freitas (2008) diz que, para se calcular $U_{pá}$ faz-se necessário considerar que exista uma rotação no sentido contrário ao sentido de rotação das pás, por conta da indução de vento no rotor. Considerando a velocidade da rotação da esteira do vento após escoar sobre o roto, o fator de indução tangencial pode ser representado por:

$$a' = \frac{\omega e}{2\Omega} \quad [\text{adimensional}] \quad \text{Equação 33}$$

Logo pode-se representar $U_{pá}$ pela equação 34.

$$U_{pá} = r\Omega(1 + a') \quad [\text{m/s}] \quad \text{Equação 34}$$

Então, a velocidade relativa é considerada como:

$$U_{rel} = \sqrt{U_{pá}^2 + U_2^2} \quad [\text{m/s}] \quad \text{Equação 35}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{U_2}{U_{pá}}\right) \quad [\text{graus}] \quad \text{Equação 36}$$

Não obstante, analisando o diagrama de forças na figura a seguir é possível calcular as equações das forças de arrasto e sustentação.

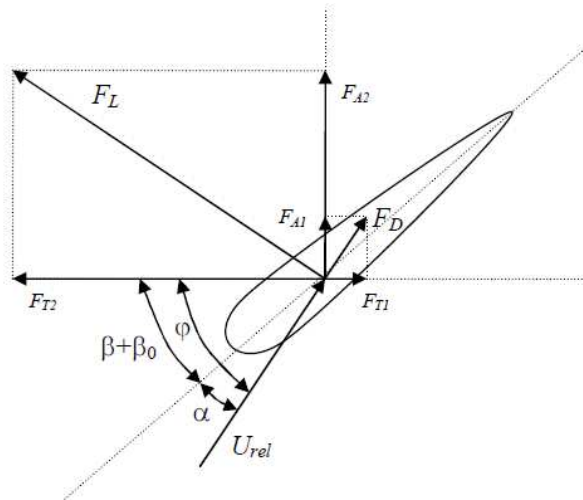


Figura 2.21. Forças aerodinâmicas

Fonte: Freitas (2008).

De acordo com o diagrama, é possível descrever as equações para as forças abaixo:

$$F_A = F_{A1} + F_{A2} = F_d \sin(\varphi) + F_l \cos(\varphi) \quad \text{Equação 37}$$

$$F_T = F_{T2} - F_{T1} = F_l \sin(\varphi) - F_d \cos(\varphi) \quad \text{Equação 38}$$

Onde F_d e F_l são as forças de arrasto e sustentação respectivamente, seja um segmento de pá de comprimento dr , corda c e raio médio r , e conhecendo-se os coeficientes de arrasto e sustentação, segue:

$${}_d D = C_d \frac{1}{2} \rho W^2 c d r$$

Equação 39

$${}_d L = C_l \frac{1}{2} \rho W^2 c d r$$

Equação 40

Esses são os coeficientes de arrasto e sustentação ${}_d D$ e ${}_d L$ respectivamente, coeficientes de acordo com a teoria de elemento de pá.

2.8 SOLID WORKS

O SolidWorks é um CAD 3D que foi desenvolvido pela *Dassault Systèmes SolidWorks Corp*, este *software* é usado por mais de 3.4 bilhões de engenheiros e designers e em mais de 100 mil empresas em todo o mundo, conforme Meira (2010).

De acordo com Meira (2010) o SolidWorks, trata-se de uma plataforma CAD, a qual utiliza um tipo de computação paramétrica e desta maneira, gera configurações tridimensionais a partir de formas básicas de geometria. Este software é o chamado programa paramétrico é baseado em entidades, com isso, este programa tem uma plataforma com ótimas possibilidades de modificação dos projetos.

Vigolino (2004) explica um pouco sobre este *software*, de acordo com o autor, no tipo de programa denominado programa paramétrico as dimensões e a própria geometria da peça são trabalhadas como critérios para construção de objetos.

A plataforma deste software permite modelar, montar e ainda obter o desenho da peça, além disso, permite que as peças e montagens que são feitas no programa sejam exportadas, testadas e simuladas através do método dos elementos finitos em softwares de simulação do tipo fluidodinâmica, termodinâmica, eletrodinâmica e outros.

Geralmente a construção de um modelo no SolidWorks começa com um desenho 2D, a qual possui pontos, linhas, arcos, *splines* e outras ferramentas. As dimensões são adicionadas pelo projetista além da localização geométrica. As relações são utilizadas para definir atributos

como paralelismo, concentricidade, perpendicularidade, ângulos além de tangências (MEIRA, 2010).

2.9 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAIS- CFD

2.9.1 Metodologia numérica

2.9.1.1 Método dos volumes finitos

O vigente trabalho utiliza simulações numéricas em código CFD, baseada no software estudantil ANSYS 16, a qual provem do método dos volumes finitos para gerar, processar e avaliar as simulações.

Este método de discretização e análises de soluções, utiliza-se como pressuposto a forma integral das equações de Navier-Stokes, ou seja, o domínio computacional é dividido em uma quantidade de pequenas áreas de volume de controle, então, as equações de movimentos são aplicadas a cada pequena parcela de volume de controle (CORREIA 2014).

A discretização por esse método modifica as equações diferenciais parciais em um sistema de equações algébricas. Conforme diz Fortuna (2000) as EDPs são integradas diretamente sobre as malhas, que tem por consequência, facilitar a obtenção das equações de diferenças finitas e sua solução numérica.

O método dos volumes finitos requer três níveis de aproximação para um algoritmo numéricos, conforme Correia (2014), são estes:

1. Integração das equações que o fluxo de fluido possui em todos os volumes de controle do domínio;
2. O passo que converte as equações integrais num sistema algébrico, ou seja, a discretização a qual envolve a substituição de uma série de termos que reproduz processos dos fluidos, especificamente, convecção, difusão e fonte.

3. A partir de um processo iterativo fazer a solução das equações algébricas.

2.9.2 Modelagem matemática

Em *softwares* de código CFD como no vigente trabalho, o ANSYS FLUENT, os procedimentos as quais são obtidos os campos de velocidade e pressão para o tipo de escoamento a ser estudado é chamado de RANS - (*Reynolds averaged Navier-Stokes*), tal método é responsável por resolver as equações de movimento fluido, como equações de conservação de massa e de Navier-Stokes.

Segundo Luz (2012) para se analisar escoamento sobre uma turbina, emprega-se a solução das equações de Navier-Stokes com as médias de Reynolds (RANS), as RANS diminuem de maneira significativa os recursos computacionais suficientes para as simulações, uma vez que, os modelos de turbulência transformam as equações primárias do escoamento, fazendo assim a predição dos efeitos da turbulência.

Correia (2014) faz um tratamento da predição das RANS através da decomposição de Reynolds, ele nos diz que, a decomposição de Reynolds trata-se de uma técnica matemática que tem por objetivo separar as partes média e flutuantes de uma grandeza a partir das equações de Navier-Stokes. O referido autor, faz uma abordagem do tratamento das equações para se chegar ao tensor de RANS.

Então, ao considerar ϕ uma componente escalar (velocidade, pressão, temperatura...), tem-se:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad \text{Equação 41}$$

Desta forma se $\bar{\phi}$ é o valor médio no tempo e ϕ' o termo de variação da componente. O valor médio do tempo é:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} \phi \, dt \quad \text{Equação 42}$$

Para:

T_o = tempo de referência; [s]

T = intervalo de tempo suficiente grande em comparação à escala de tempo para escoamento turbulento; [s]

De tal modo que, ao se transpor as equações instantâneas da quantidade de massa e movimento, para as variáveis de escoamento, resulta nas equações abaixo:

Conservação de massa:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Equação 43}$$

Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{Equação 44}$$

Obtemos as equações características do modelo matemático descrito anteriormente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad \text{Equação 45}$$

$$\rho \frac{D u_i}{D t} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{D u_i}{\partial x_j} + \frac{D u_i}{\partial x_i} + \frac{D u_i}{\partial x_i} \right] + \rho g_i + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad \text{Equação 46}$$

Este termo é conhecido como tensor de Reynolds a qual é obtido a partir dos modelos de turbulência. Como esclarece Akawa (2010), o termo $\overline{\rho u_i' u_j'}$ trata-se do tenso de Reynolds, é um conjunto de seis incógnitas adicionais para a modelagem das equações onde é necessário modelar os efeitos da turbulência, isto é conhecido como o efeito ou problema de fechamento.

2.9.3 Modelagem turbulenta.

A turbulência se caracteriza por um escoamento com aparência fluida ‘desorganizada’, ou seja, ao se observar um escoamento de característica turbulenta, não se pode distinguir a direção e o sentido do escoamento, diferente do escoamento em regime laminar, logo, faz-se necessário aplicar as modelagens matemáticas para escoamentos turbulentos, visto que no presente caso de estudo e em muitos estudos fluidodinâmicos em softwares de código CFD, geralmente ocorre fenômenos de turbulência em torno destes.

Em escoamentos turbulentos com uma alta complexidade, a resolução das equações governantes demanda a utilização de modelos as quais realizem o tratamento das equações de maneira mais simples, diminuindo assim o esforço computacional buscando sempre uma melhor precisão (DAHL 2015). Então, é irrelevante a utilização de modelos que possam sanar o problema do fechamento.

De acordo com a literatura e com Fluent (2013), podemos destacar três modelos diferentes as quais realizam o tratamento numérico da turbulência.

- $k\varepsilon - RNG$;
- $k\omega - SST$;
- *Spalart-Allmaras*.

2.9.3.1 Modelo $k\varepsilon - RNG$

Este modelo $k\varepsilon - RNG$ é um modelo baseado na modelagem de sua taxa de dissipação ε e de transporte de energia k . A importância dos modelos para modelagem da turbulência é aquela as quais possuem duas equações, uma vez que, estes permitem tanto a solução da energia cinética k quanto a escala de comprimento turbulenta (WILCOX, 1998).

De acordo com Fluent (2013) esse modelo apresenta as seguintes características:

- Este possui um termo em sua equação que melhora a precisão a precisão dos cálculos de escoamento;
- No RNG o efeito do turbilhão na turbulência é incluído e isto faz com que melhore a precisão dos fluxos turbilhonantes;
- A teoria RNG fornece uma formula analítica para números turbulentos de Prandtl.

Luz (2012) enuncia que, o modelo $k\varepsilon - RNG$ é resultado de uma severa técnica estatística, além disso, com relação ao $k\varepsilon$ há um termo adicional na equação de ε aumentando assim sua precisão em escoamentos turbulentos. De acordo com Fluent (2013) a equação de transporte para que no vigente modelo é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad \text{Equação 47}$$

Já para a variável ε , a equação de transporte é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_k \quad \text{Equação 48}$$

Onde:

G_k é a geração da energia cinética turbulenta por conta do gradiente de velocidades

G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido à flutuação

Y_m contribuição da dilatação da turbulência incompressível

a_k e a_ε são os números de Prandtl inversos para k e ε

S_ε e S_k são termos fontes

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ constantes

R_ε termo adicional em relação ao $k\varepsilon$ padrão

μ_{eff} viscosidade efetiva

2.9.3.2 Modelo $k\omega$ -SST

Trata-se de um modelo desenvolvido por Menter (1994) este modelo foi criado com objetivo de unificar ou juntar os dois modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$, de modo a completar e suprir as limitações de cada modelo na região de escoamento onde estes são aplicados, como diz Aoyama (2017). Mas, como a maioria dos modelos de métodos computacionais, este possui suas falhas, no $k-\varepsilon$ as falhas são em torno das zonas de camada limite turbulenta as quais há separação de escoamento, enquanto o modelo $k-\omega$ tem uma maior precisão, no entanto, falha em escoamentos com separação, conforme o referido autor.

Fonseca (2009) faz uma ênfase mais detalhada sobre as características desse modelo, segundo o mesmo, o modelo $k-\varepsilon$ possui uma restrição em função de escala característica de frequência ω pequena, desta forma, o modelo SST combina a formulação robusta do $k-\omega$ com a independência do $k-\varepsilon$ na corrente livre fora da camada limite.

A equação de transporte para a variável k para esse modelo é dada pela equação 49.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad \text{Equação 49}$$

Já para a variável ω , a equação de transporte é dada pela equação abaixo.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial X_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad \text{Equação 50}$$

Onde:

G_k é a geração da energia cinética turbulenta por conta do gradiente de velocidades

Y_m contribuição da dilatação da turbulência incompressível

Γ_ω e Γ_k representam a difusividade efetiva de k e ω

Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω por conta da turbulência

S_ε e S_k são termos fontes

μ_{eff} viscosidade efetiva

D_ω termo de difusão cruzado

2.9.3.3 Modelo Spalart e Allmaras

Este modelo foi desenvolvido por Spalart e Allmaras em 1992, trata-se de um modelo simples, a qual resolve uma equação de transporte modelada para a viscosidade cinemática e turbulenta, neste modelo não é essencial calcular a partir da espessura local de cisalhamento a escala de comprimento local (LUZ, 2012).

O modelo Spalart e Allmaras não equaciona a energia cinética turbulenta, resolvendo apenas a equação do transporte para uma forma modificada da viscosidade turbulenta, no entanto, segundo Correia (2014) este modelo inclui uma equação diferencial a qual de maneira simples e precisa resolve a equação de transporte ideal para zonas de vórtices. O Spalart e Allmaras é um modelo de baixo número de Reynolds no campo de simulações fluidodinâmicas, de acordo com Fluent (2013) o Spalart e Allmaras foi estendido com um tratamento de parede insensível y^+ , e isto permite a aplicação da resolução de parede próxima.

A equação de transporte, conforme Correia (2014) é dada como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right\} + C_{b2\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}} \quad \text{Equação 51}$$

Na equação, G_ν é a produção de viscosidade turbulenta e γ_ν é a distribuição da viscosidade turbulenta a qual ocorre nas regiões juntas às paredes por conta do embate nesta e ao amortecimento viscoso. O $\sigma_{\tilde{\nu}}$ e C_{b2} são constantes e ν é a viscosidade cinemática. O $S_{\tilde{\nu}}$ é um termo fonte a qual é definido pelo utilizador do *software*.

A viscosidade turbulenta é pela equação 52.

$$\mu_t = \rho\tilde{\nu}f_{v1} \quad \text{Equação 52}$$

Assim, f_{v1} é dado pela equação 53.

$$f_{v1} = \frac{X^3}{X^3 + C_{v1}^3} \quad \text{Equação 53}$$

Onde X é dado por:

$$X = \frac{\tilde{v}}{\nu} \quad \text{Equação 54}$$

G_v é representado pela formula 55.

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{v} \quad \text{Equação 55}$$

Para \tilde{S} igual a:

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{v}}{k^2 d^2 f_{v2}} \quad \text{Equação 56}$$

Onde f_{v2} é dado por:

$$f_{v2} = 1 - \frac{X}{1 + X f_{v1}} \quad \text{Equação 57}$$

C_{b1} e k são constantes, d trata-se da distância da parede e S é a medida escalar do tensor das deformações, a qual é de fundamental importância na magnitude da vorticidade.

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad \text{Equação 58}$$

Com um tensor da taxa de rotação média, Ω_{ij} , dado por:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{Equação 59}$$

De acordo com o referido autor, a utilização da expressão 59, justifica-se quando há escoamentos próximos da parede.

O termo de distribuição é dado por:

$$\gamma_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 \quad \text{Equação 60}$$

Para f_w, g, r igual a:

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right] \quad \text{Equação 61}$$

$$g = r + C_{w2} (r^6 - r) \quad \text{Equação 62}$$

$$r \equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} k^2 d^2} \quad \text{Equação 63}$$

C_{w1}, C_{w2} e C_{w3} são constantes.

As constantes desse modelo de acordo com o referido autor são dadas pela figura abaixo.

Coeficiente	Valores
C_{b1}	0.1335
C_{b2}	0.622
C_{v1}	7.1
C_{w1}	$\frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{1 + C_{b2}}{\sigma_{\tilde{v}}}$
C_{w2}	0.3
C_{w3}	2
$\sigma_{\tilde{v}}$	2/3
k	0.41

Figura 2.22. Valores e coeficiente para o modelo

Fonte: Correia (2014).

2.9.3.4 Algoritmos para determinação dos campos de pressão e velocidade

O ANSYS FLUENT, bem como alguns softwares de cálculos CFD, pós processamento de modelagem da geometria, domínio, e processamento da malha, utilizam de métodos numéricos os quais fazem o processamento das equações que regem os escoamentos, estes são chamados de equações de acoplamentos e são dois tipos principais:

1. *Pressure-based*;
2. *Density-based*.

De acordo com Correia (2014) o método *Pressure-based* foi desenvolvido como o objetivo de analisar escoamentos incompressíveis de baixas velocidades, logo, o método *Density-based* destina-se a escoamentos compressíveis de alta velocidade.

O algoritmo *pressure-based*, compreende soluções que resolvem as equações de governo sequencialmente, ou seja, por conta de as equações governantes dispor de forma não linear e acopladas, então a *loop* da solução precisa ser realizado iterativamente para que desta forma se consiga obter uma solução numérica convergida (FLUENT, 2013).

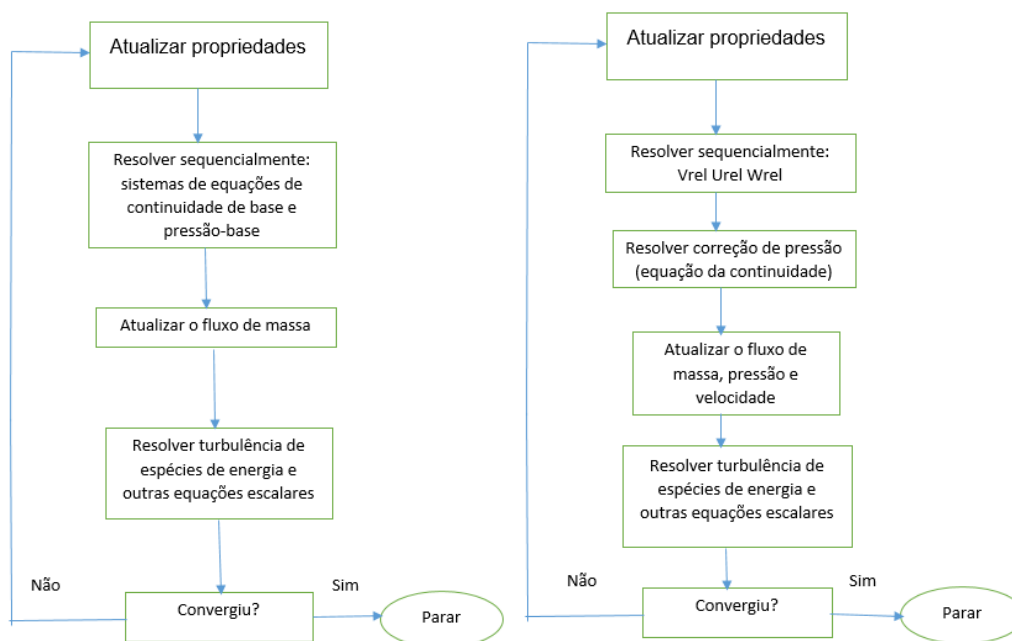


Figura 2.23. (a) algoritmo acoplado, (b) Algoritmo segregado para o *pressure based*

Fonte: Fluent (2013).

Density-based de acordo com Fluent (2013) este método resolve as equações governantes de continuidade, energia, momento e transporte simultaneamente, ou seja, esse método baseado em densidade, é capaz de resolver o sistema de forma acoplada utilizando de formulação explícita acoplada ou formulação acoplada implícita.

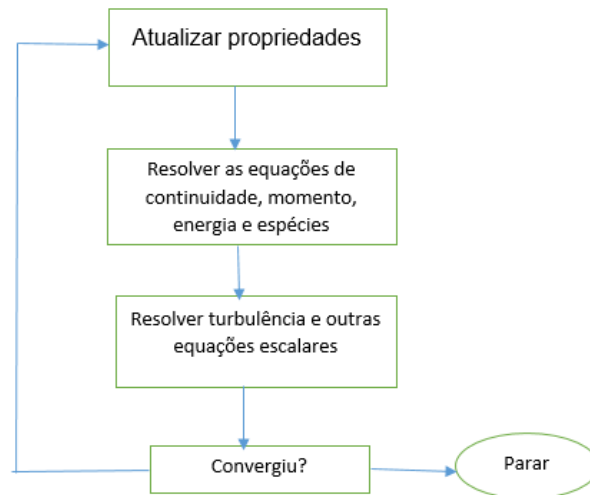


Figura 2.24. *Density based*, método de solução

Fonte: Fluent (2013).

No ANSYS, há métodos os quais são disponíveis para o tratamento da pressão e da velocidade, podemos citar 2, mas há outros, são esses:

- SIMPLE;
- SIMPLEC.

O método SIMPLE (*Semi Implicit Linked Equations*), foi desenvolvido por Pantakar em 1980, de acordo com Correia (2014) este método é uma abreviação de método semi-implícito para acoplamento, este permite fazer a correção de pressão seguindo uma correção de velocidade respeitando a equação da continuidade.

Neste método a pressão é representado através de um valor estimado p^* a qual é somado a uma correção p' , obtêm-se equações para as componentes da velocidade u , v e w em função da correção p' a qual é obtido ao se inserir o termo de pressão nas equações de Navier-Stokes, com explica (LUZ,2012).

De acordo com Fluent (2013) o algoritmo SIMPLE usa uma aplicação entre as correções de velocidade e pressão de forma a estabelecer a conservação de massa, a partir disso obter o

campo de pressão. Este, faz uma abordagem do algoritmo usado para obter o campo de pressão.

Caso a equação do momento for definido com um campo de pressão p^* , o resultado é uma face de fluxo J_f^* , dado por:

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad \text{Equação 64}$$

Mas, isso não satisfaz a equação da continuidade, assim, a correção é J_f' adicionado a face de fluxo J_f^* , logo a correção da face de fluxo é J_f' dado por:

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad \text{Equação 65}$$

No método SIMPLE, o J_f' é escrito por:

$$J_f' = d_f(p_{c0}' - p_{c1}') \quad \text{Equação 66}$$

Esse algoritmo faz a substituição das equações de correção de fluxo, ou seja, as equações 65 e 66 na equação da continuidade discreta para se obter uma equação para a correção de pressão nas células, e essa equação pode ser escrita como:

$$a_p p^1 = \sum_{nb} a_{nb} p_{nb}^1 + b \quad \text{Equação 67}$$

Onde b é dado por:

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad \text{Equação 68}$$

As correções de pressão nas células podem ser calculadas usando o AMG (multigride algébrico) depois que todo o processo termina, uma solução é obtida na célula, então os fluxos são corrigidos de acordo com as equações abaixo:

$$p = p^* + a_p p' \quad \text{Equação 69}$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad \text{Equação 70}$$

Onde a_p equivale ao fator de relaxamento de pressão, além disso o fluxo de face corrigido dado por J_f corresponde a equação da quantidade igualmente em cada iteração.

SIMPLEC

Esse algoritmo acompanha as mesmas etapas do algoritmo SIMPLE, entretanto, a diferença entre eles é que no SIMPLEC, as equações de momento são trabalhadas de forma que as equações de correção de velocidade escondam termos que sejam irrelevantes que aquelas omitidos em SIMPLES, como diz Versteeg; Malalasekera (2007).

De acordo com Fluent (2013) o algoritmo da correção da face de fluxo do SIMPLEC é diferente para o algoritmo SIMPLE apesar de ser o mesmo método, a equação para o SIMPLEC pode ser escrita como:

$$J_f = J_f^* + d_f (p^1_{c0} - p'_{c1}) \quad \text{Equação 71}$$

Entretanto o coeficiente d_f é redefinido como uma função de $(ap - \sum_{nb} a_{nb})$

2.10 ANSYS.

ANSYS *academic*, é um *software* de engenharia de uso geral para simular projetos de todas as áreas, seja dinâmica dos fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo além de esforços físicos, estruturais e vibracionais. Desta maneira, o ANSYS é uma plataforma que permite simular futuros protótipos em um ambiente virtual, seguro e eficaz, antes mesmo de fabrica-los, minimizando a possibilidade de erros de fabricação ou de projetos.

ANSYS FLUENT trata-se de uma plataforma que permite realizar cálculos computacionais de dinâmica dos fluidos, problemas de escoamento em planos 2D e 3D através da geração de malhas e condições de contorno, além de estudar problemas de transferência de calor e outros. De acordo com Correia (2014) o ANSYS FLUENT fundamenta-se em algoritmos numéricos os quais solucionam problemas de fluidos, isto possibilita a utilização de diferentes modelos físicos, como:

- Diferentes modelos de escoamento;
- Fluidos incompressíveis e compressíveis;
- Combustão, radiação.

Segundo Versteeg; Malalasekera (2007) os softwares de código CFD, como o CATIA, ou o ANSYS, segue três passos ou elementos para solucionar os problemas: Pré processamento, Solver e Pós processamento.

2.10.1 Pré processamento.

Essa precedente etapa, consiste em definir os parâmetros físicos as quais serão utilizados na resolução do problema, ou seja, fazer a modelagem física do problema. Modelagem significa quais grandezas físicas serão determinadas, como temperatura, pressão, densidade, idealiza-se um modelo a partir dos princípios físicos, descritos pelos preceitos de conservação pertinente ao fenômeno, como conservação de massa, energia e momento (FORTUNA, 2000).

De acordo com Correia (2014) esta fase possui as seguintes ações:

- Modelação da geometria a qual define o domínio computacional;
- Geração da malha;
- Seleção dos fenômenos físicos e químicos;
- Definição das características dos fluidos;
- Especificação das condições de contorno,

Além disso, o pré-processamento pode ser subdividido em três sub etapas, são essas:

1. ANSYS fluent *Geometry*;

2. ANSYS fluent *Mesh*;
3. ANSYS fluent *Setup*.

2.10.1.1 ANSYS fluent *Geometry*.

Consiste em modelar a geometria a qual será resolvido o código CFD, além do domínio computacional que será gerado a malha.

2.10.1.2 ANSYS fluent *Mesh*.

Trata-se de uma parte essencial para a solução do problema, ou seja, a geração da malha. Nesta etapa utilizamos os comandos para refino, otimização e geração das malhas sobre o domínio computacional, comandos tais como: *inflation*, *sizing*, *smoothing*, *mapped face*, *meshing*, dentre outros.

Existem vários tipos de malhas, são estas:

Malhas estruturadas: Trata-se das malhas as quais possuem células organizadas, além de células dispostas de quatro aresta (2D) ou células volumétricas com seis faces (3D), seja a figura.

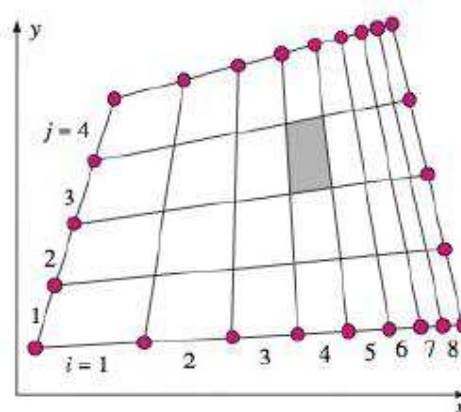


Figura 2.25. Malha estruturada

Fonte: Çengel; Simbala (2007).

Malha não estruturadas: São células dispostas ou distribuídas de maneiras aleatórias dentro do domínio computacional, não há uma organização das células, conforme a figura.

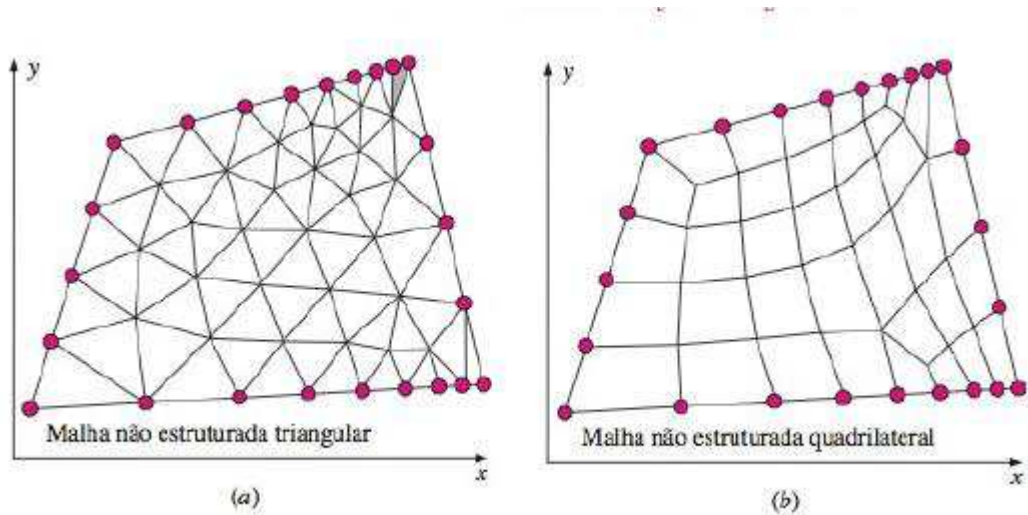


Figura 2.26. (a) Malha não estruturada triangular e (b) malha não estruturada quadrilateral

Fonte: Çengel; Cimbala (2007).

Malhas híbridas: Têm células organizadas e não organizadas, ou seja, um conjunto de malhas estruturada e não estruturadas.



Figura 2.27. Malha híbrida

Fonte: Çengel; Cimbala (2007).

Esse processo de geração da malha é em geral demorado e requer um maior tempo de cálculo quando melhor for o refino da malha, uma vez que, quanto mais refinada melhor será os resultados.

2.10.1.3 ANSYS fluent Mesh.

ANSYS fluent setup.

Esta é a parte mais importante da geração de uma solução para o código CFD, nesta etapa é feita as condições de contorno para a solução e convergência da malha. As condições de contorno determinam o tipo de escoamento a ser tratado, além disso, para obter uma solução CFD exata é necessário estabelecer condições de contorno exata (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

De acordo com Fluent (2013) os tipos de condições disponíveis no ANSYS fluent são classificados de acordo com as seguintes formas:

- Condições de entrada e saída: Entrada de velocidade, fluxo de massa, ventilação e pressão, saída de pressão, campo distante, saída de ventilação e fã exausto;
- Condições de parede, repetição e limites dos pólos: periódico, parede, simetria e eixo;
- Limites internos da face: radiador, ventilador, salto poroso, parede e interior.

2.10.1.4 Condições de contorno de parede.

Trata-se da condição de não escorregamento na parede fixa, ou seja, os lados superiores e inferiores possuem velocidade e tensão de cisalhamento basicamente nula. Conforme diz Çengel; Cimbala (2007) a componente normal da velocidade é igual à zero, pelo fato de o fluido não ultrapassar através de uma parede por toda a extensão de uma face em que a condição de contorno é prescrita.

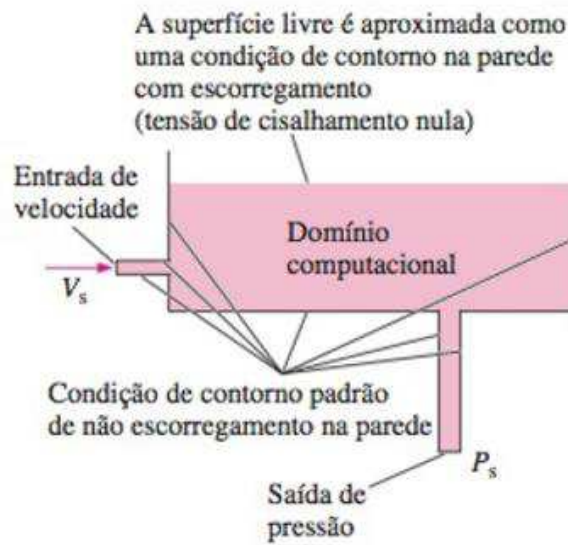


Figura 2.28. Condição de contorno de parede

Fonte: Çengel; Cimbala (2007).

2.10.1.5 Condições de contorno no infinito

Para Ismail (2007) nessa condição de parede o fluido está longe do corpo e em todas as direções, daí o escoamento aproxima das condições de escoamento uniforme, ou seja, no infinito.

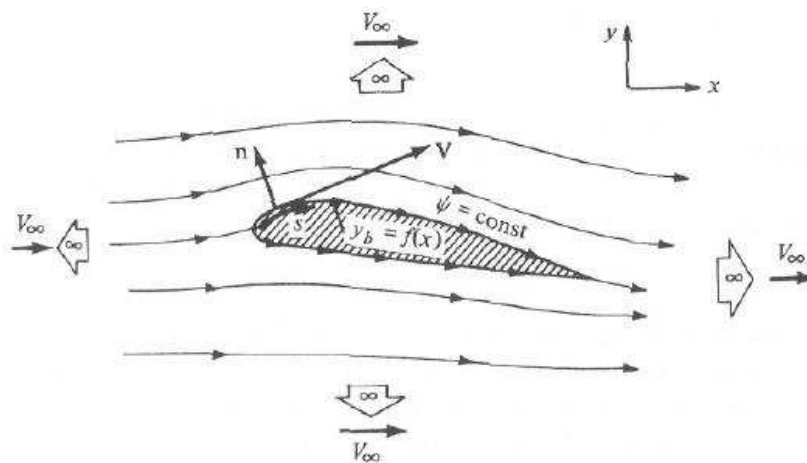


Figura 2.29. Condição de contorno no infinito

Fonte: Ismail (2007).

2.10.1.6 Solver

Solver é a parte mais importante de um código CFD, este método é o responsável pela discretização através do método dos volumes finitos e para as resoluções algébricas do código. Correia (2014) diz que, o *Solver* é o mecanismo responsável pela aplicação dos algoritmos para a resolução do problema, como o SIMPLEC ou SIMPLE, e responsável pela aplicação das técnicas numéricas de solução.

Nessa etapa, os métodos numéricos as quais formam o *Solver* efetuam as seguintes etapas, de acordo com Versteeg; Malalasekera (1995).

- Integração das equações as quais governam o fluxo dos fluidos sobre o volume de controle;
- Conversão das equações já integradas em sistemas de equações algébricas, ou seja, discretização;
- Solução das equações algébricas.

Pós processamento

Esta etapa consiste no output dos resultados as quais foram empregados na fase do solver, nessa etapa é possível avaliar os campos de escoamento, de pressão, velocidade, além analisar outros resultados, como gráficos de arrasto e sustentação. Conforme Correia (2014), o ANSYS *academic*, dispõem de várias ferramentas as quais permitem a visualização dos dados, especificamente:

- Gráficos de vetores;
- Gráficos de contornos;
- Visualização da geometria e da malha;
- Gráfico de superfície 2D e 3D;
- Manipulação de imagem.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve como realizou-se o projeto do aerogerador de baixa potência, e como isso levou às análises e resultados, ou seja, a modelagem e simulação da turbina eólica com a avaliação da esteira no *software* ANSYS 16 *academic*, a partir do campo de escoamento em um túnel de vento.

3.1 Etapas de execução para o presente estudo

O referente trabalho se concedeu em 3 passos em softwares diferentes, são estes:

1. Comparação de dois perfis aerodinâmicos voltados para aerogeradores de baixa potência, através do *software* XFLR5;
2. Realizou-se a modelagem e montagem do aerogerador escolhido de acordo com o perfil para a pá escolhida no XFLR5, tal modelagem foi executado no *software* comercial SolidWorks 2016;
3. Pós modelagem e simulação no SolidWorks 2016, realizou-se as simulações fluidodinâmica no código CFD Ansys Fluent 16, em uma área semelhante a um túnel de vento, além disso, variando o ângulo da pá para valores de ângulo de 2°, 5°, 10° e 20°.

3.2 *Software* XFLR5

De acordo com o manual do Xflr (2011) este software foi desenvolvido para fins de analisar projetos aerodinâmicos exclusivamente para projetos de planadores, entretanto, o objetivo principal a priori do XFLR5 é garantir uma boa interface para o Xfoil e traduzir a fonte do código FORTRAN para a linguagem C/C+.

Neste *software* foram efetuadas simulações viscosas para selecionar o perfil ideal para a aplicação em aerogeradores de baixa potência, de acordo com os parâmetros estudados até aqui.

Para selecionar o perfil ideal considerou-se alguns parâmetros:

1. Variação do coeficiente de arrasto de acordo com o ângulo de ataque, este variando de 0° a 9° ;
2. Maior valor de CL/CD (coeficiente de desempenho aerodinâmico) variando com ângulos de ataque de 0° a 9° , uma vez que, o desempenho aerodinâmico aumenta coeficiente de potência do aerogerador, já que, este diminui o raio da turbina.
3. Simulou-se no XFLR dois perfis e seus valores foram comparados, os perfis foram o E387 e o S8036, estes perfis foram sugeridos de acordo com O. Carantoña (2009) a qual possui uma lista de perfis aerodinâmicos com potencial de aplicação para aerogeradores de baixa potência.

Realizou-se análises nos perfis E387 e S8036 para número de Reynolds maior que 500.000, já que, a partir desse valor ocorre a transição da camada limite do regime laminar para o turbulento, variando o ângulo de ataque de 0° a 9° como mencionando anteriormente, a baixo estão os dois perfis estudados, são estes:

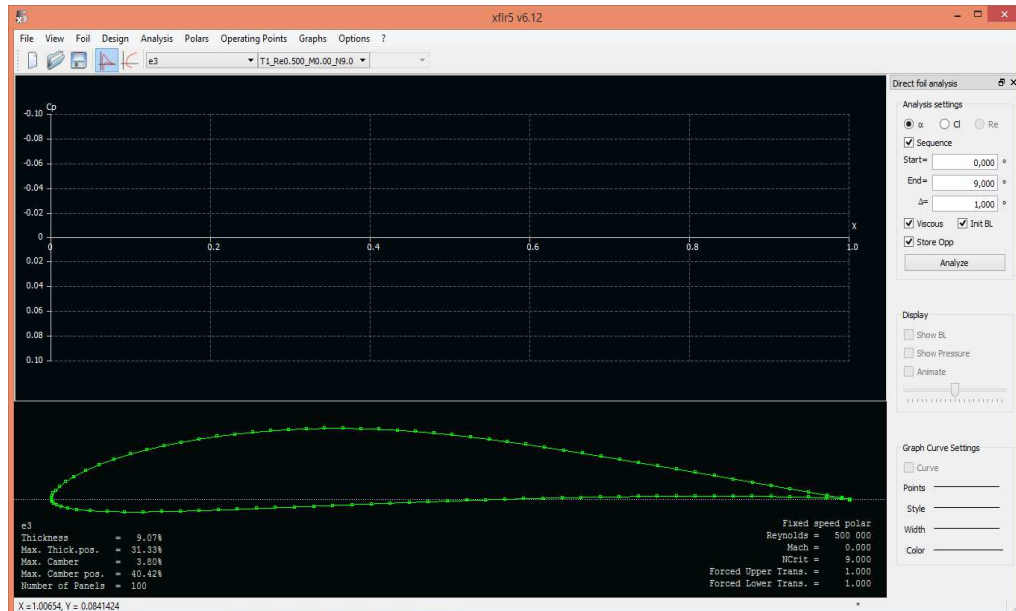


Figura 3.1. Perfil E387, software XFLR5

Fonte: Autoria própria, 2018.

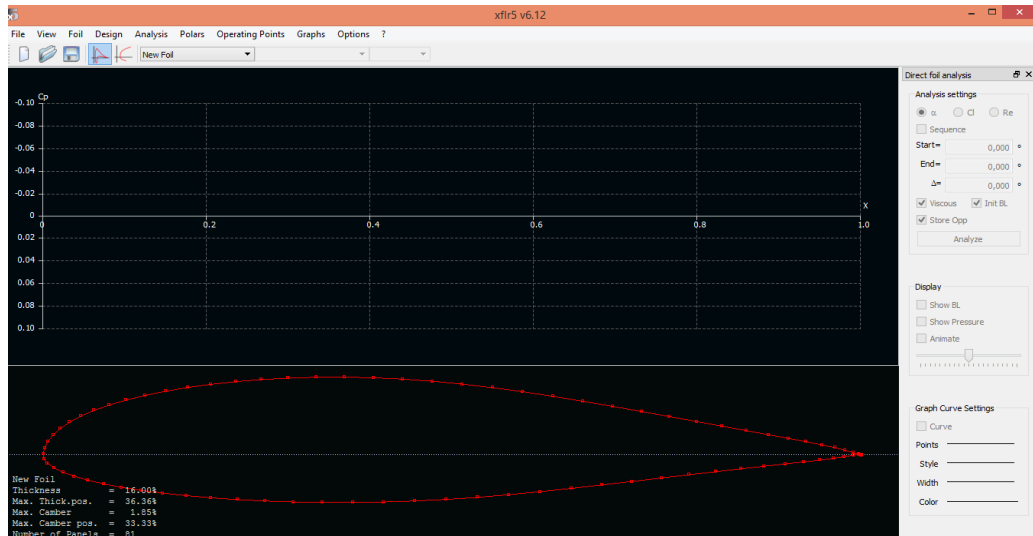


Figura 3.2. Perfil S8036, software XFLR5

Fonte: Autoria própria, 2018.

Adquiriu-se os valores do coeficiente de arrasto (C_d), e coeficiente de desempenho aerodinâmico (C_l/C_d), para os dois perfis estudados em questão, conforme a imagem:

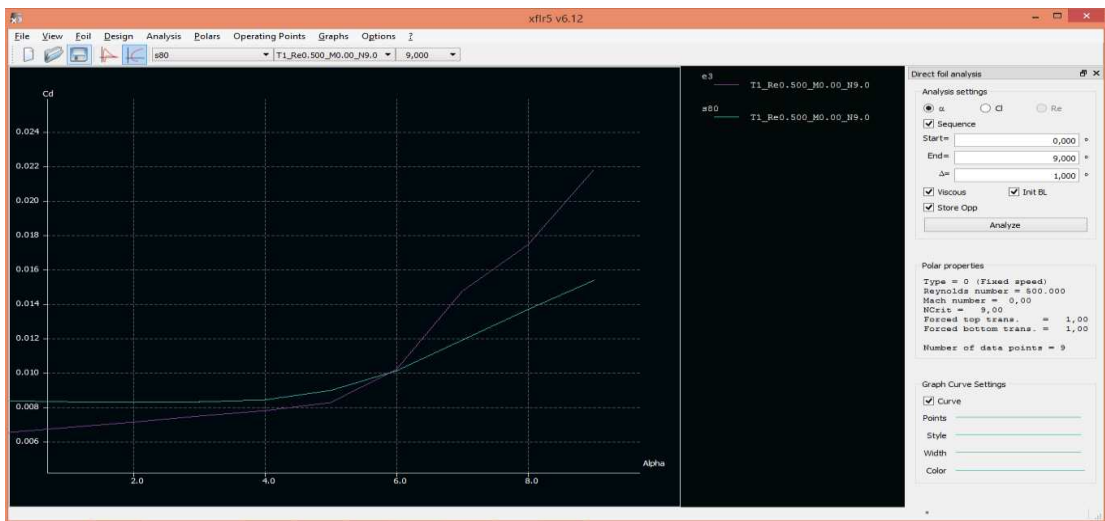


Figura 3.3. Comparação dos perfis E387 e S8036, e seus valores de arrasto

Fonte: Autoria própria, 2018.

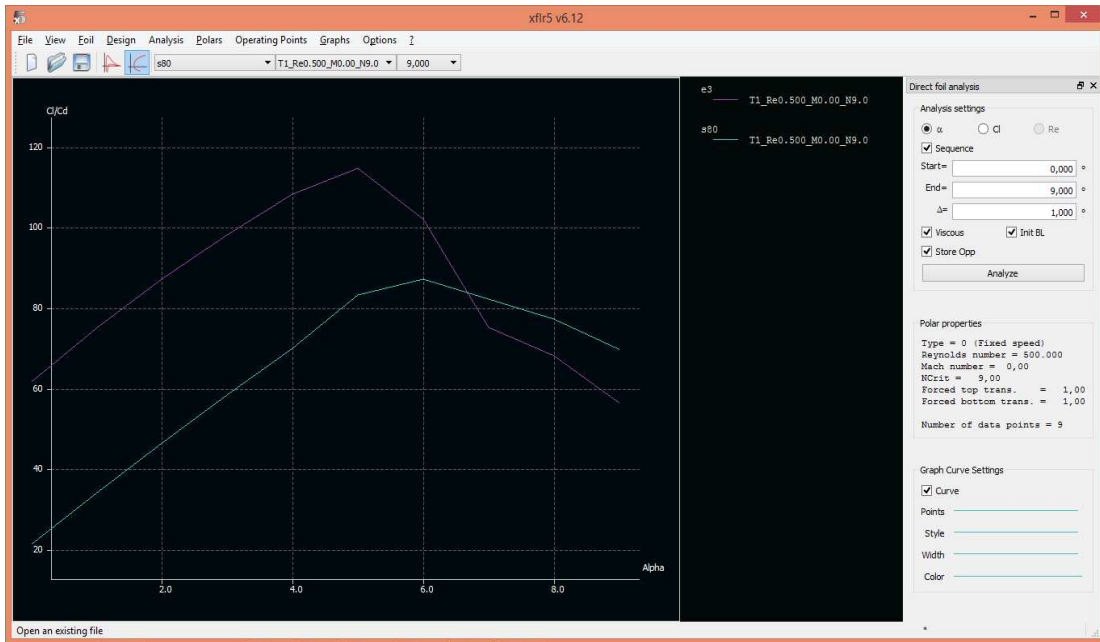


Figura 3.4. Comparação dos perfis E387 e S8036, e seus valores de Cl/Cd

Fonte: Autoria própria, 2018.

Então conforme os gráficos das figuras 31 e 32, pode-se selecionar o perfil E387, como o de maior potencial de aplicação em aerogeradores de baixa potência, ou seja, turbinas eólicas as quais se exige coeficientes de potências suficiente para uso residencial ou alocar em lugares que não demandem grande quantidade de energia.

3.3 SOLIDWORKS 2016 - Modelagem e montagem da turbina

Conforme já mencionado, selecionou-se o perfil da família Epler, o E387 a qual apresentou maiores de arrasto e coeficiente de desempenho aerodinâmico, uma vez que, quanto maior for esses valores, maior será a influência desses valores na potência útil instalada no aerogerador.

Dividiu-se a turbina em 5 partes, são estas:

Pá	Rotor
Base	Narcele
Torre 1 e 2	Eixo do rotor

O primeiro componente a ser tratado foi a pá da turbina, visto que, este componente foi o foco das análises dos vórtices e esteiras formados através da iteração do fluido para com o rotor por completo (Rotor e pás).

Primeiramente, utilizou-se a ferramenta imagem de esboço, disponível na janela de ferramentas do referido *software*, ou seja, em Ferramenta>>Ferramentas de esboço>> Imagem de esboço, conforme a figura abaixo:

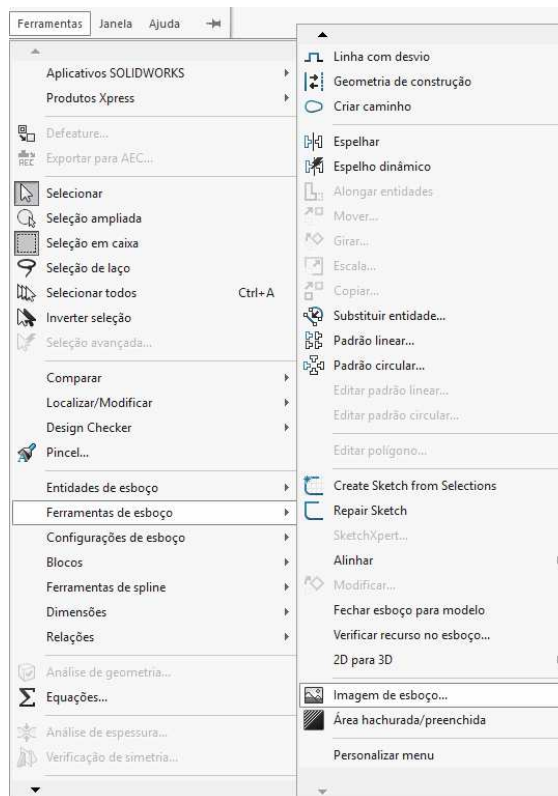


Figura 3.5. Ferramenta Imagem de esboço

Fonte: Autoria própria, 2018.

Com essa ferramenta, foi possível projetar o perfil aerodinâmico da pá, pós esse processo, gerou-se a pá com auxílio das ferramentas RESSALTO/BASE VARRIDO concomitantemente

com a ferramenta RESSALTO/BASE EXTRUDADO, ambas disponíveis na janela recursos no ambiente de peças do SolidWorks além de outras ferramentas de esboço.

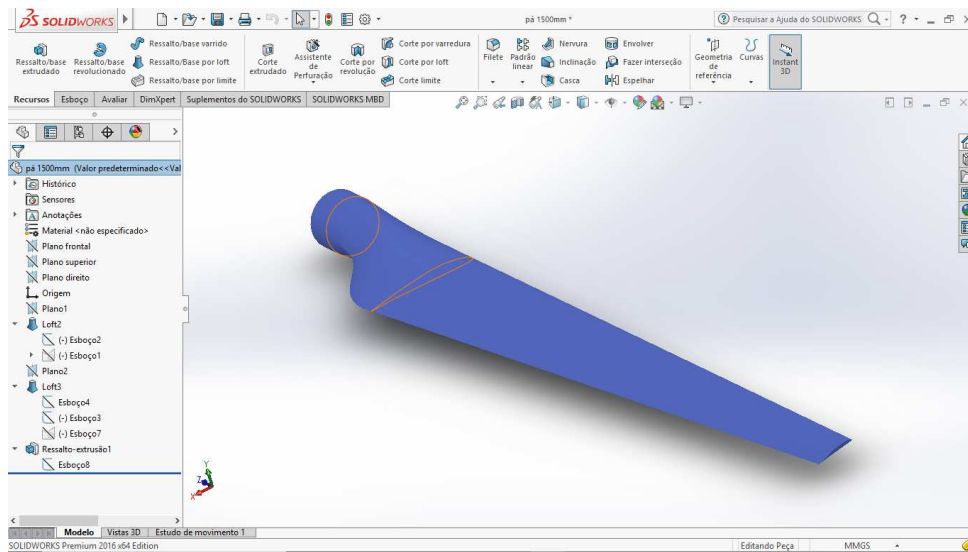


Figura 3.6. Pá montada

Fonte: Autoria própria, 2018.

Essa pá possui envergadura de 1,5m com corda máxima de perfil de 300 mm e fator de escala de 0,36 com um ângulo de torção de -10° . E a partir dessa ferramenta, dimensionar entidades, foi possível projetar a pá com as cordas da seção da pá, segue a imagem desse comando.

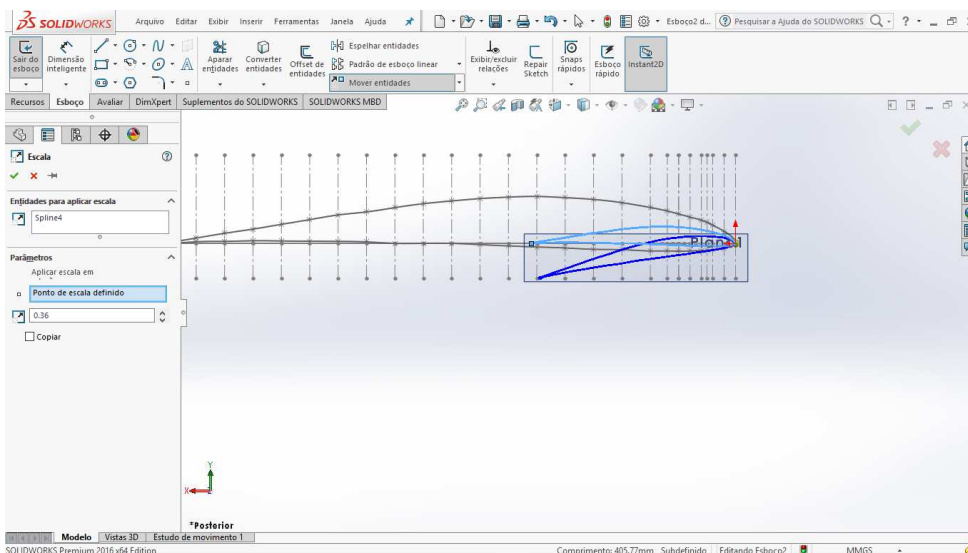


Figura 3.7. Comando dimensionar entidades

Fonte: Autoria própria, 2018.

Pós esse processo, modelou-se a base da turbina eólica, conforme abaixo.

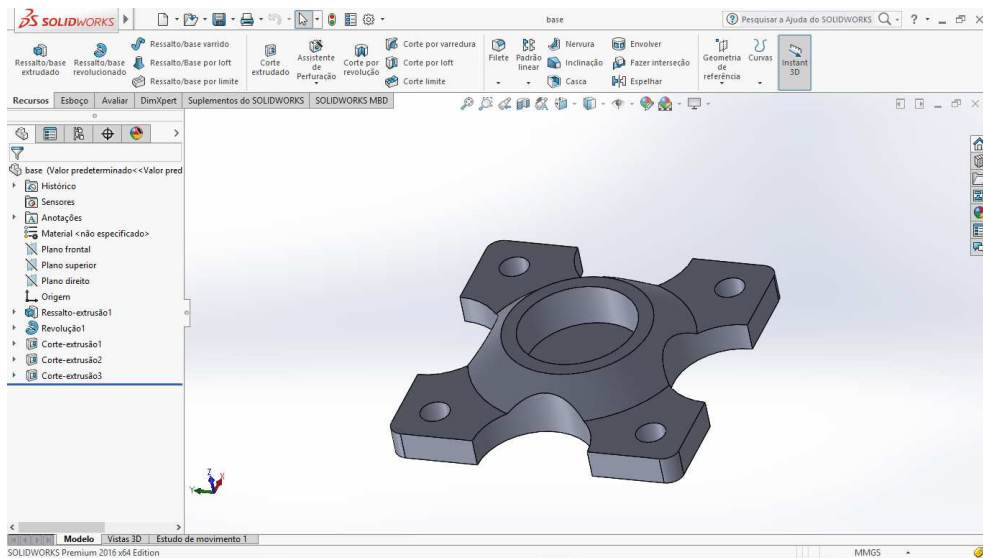


Figura 3.8. Base montada

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para modelar a base, utilizou-se várias ferramentas de modelagem para esse componente pode-se dizer que o principal foi o RESSALTO/BASE REVOLUCIONADO disponível na janela de recursos no ambiente de peças do SolidWorks, com essa ferramenta é possível a partir de um esboço gerar um sólido com curvas através de revolução em torno de uma linha tomada como referência, além disso, é possível definir a direção de revolução e o ângulo da revolução, como mostra a figura:

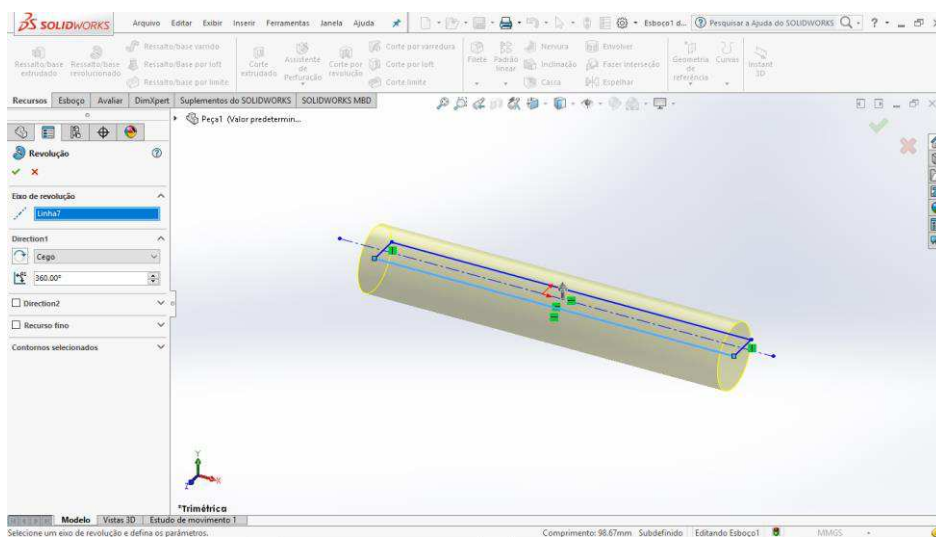


Figura 3.9. Ferramenta Revolução

Fonte: Autoria própria, 2018.

Posteriormente modelou-se a torre da turbina, esta foi dividida em 2 partes que quando juntas com a base somam 5 metros da base até o rotor.

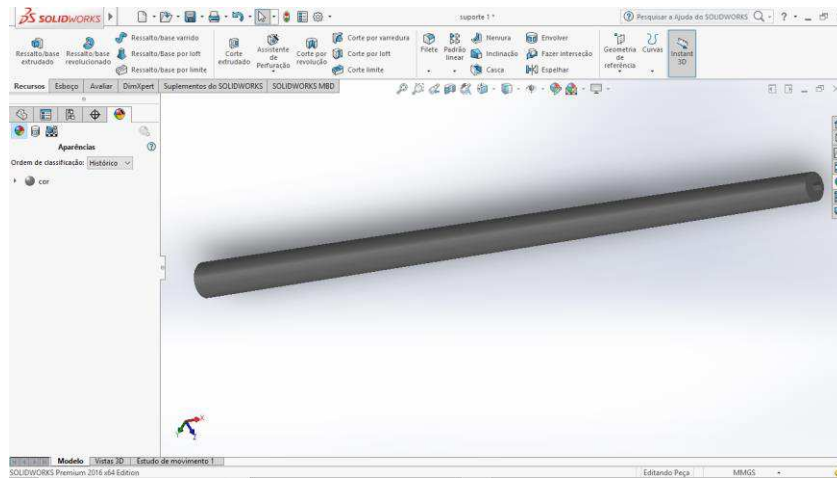


Figura 3.10. Suporte 1

Fonte: Autoria própria, 2018.

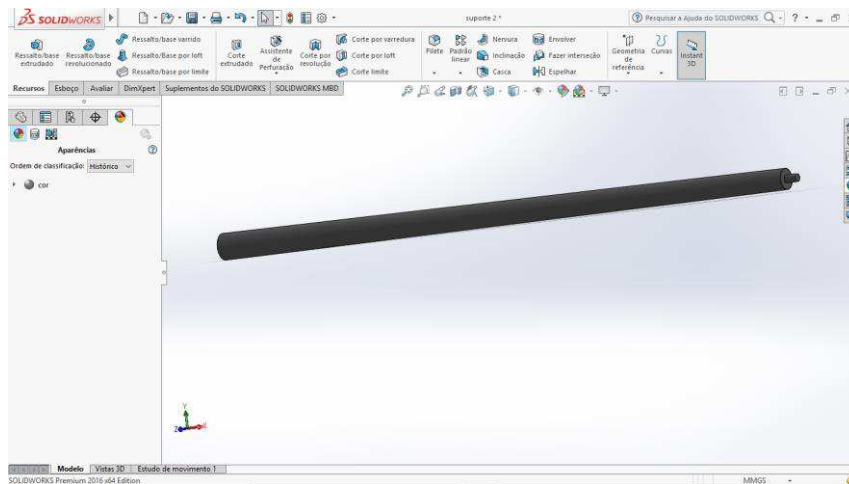


Figura 3.11. Suporte 2

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para modelar a torre a qual foi dividida em 2 partes, utilizou-se basicamente as mesmas ferramentas, como: RESSALTO/BASE EXTRUDADO e CORTE EXTRUDADO, conforme a imagem abaixo:

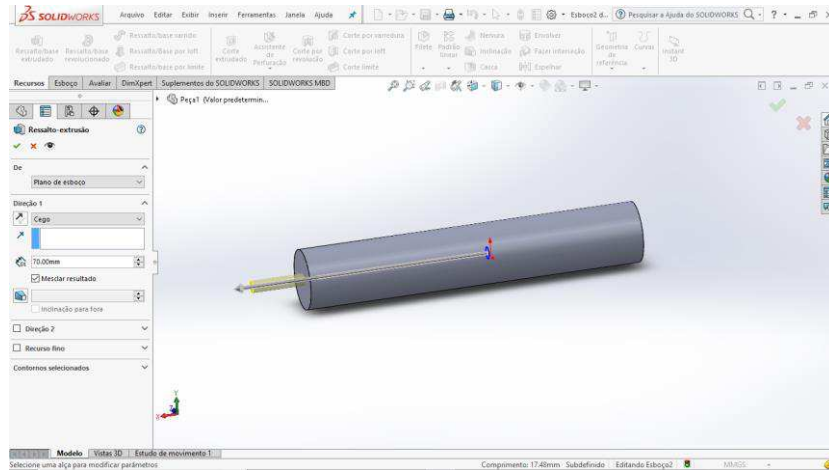


Figura 3.12. Ferramenta Ressalto/Base extrudado

Fonte: Autoria própria, 2018.

Posteriormente, modelou-se o rotor, nesta modelagem, foi utilizada novamente as ferramentas CORTE EXTRUDADO e RESSALTO/BASE EXTRUDADO, além desses, utilizou-se uma ferramenta de suma importância o PADRAO CIRCULAR, esta ferramenta permite fazer furos idênticos ou extrusões em ângulos determinados, conforme o referido trabalho a qual utilizou padrão circular gerando 3 furos com distancias de 120°, de acordo com a figura 3.13.

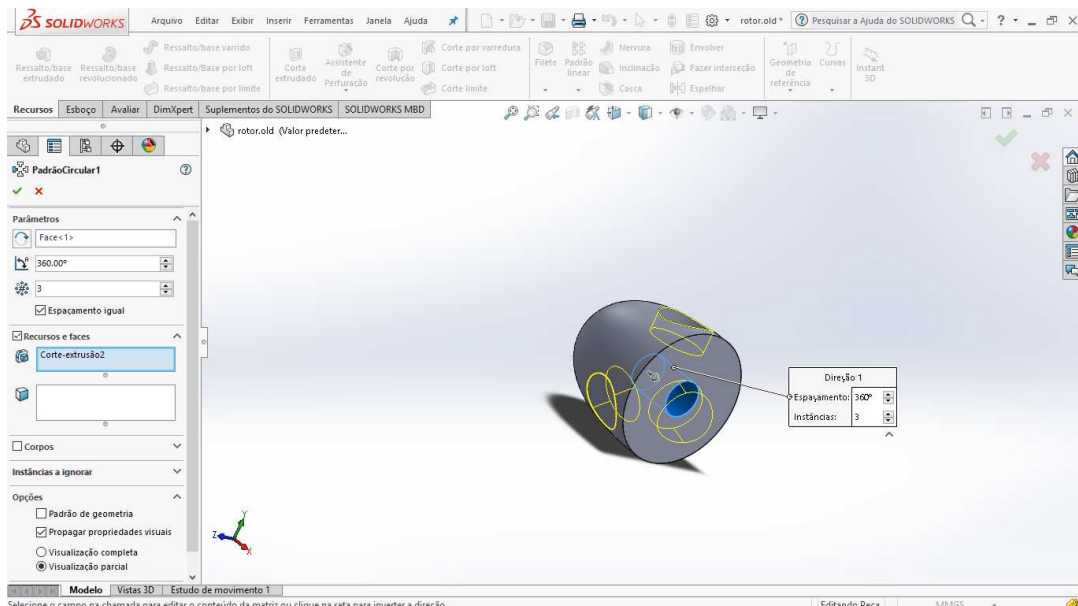


Figura 3.13. Ferramenta Padrão circular

Fonte: Autoria própria, 2018.

Posteriormente, foi modelado a narcele, este componente é fixo junto com a torre onde passa um eixo junto ao rotor, é neste que há a conversão da energia cinética dos ventos em elétrica como já mencionado, esse componente pode ser visto na figura abaixo:

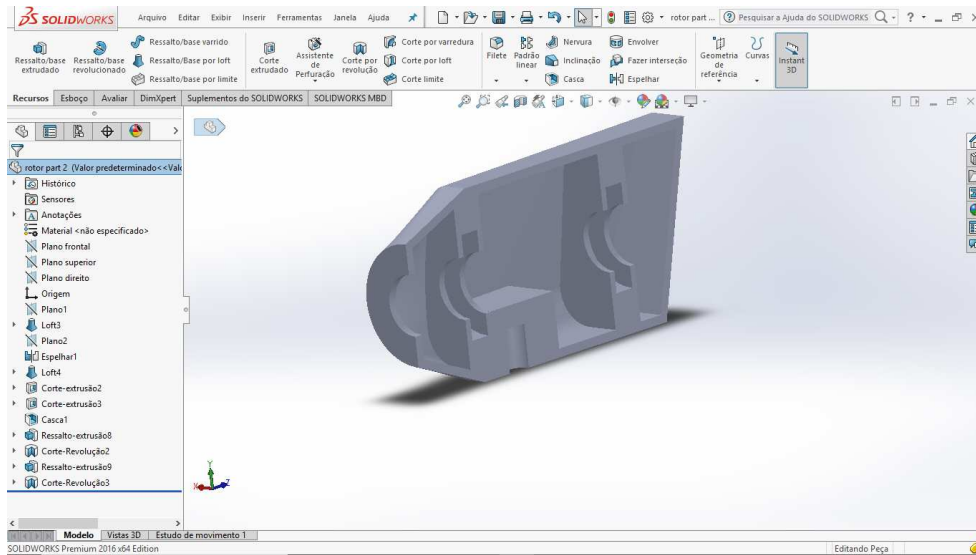


Figura 3.14. Narcele

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para modelagem desse componente, utilizamos as ferramentas CORTE EXTRUDADO, RESSALTO/BASE EXTRUDADO além do RESSALTO BASE por *LOFT*. Esta peça tem altura total de 220mm com 450 de comprimento, e foi dado um *extrude* de 300mm.

Então, pós o processo de modelagem dos componentes, executou-se a construção da turbina eólica na plataforma montagem do SolidWorks, a turbina tem tamanho total de 6,7 m da base à ponta da pá, conforme a figura desta 3.15.

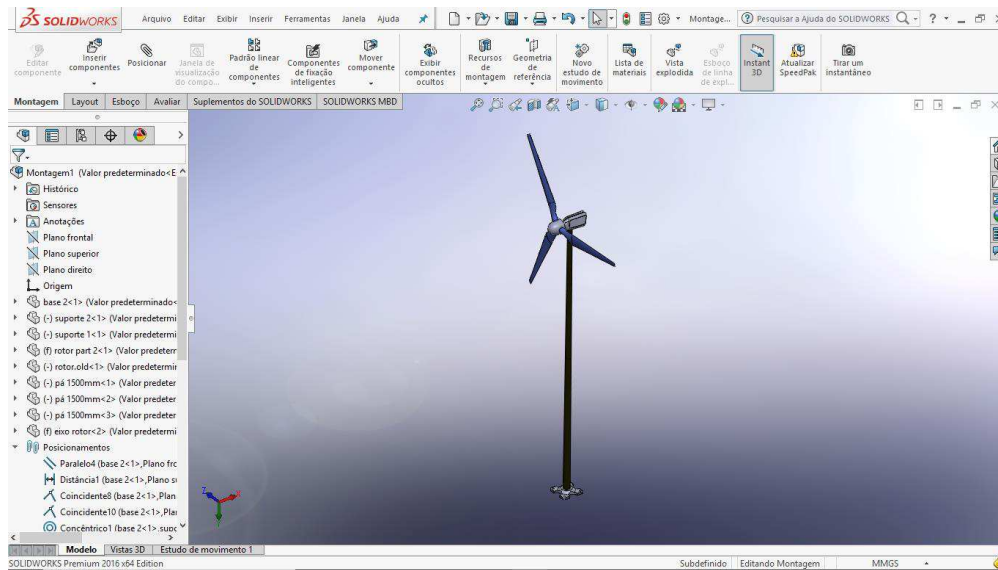


Figura 3.15. Turbina eólica montada

Fonte: Autoria própria, 2018.

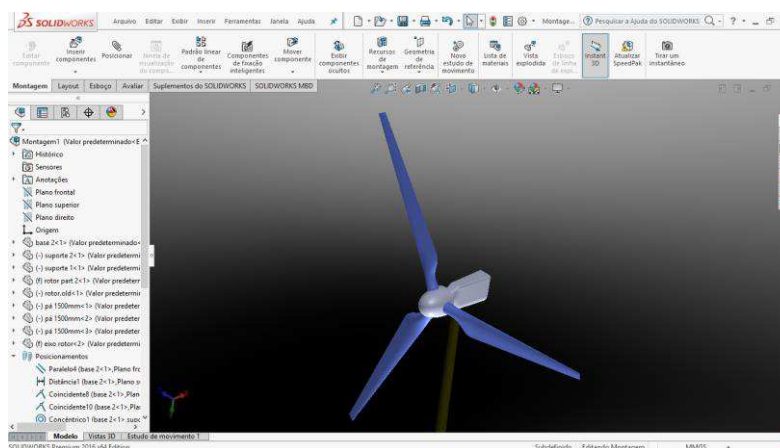


Figura 3.16. Rotor da turbina para estudo e análise no ANSYS 16

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para o desenho e montagem das peças da turbina a qual foi apresentado no referente trabalho, tomou-se como referência o trabalho apresentado de acordo com o projeto de Callinan, disponível na referência do trabalho.

3.4 Simulação fluidodinâmica – ANSYS FLUENT academic.

A terceira e última etapa como mencionado anteriormente foi simular a turbina eólica na análise de sistemas do *workbench* 16, adotando o Fluent do *software* ANSYS 2016 *academic*.

Para simular a turbina eólica foi necessário trabalhar a mesma em 3 etapas, distintas, são essas:

- *geometry* - Tratamento da geometria e do domínio computacional.
- *Mesh* - Tratamento da malha para a geometria e domínio.
- *Setup* – para tratar as condições de contornos, além dos algoritmos para discretização da malha

3.4.1 Geometry

Inicialmente, foi importado a geometria do software SolidWorks, na extensão *parasolid* (*x_t*), uma vez que, essa extensão o ANSYS abre a geometria sem nenhum problema, apesar de ter outras extensões as quais poderiam ser usadas.

Após a importação da geometria de análise, ou seja, o conjunto rotor para as análises subsequentes, foi criado um domínio computacional através do comando *enclosure*, comando a qual permite gerar domínios 3D em forma de cubos, esferas ou cilindros, as dimensões deste são dadas na figura 44, a seguir:

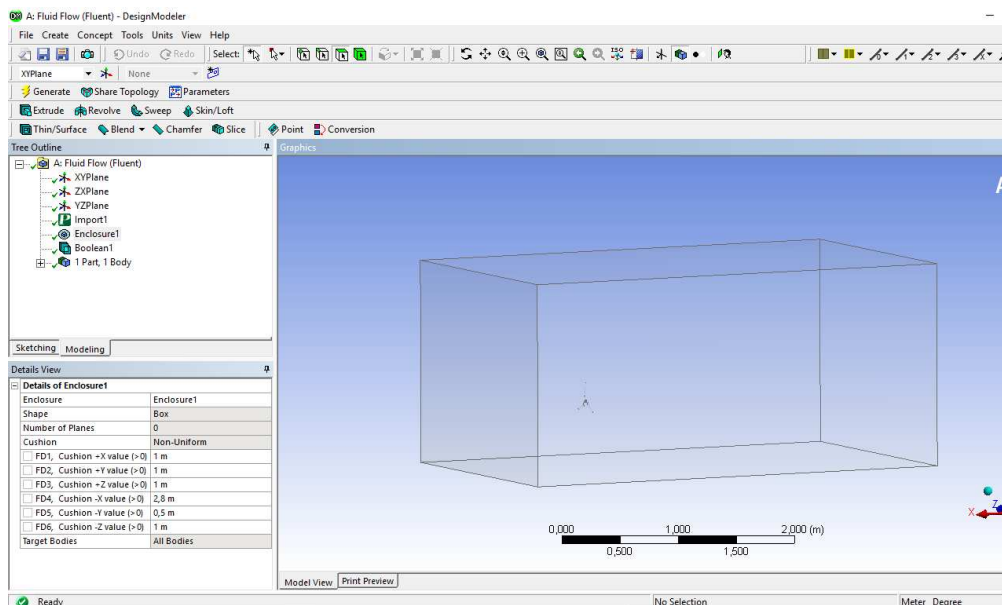


Figura 3.17. Domínio computacional

Fonte: Autoria própria, 2018.

Posteriormente, a geometria foi separada do domínio computacional para que desta forma o escoamento do fluido possa transcorrer através das pás do rotor, o comando utilizado foi o *Boolean*, este comando permite juntar ou separar corpos sólidos.

3.4.2 mesh

Uma das partes mais importantes para uma análise CFD, é a geração da malha, uma vez, uma malha bem refinada gera resultados excelentes e quando tem um refinamento bom, a convergência da malha pode acontecer em poucos minutos, como no referente caso, onde as malhas foram convergidas no número de iterações de 250 a 300.

Na geração das malhas se utilizou o comando *face meshing* comando a qual é utilizado para gerar malha em faces localizadas, como no referente estudo onde utilizou-se nas faces das pás, com células quadriláteras, uma vez que, esse tipo de célula não deformou a ponta da pá, esse comando pode ser visto conforme a imagem abaixo:

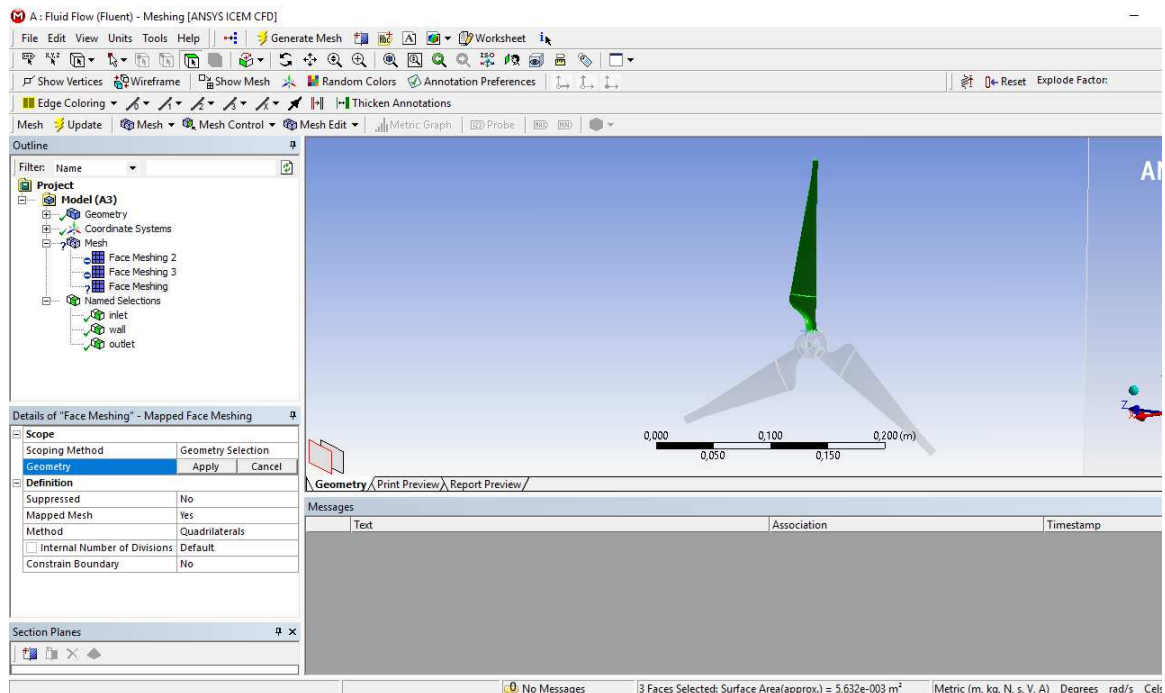


Figura 3.18. Comando *face meshing*

Fonte: Autoria própria, 2018.

Além disso, foi aplicado os nomes das faces, como *inlet*, *wall* e *outlet*, que são entrada, paredes e saída respectivamente. As malhas dispõem de células quadriláteras e triangulares por ser uma malha híbrida e suas características pode ser vista na imagem a baixo.

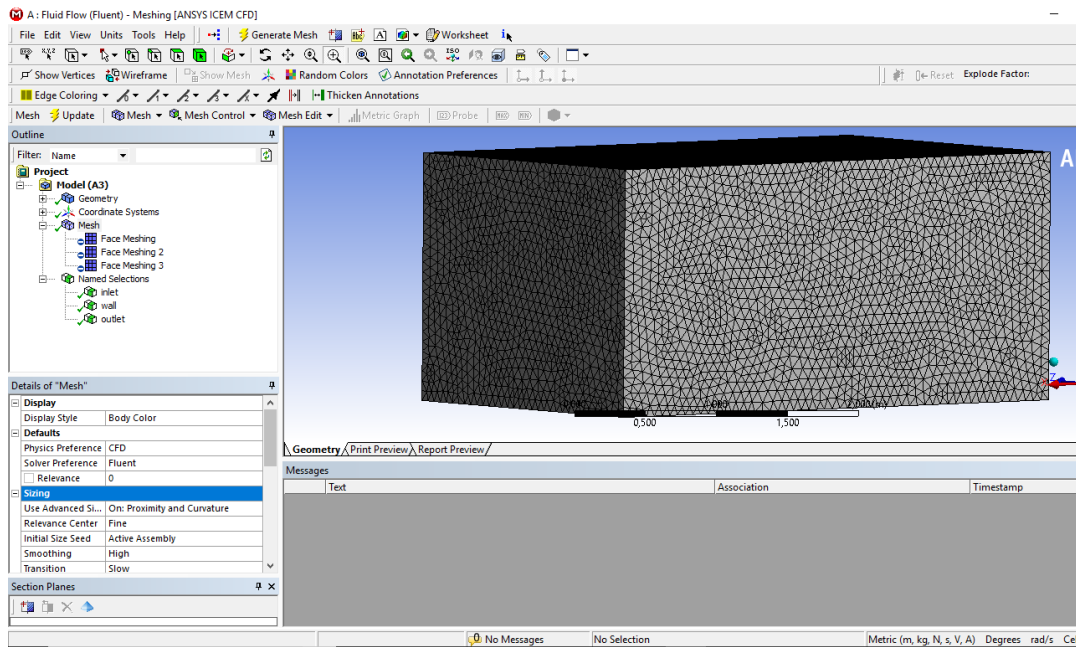


Figura 3.19. Malha e suas características

Fonte: Autoria própria, 2018.

3.4.3 Setup

A última etapa para a simulação foi feita no *Setup*, nesse estágio da simulação utiliza-se as condições de contornos e algoritmos para a discretização da solução, algoritmos as quais já foram abordados anteriormente. O primeiro algoritmo a ser definido foi o *pressure based*, para resolver as equações de governo sequencialmente, conforme já dito na seção 2.9.3.4, conforme a figura a seguir:

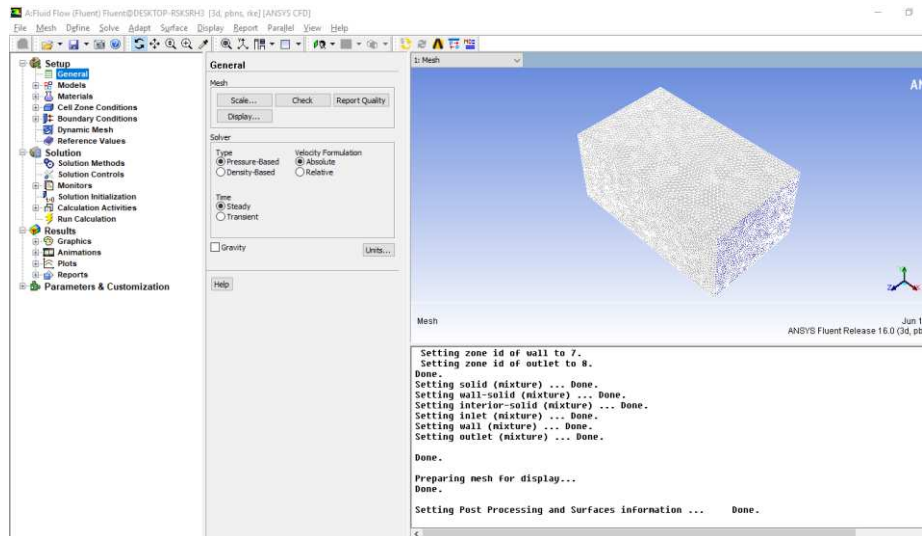


Figura 3.20. Solve “Pressure based”

Fonte: Autoria própria, 2018.

Posteriormente foi definido o tipo de equação da turbulência para fazer a discretização da malha, ou seja, a modelagem da turbulência, foi utilizado o padrão $k-\varepsilon$ (*k-epsilon - realizable*). Além disso, foi utilizado o ar como fluido, suas características são de Densidade de 1.225 kg/m^3 com viscosidade de $1.7884 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^{-5}$.

A condição de contornos foi de parede, com uma velocidade de entrada (6 m/s) conforme a velocidade média de vento anual de São Luís, segundo INMET, saída de pressão igual a 0 e paredes com condição de contorno *wall* semelhante há um túnel de vento, conforme o objetivo referente trabalho, segue a imagem:

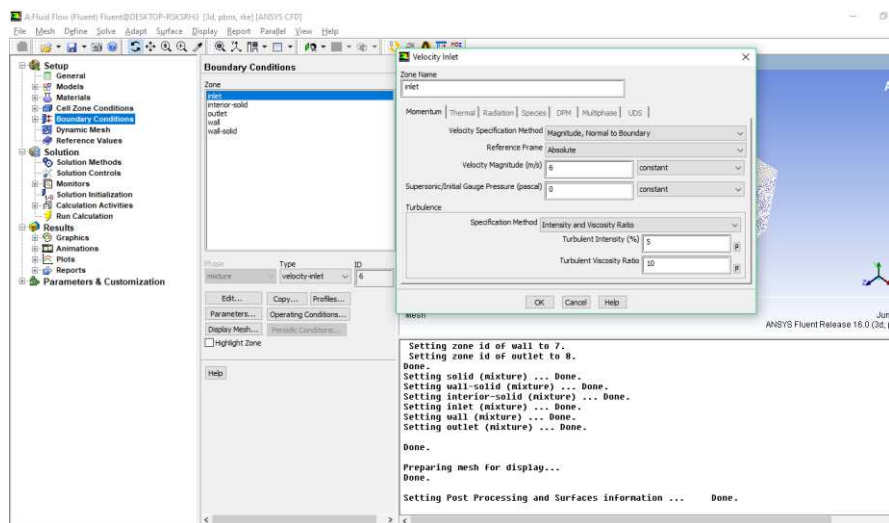


Figura 3.21. Condições de contorno

Fonte: Autoria própria, 2018.

Posteriormente, definiu-se o critério de convergência da malha para 1×10^{-3} , e uma das partes mais importante, o método de solução para o código, este pode ser visto a seguir:

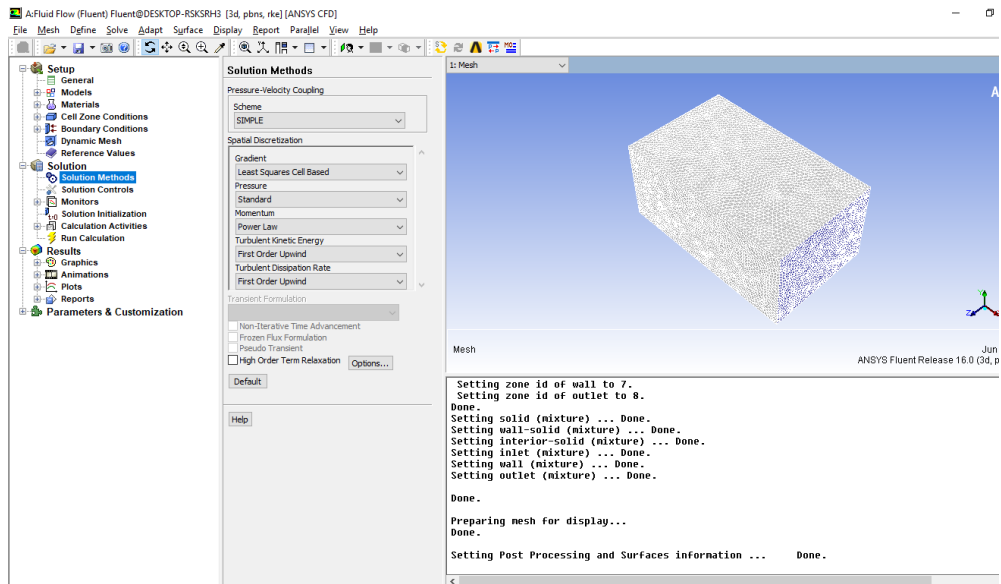


Figura 3.22. Método de solução

Fonte: Autoria própria, 2018.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análises dos vórtices: ângulos de 2°, 5°, 10° e 20°.

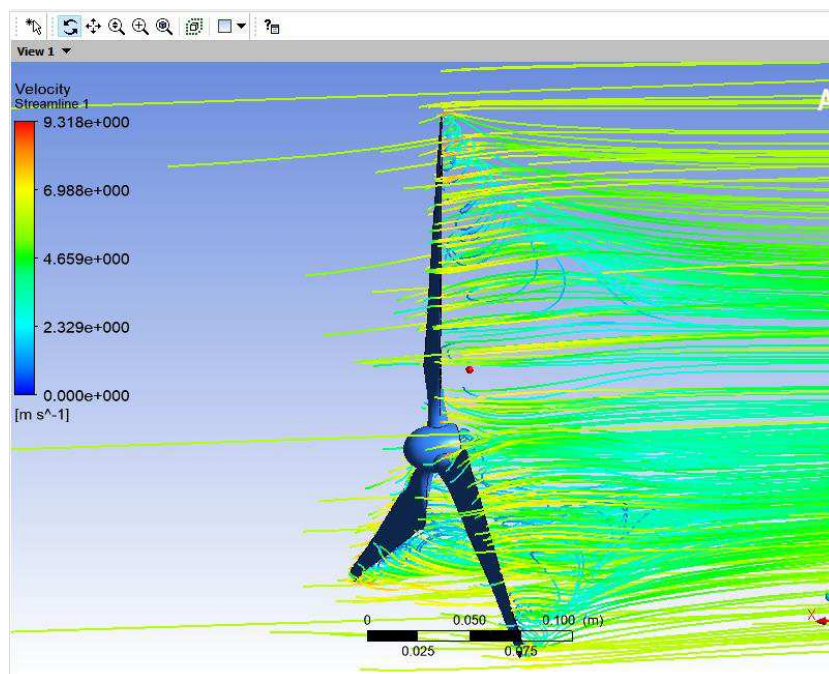


Figura 4.1. Formação dos vórtices, ângulo de 2°

Fonte: Autoria própria, 2018.

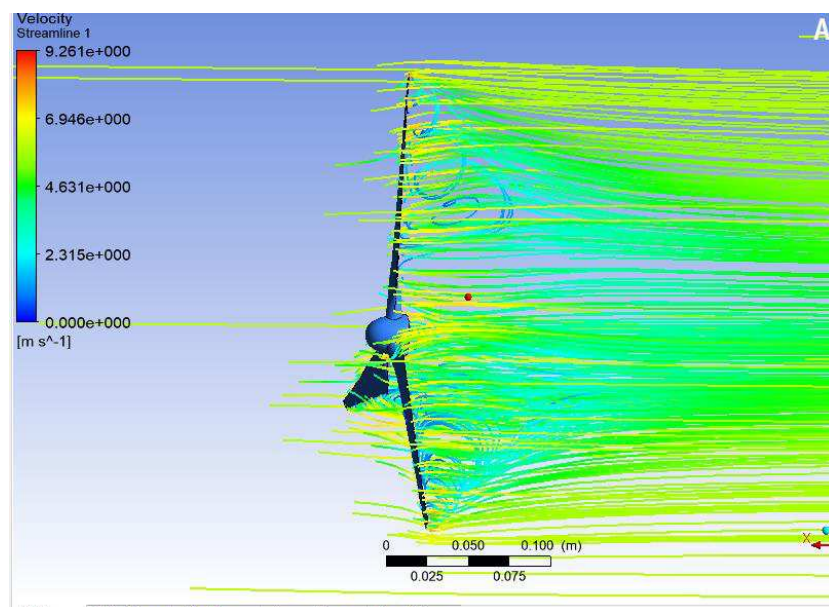


Figura 4.2. Formação dos vórtices, ângulo de 5°

Fonte: Autoria própria, 2018.

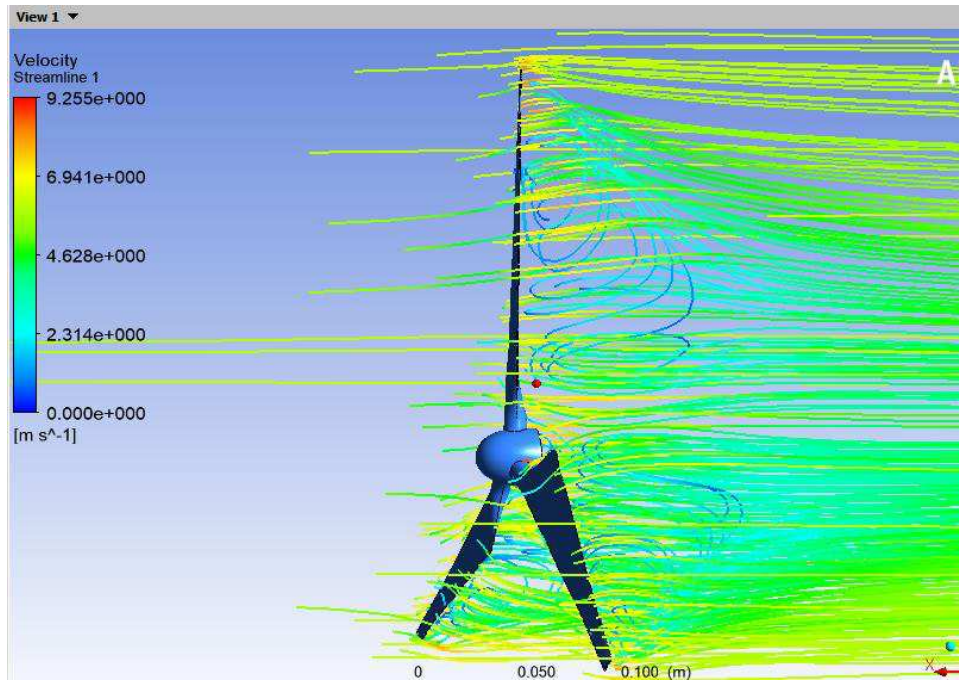


Figura 4.3. Formação dos vórtices, ângulo de 10°

Fonte: Autoria própria, 2018.

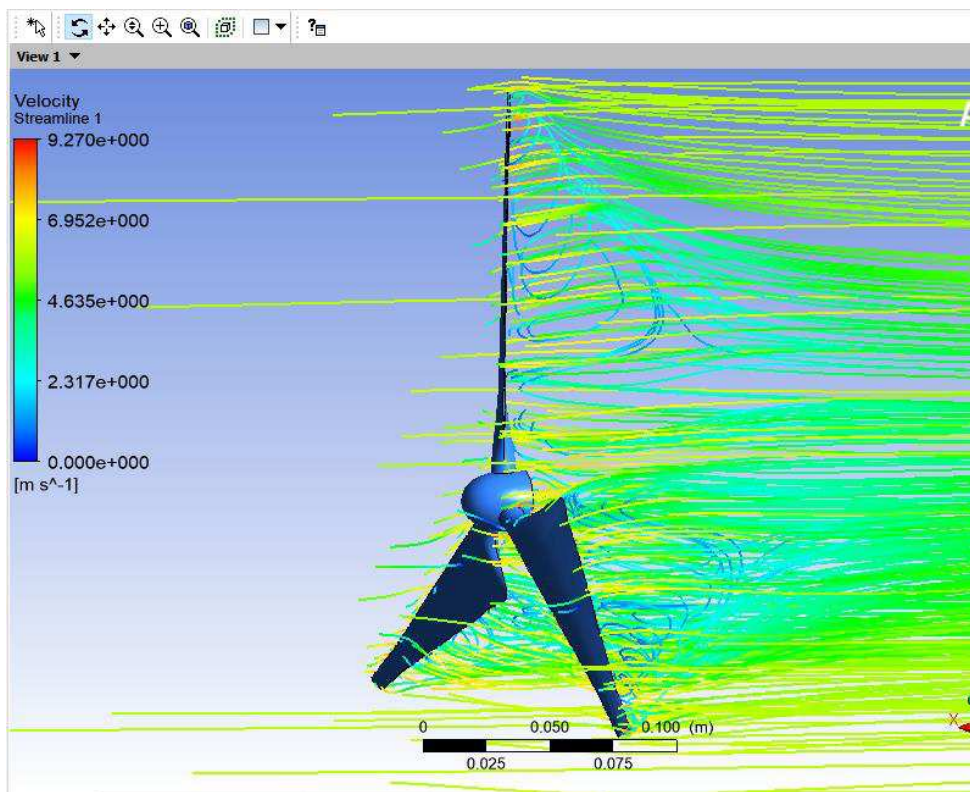


Figura 4.4. Formação dos vórtices, ângulo de 20°

Fonte: Autoria própria, 2018.

Ao se tratar das perdas de potência na ponta da pá ocasionada pela geração dos vórtices nesse local as quais tendem a migrar para a raiz das pás, ou o efeito *downwash*, a lâmina com ângulo de 2° apresentou um maior número de vórtices na ponta da pá e estes se prolonga até metade da pá, no entanto, para o mesmo efeito a lâmina com o ângulo de 5° apresentou menores números de vórtices formados tanto na ponta quanto no centro da geometria, enquanto que as lâminas com 10° e 20° gerou um maior número de vórtices longos no centro da pá.

4.2 Análises da esteira na secção das pás: ângulos de 2°, 5°, 10° e 20°.

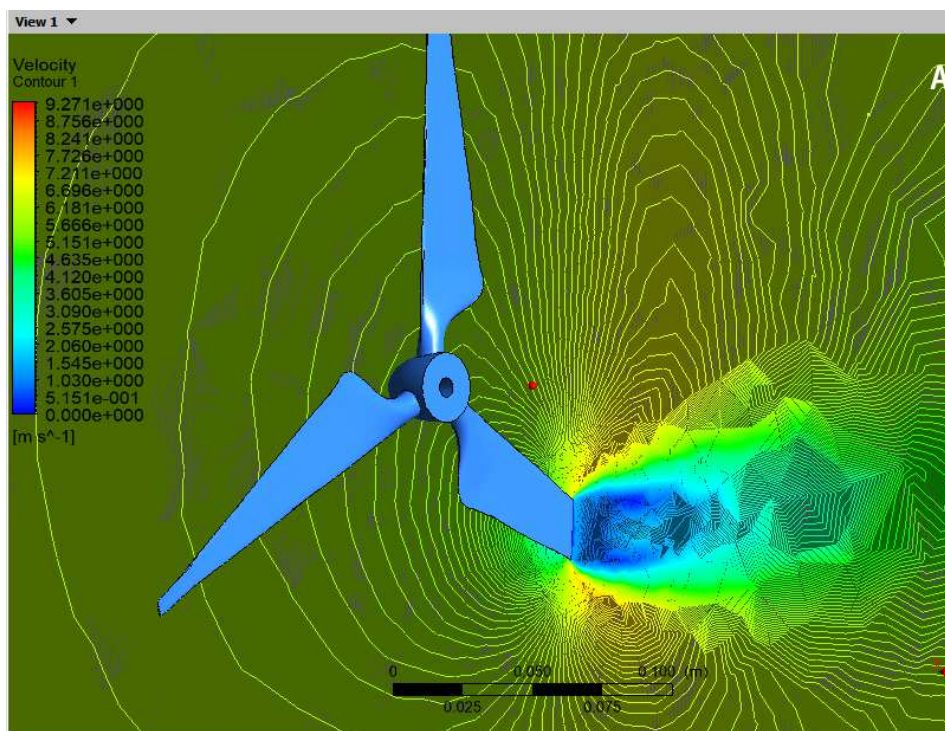


Figura 4.5. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 2°

Fonte: Autoria própria, 2018.

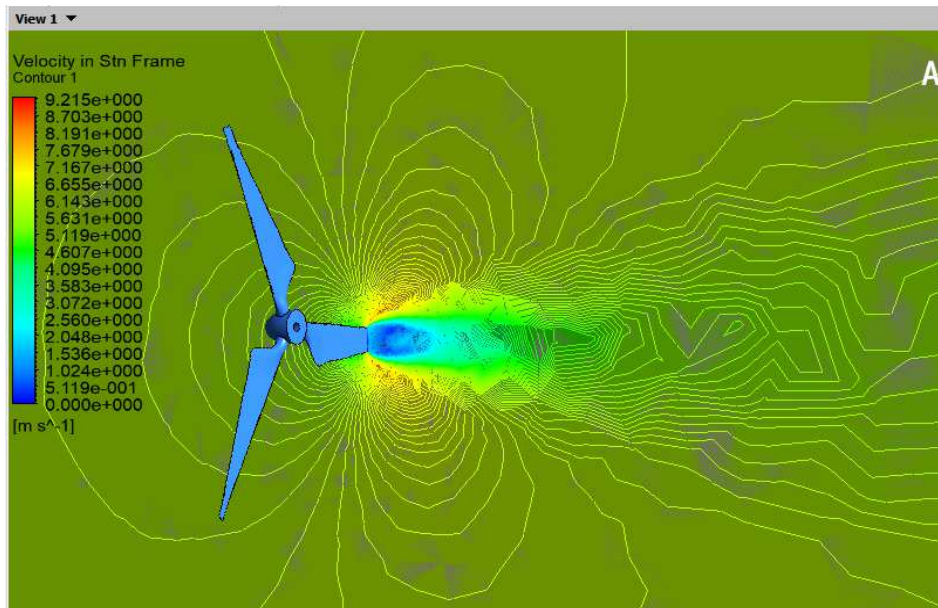


Figura 4.6. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 5°

Fonte: Autorial própria, 2018.

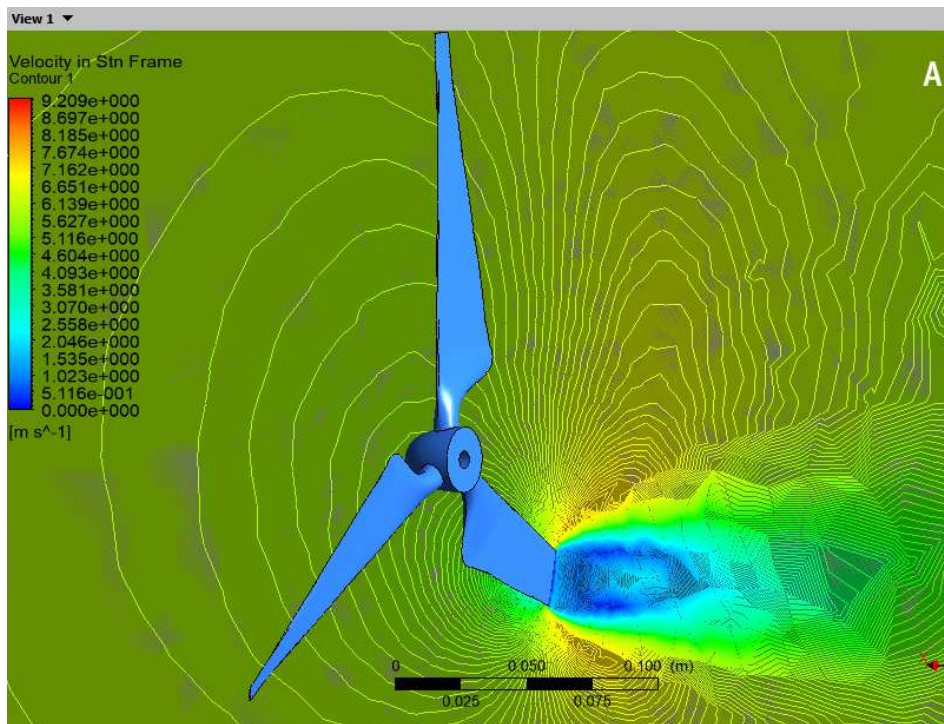


Figura 4.7. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 10°

Fonte: Autorial própria, 2018.

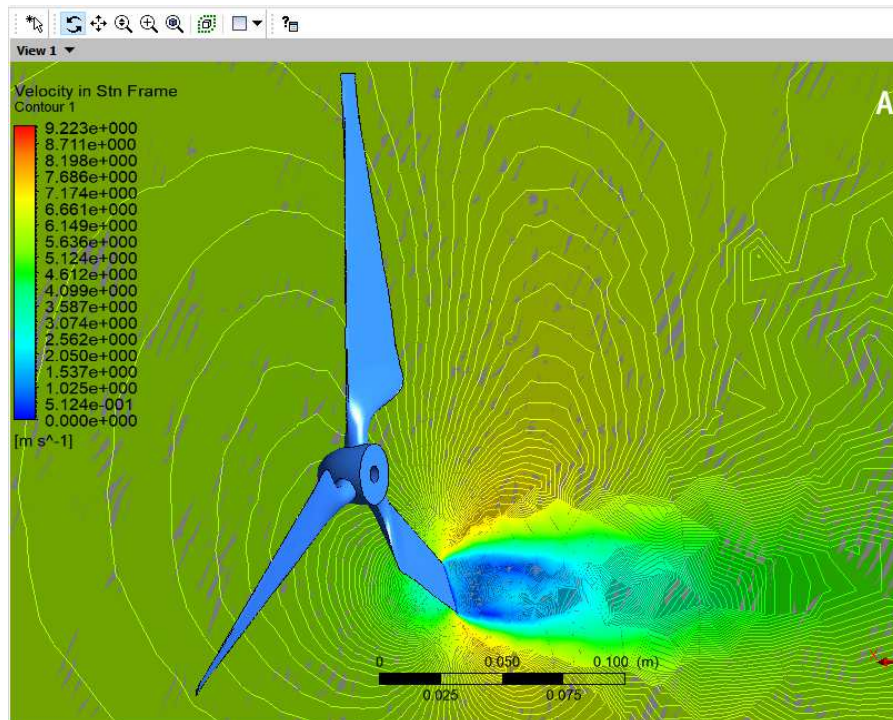


Figura 4.8. Formação da esteira na seção da pá, ângulo de 20°

Fonte: Autoria própria, 2018.

Com relação a esteira formada na seção das pás, o ângulo de 5° apresentou vórtices as quais se descolaram uns dos outros de maneira mais rápida, enquanto que os ângulos de 2°, 10° e 20° apresentaram uma esteira que demorou mais tempo para se descolar umas das outras.

4.3 Análises das esteiras: ângulos de 2°, 5°, 10° e 20°.

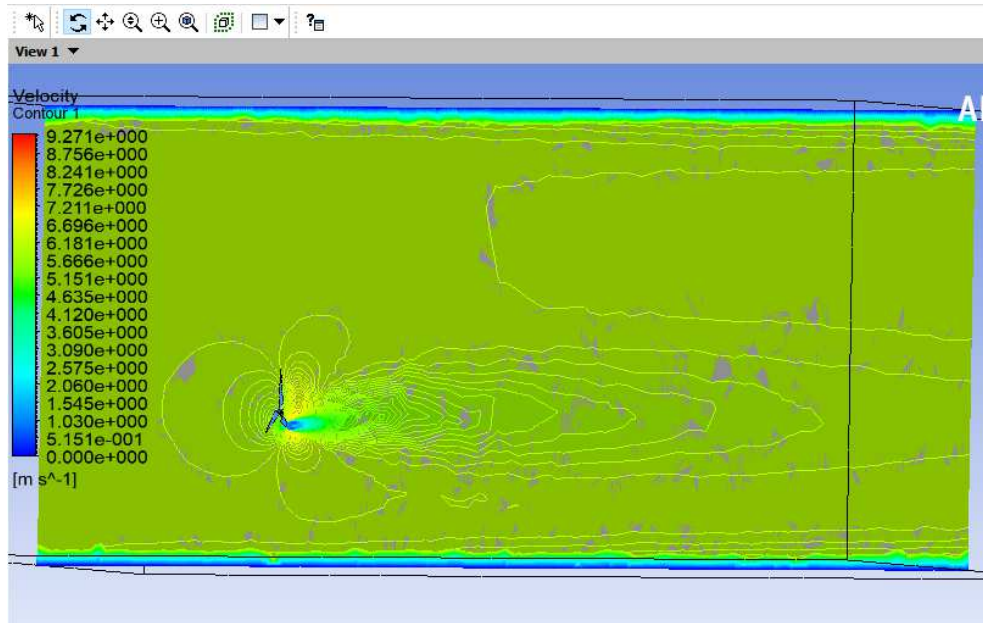


Figura 4.9. Prolongamento da esteira, ângulo de 2°

Fonte: Autoria própria, 2018.

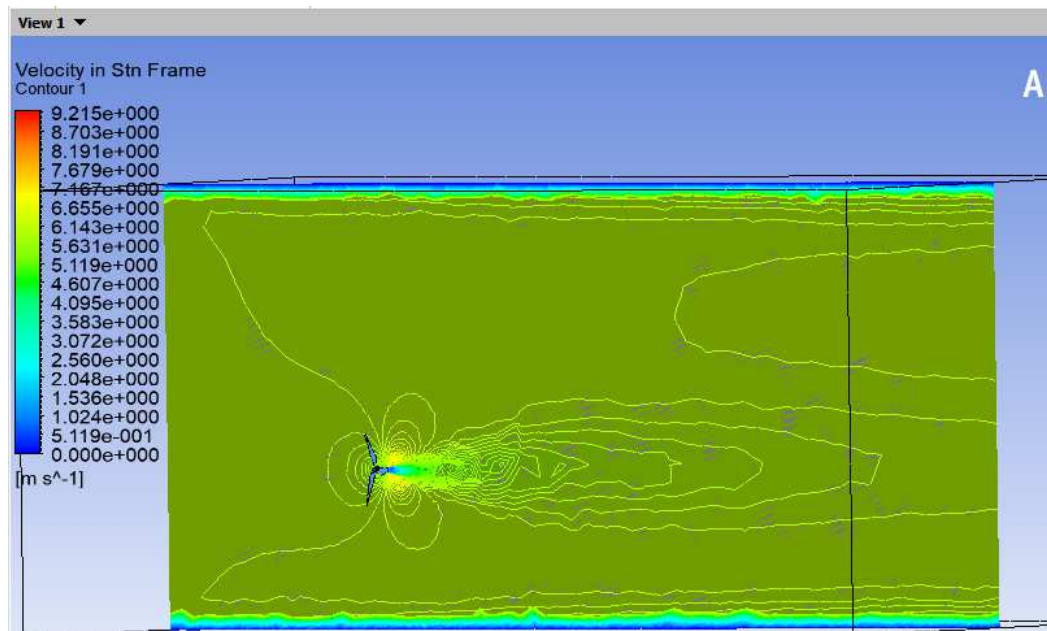


Figura 4.10. Prolongamento da esteira, ângulo de 5°

Fonte: Autoria própria, 2018.

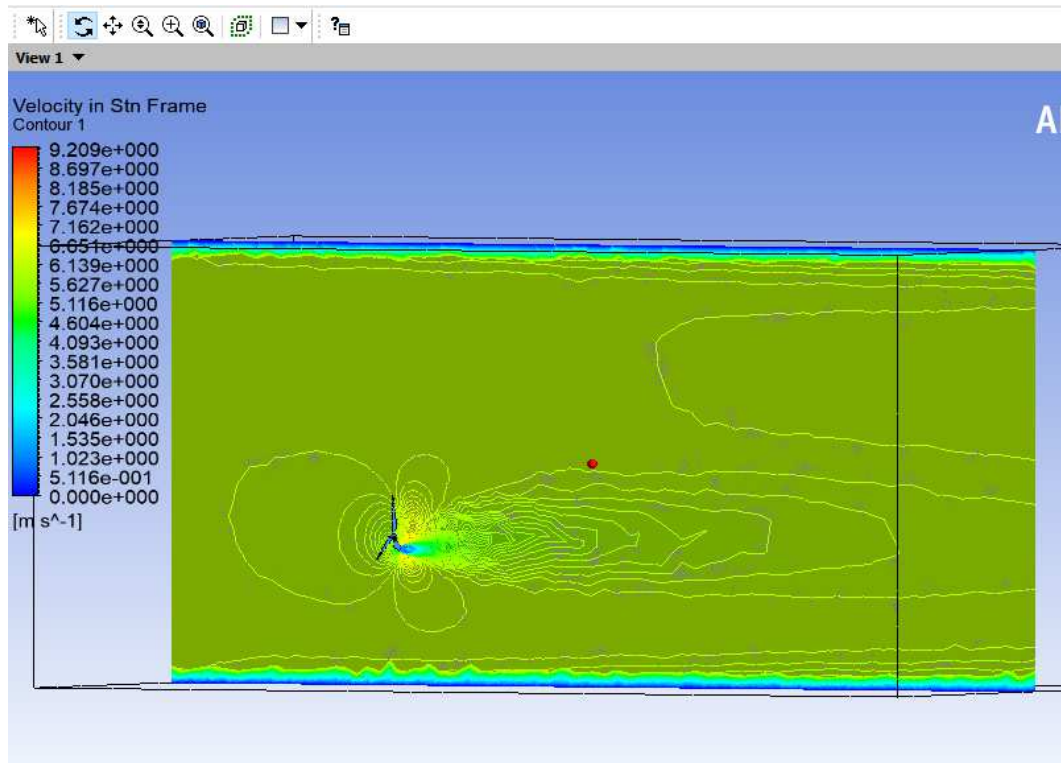


Figura 4.11. Prolongamento da esteira, ângulo de 10°

Fonte: Autoria própria, 2018.

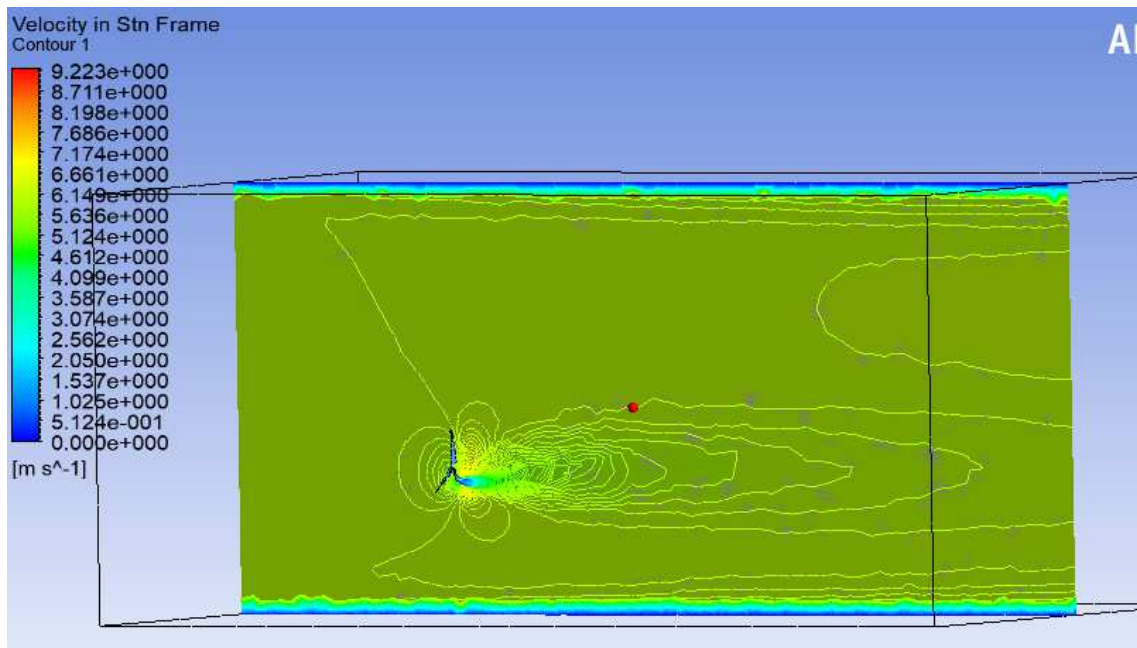


Figura 4.12. Prolongamento da esteira, ângulo de 20°

Fonte: Autoria própria, 2018.

Percebe-se então o efeito *downwash*, efeito a qual já foi comentado na seção 2.6.1 deste trabalho, ou seja, o fluxo a qual está próximo das pontas se enrola como nas figuras a cima, que tem por consequência a perda do coeficiente de sustentação na asa devido a redução do ângulo de ataque por conta da geração da velocidade induzida, como já discutido.

Pode-se destacar também a formação da esteira em torno das pás, esse fenômeno gera uma zona turbulenta atrás da pá que segue até determinado ponto, a esteira pode afetar o rendimento do aerogerador, pelo simples fato de ocasionar uma perda de coeficiente de desempenho aerodinâmico, por afetar o coeficiente de sustentação e arrasto.

A partir das simulações e análises das esteiras formadas na variação dos ângulos das pás com relação ao plano de rotação, analisou-se que.

Já para a prolongação da esteira, esse fenômeno se mostrou o mais sensível às mudanças de ângulos das pás. Conforme os campos de escoamentos já mostrados na seção anterior, podemos concluir que:

O ângulo de 2° apresentou a formação da esteira menor que os demais, tanto na esteira que se formou na frente do rotor quanto na traseira, percebe-se que, em poucos metros a esteira que se encontra na traseira do rotor iria fechar, já que as linhas de fluxo já estavam se afunilando, enquanto que, para o ângulo de 5°, a esteira teve sua maior incidência na região frontal se prolongando até próximo às paredes do domínio, além de que a esteira formada na região traseira do rotor quando comparado ao ângulo anterior, essa teria seus vórtices ainda prolongados por mais tempo.

Quando se alterou o ângulo da pá para 20° a esteira apresentou um comportamento sensível a essa mudança, uma vez que, no ângulo de 10° não tinha esteira se prolongando para a região frontal chegando próximo a parede do domínio, diferente do que apresentou no ângulo de 20° conforme as figuras a cima.

5 CONCLUSÃO

Então, através das simulações identificou-se os efeitos do escoamento em torno das pás com clareza, além de descrever os fenômenos as quais ocorrem em torno deste, como o *downwash* e a formação da esteira conforme predito na literatura. As formações dos fenômenos se mostraram sensíveis às mudanças dos ângulos das pás, afetando à formação dos vórtices o que acarreta à potência útil retirada do vento.

De acordo com as simulações, o ângulo a qual seria mais viável por avaliar o coeficiente de potência total seria o ângulo de 10°, uma vez que, este apresentou pouco vórtice na ponta da pá, apesar de a esteira na camada limite da pá ter demorado mais a se descolar com relação ao ângulo de 5°, no entanto, no ângulo de 10° não há formação de esteira dianteira a qual se prolongar de maneira intensa até a região das paredes do túnel de vento. Vale ressaltar que, para se avaliar o coeficiente total de uma turbina eólica, esses parâmetros aqui avaliados não serão suficientes para fazer a análise, uma vez que, há mais outros parâmetros que afetam a potência útil retirada do vento e, por conseguinte transmitida a corrente para a rede elétrica.

REFERÊNCIAS

Abeeólica. Energia eólica. Disponível em: http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/10/10_inforvento.pdf. Acesso em 11 de março. 2018.

AKAWA, J. V. **Análise aerodinâmica de turbinas eólicas savonius empregando dinâmica dos fluidos computacional**. 2010. 149p. Dissertação (Mestrado) - curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010

A.Guzzeta, G.Myeres, A. Purse. Types of wind turbines and associated advantages. Disponível em: <http://me1065.wikidot.com/types-of-wind-turbines-and-associated-advantages>. Acesso em: 22 de março. 2018.

ALMEIRA, A. T. P.; DA SILVA, M. M. **Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas**. 2011. 84p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

ANDERSON JR, John David. **Fundamentals of aerodynamics**. 5. Ed. Tata McGraw-Hill Education, 2010.

AOYAMA, G. K. **Simulação numérica do escoamento turbulento em canal composto**. 2017. 117p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BARBOSA, V. **Brasil avança nos números do mercado de energia eólica no mundo**. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2018/03/brasil-avanca-nos-numeros-mercado-de-energia-eolica-mundo/33757>. Acesso em: 9 de março. 2018.

BARDELIN, C. E. A. **Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E.; **Wind Energy Handbook**, Wiley, 2001.

CALLINAN. ENT261: **Wind Turbine Project**. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/sayedfathy3/wind-turbine-doc>

ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 5 Ed. São Paulo, McGraw-Hill, 2007.

CENTRAIS Elétricas funcionamento. **Enérgia eólica**. Disponível em: <<http://centraiseltricas.wordpress.com/energia-eolica/>>. Acesso em: 6 de março. 2018.

CORREIA, I. R. D. R. **Caracterização aerodinâmica de uma pá para rotor de micro-eólica**. 168p, Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Braga-Portugal, 2014.

DA COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2436/2/BS%2021%20%20papel%20das%20fontes%20renov%C3%A1veis_P.pdf. Acesso em: 5 de março. 2018.

DA FONSECA, C. A. L. L. **Simulação de escoamento turbulento em aerofólios**.

DAHL, P. M. **Simulação computacional de escoamento turbulento em subcanal de PWR usando OPENFOAM**. 2015. 76p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciências em Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

DE SOUSA, I. D. P. **Projeto e ensaios de pás para turbinas eólicas de pequeno porte com diferentes correções geométricas na ponta e na raiz da pá**. 2014. 140p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

DOS SANTOS, E. J. A. **Projeto e análise aerodinâmica de uma asa voadora rádio controlada**. 2016, 60p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016.

DUTRA, R. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologia**. Cresesb, 2008.

EPE. Consumo de Energia no Brasil. Disponível em: <http://antigo.epe.gov.br//mercado/DocumEnts//S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 5 de março. 2018.

FLUENT, ANSYS. Release 15.0. **Theory Guide, November**, 2013.

FORTUNA, Armando de Oliveira. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básico e aplicações**: Conceitos Básico e aplicações. São Paulo: Edusp, 2000.

FREITAS, A. W. **Controlo de passo de aerogeradores de baixa potência**. 2008. 187p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2008.

GASCH, R.; TWELE, J. **Wind Power Plants**: fundamentals, Design, Construction and Operation. 2. Ed. Berlin: Springer- Verlag, 2011.

Global Wind Energy Council. **Global Wind Statistics**. Disponível em: http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf. Acesso em: 7 de março. 2018.

HANSEN, M.O.L. **Aerodinamics of Wind Turbines**. 2. Ed. London: Earthscan, 2008.

INIECO, E. **Desarrollo de proyectos de instalaciones de energia mini-eólica aislada**. Editorial Vértice, 2011.

INMET. Disponível em: www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas. Acessado em 28 de maio. 2018.

ISMAIL, A.R KAMAL. **Aerodinâmica básica**. Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos. Campinas, SP, Ed. Do Autor, 2007.

JANSEN, Wim AM; SMULDERS, Paul Thomas. Rotor design for horizontal axis windmills. 1977.

LOVATTO, M. L. **Modelagem computacional da esteira aerodinâmica de turbinas eólicas baseada em sumidouro de quantidade de movimento**. 2013. 27p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

LUZ, J. L. R. **Análise numérica do desempenho da turbina eólica de eixo horizontal NREL UAE PHASE VI**. 2012. 94p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MAIA, C. **Capacidade instala de energia eólica no país tem alta de 19% em 2017**. Disponível em: <http://www.valor.com.br/brasil/5251365/capacidade-instalada-de-energia-eolica-no-pais-tem-alta-de-19-em-2017>. Acesso em: 9 de março. 2018.

MARQUES, J. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004, 158p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MME. **Número de usinas eólicas se aproxima de 500 instalações no país**. Disponível em: https://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/-/-/asset_publisher/32hhLrOzMKwWb/content/numeros-de-usinas-eolicas-se-aproximam-de-500-instalacoes-no-pais. Acesso em: dia: 6 de março. 2018.

PINTO, M de O. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

PINTO, J. S.; PASA, M. E.; MICHELS, A. **Dimensionamento das pás de aerogerador de eixo horizontal para instalação em uma propriedade rural**. 2013. 10p - Artigo Científico, 3º semana internacional das engenharias da FAHOR, Faculdade Horizontina, Rio Grande do Sul, 2013.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica com aplicações ao projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho**. 1 Ed. São Paulo: Edição do autor, 2014.

SPERA, D. A. **Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering**. 2. Ed. New York: Asme Press, 2009.

UIUC **Aifoil Coordinates Database**. UIUC Applied Aerodynamics Group. Disponível em: http://qam-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html. Acesso em 12 de março. 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method** 1. Ed. United Kingdom: Longman, 1995.

WENZEL, G. M. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. 2007. 76p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia (DEMM), Porto Alegre, 2007.

WILCOX, D.C. **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, Inc., 1998.43

CALLINAN. ENT261: **Wind Turbine Project**. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/sayedfathy3/wind-turbine-doc>

