



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS COTA FLORIO

**ESTUDO DAS TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE E ANÁLISE
AERODINÂMICA DAS PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA VISANDO UMA
POSSÍVEL IMPLEMENTAÇÃO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
SEMI-ÁRIDO - UFERSA.**

MOSSORÓ

2021

LUCAS COTA FLORIO

**ESTUDO DAS TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE E ANÁLISE
AERODINÂMICA DAS PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA VISANDO UMA
POSSÍVEL IMPLEMENTAÇÃO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
SEMI-ÁRIDO - UFERSA.**

Monografia apresentada a Universidade Federal do Semi-Árido como requisito para a obtenção de título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: MSc. Daut de Nogueira Peixoto
Couras

MOSSORÓ/RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F638e Florio, Lucas Cota.
ESTUDO DAS TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE E
ANÁLISE AERODINÂMICA DAS PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA
VISANDO UMA POSSÍVEL IMPLEMENTAÇÃO NA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA. /
Lucas Cota Florio. - 2021.
60 f. : il.

Orientador: Daut de Jesus Nogueira Peixoto
Couras.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2021.

1. Aerogerador. 2. Eficiência. 3. Perfil de
pá. I. Couras, Daut de Jesus Nogueira Peixoto ,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LUCAS COTA FLORIO

**ESTUDO DAS TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE E ANÁLISE
AERODINÂMICA DAS PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA VISANDO UMA
POSSÍVEL IMPLEMENTAÇÃO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO SEMI-
ÁRIDO - UFERSA.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal do Semi-Árido como requisito
para a obtenção de título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

Defendida em: 26 / 05 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Orientador, Prof. Msc. Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras
Presidente

Examinador Interno, Prof. Dr. Fernanda Alves Ribeiro
Membro Examinador

Examinador Interno, Prof. Dr. Victor Wagner Freire de Azevedo
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, o autor da vida, que me proporcionou tudo o que tenho e o que sou hoje. Aos meus pais, Geraldo e Eliane, pelo amor, carinho, incentivo, apoio e ensinamentos. Ao meu irmão, Mateus, pelas dicas, ensinamentos, apoio e confiança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por me dar saúde, sabedoria, e pelos planos Dele na minha vida e da minha família.

A toda minha família, especialmente aos meus avós maternos, Daniel e Herodias, e paternos, Geraldo e Maria, pelos ensinamentos, carinho e lições que eu carrego para a vida. Aos meus pais, Geraldo e Eliane, pelo amor, carinho, apoio, ensinamentos e sacrifícios que foram feitos para que eu pudesse estar aqui agora. E ao meu irmão Mateus, pelos conselhos, orientações, carinho, e pelo exemplo que é para mim.

Ao professor Daut de Jesus, orientador deste trabalho, pela confiança em mim depositada, pela paciência e pela orientação.

Aos meus amigos, professores, a Equipe Cactus Baja e a UFERSA por todos os ensinamentos, aprendizados e diversos momentos especiais que eu pude ter nessa caminhada da graduação.

“Agora que já se ouviu tudo, aqui está a conclusão: Tema a Deus e guarde os seus mandamentos, pois isso é o essencial para o homem. Pois Deus trará a julgamento tudo o que foi feito, inclusive tudo o que está escondido, seja bom, seja mal.”

(Eclesiastes 12:13,14)

RESUMO

Com o avançar dos anos tem ocorrido um grande avanço das tecnologias das fontes renováveis de energia. Um desses segmentos que tem crescido cada vez mais é o da energia eólica, com isso cada vez mais tem surgido o interesse nessa energia, e estudos a fim de possibilitar a implantação de aerogeradores em diversos locais, assim como melhorar a sua eficiência, ao melhorar a sua aerodinâmica. Com o intuito de analisar a aerodinâmica do rotor de um aerogerador, para a implantação na Universidade Federal do Semi-Árido – UFERSA, o primeiro ponto a ser trabalhado são as condições de trabalho do aerogerador, com o intuito de escolher o melhor perfil de pá para o aerogerador proposto. O segundo ponto trabalhado, é escolher o perfil de pá do aerogerador, serão trabalhados perfis de domínio público, que possuem um limite de coeficiente de potência por volta de 45%. Logo, para a escolha do perfil de pá, foram previamente selecionados modelos de perfis de domínio público, que se mostraram interessantes para o aerogerador, e com a utilização do software QBlade foi possível simular a atuação desses perfis para as condições de trabalho, e a partir do resultado dessa primeira simulação, foi feita a escolha do modelo, que foi o perfil SG 6043. Tendo sido feita a escolha do perfil, foi possível modelar de forma otimizada a pá, de acordo com o Tip State Ratio (TSR) por meio do software Qblade, para a escolha do modelo, a simulação foi feita para o TSR de 5 a 8, com o objetivo de escolher o modelo com o maior coeficiente de potência. Por fim, utiliza-se as condições de trabalho previamente definidos, além do modelo estabelecido, para simular o coeficiente de potência, e a energia gerada para as condições de trabalho, dessa forma foi possível prever de uma forma mais precisa o comportamento do aerogerador.

Palavras chaves: Aerogerador. Eficiência. Perfil de pá.

ABSTRACT

Over the years, there has been a great advance in the technologies of renewable energy sources. One of those segments that has been growing more and more is the wind energy segment, with that increasingly interest in this energy has appeared more studies in order to enable the installation of wind turbines in different locations, as well as improving their efficiency, by improving its aerodynamics. with the objective of analyze the aerodynamics of the rotor of a wind turbine, for the implantation at Universidade Federal do Semi-Árido - UFERSA, the first point to be worked on, is the working conditions of the wind turbine, in order to choose the best aerofoil for the proposed wind turbine. The aerofoils that will be worked is in the public domain, which have a power coefficient limit around 45%. Therefore, to choose the airfoil, models of public domain profiles were selected, which proved to be interesting for the wind turbine, and using the QBlade software it was possible to simulate the performance of these profiles for the working conditions, and from the result of this first simulation, the model was chosen, which was the SG 6043 airfoil. Having made the airfoil choice, it was possible to model the blade optimally, according to the Tip State Ratio (TSR) through the Qblade software, for the model choice, the simulation was made for the TSR from 5 to 8, in order to choose the model with the highest power coefficient. Finally, the previously defined working conditions are used, in addition to the established model, to simulate the power coefficient, and the energy generated for the working conditions, in this way it was possible to more accurately predict the behavior of the wind turbine.

keywords: Wind turbine. Efficiency. Airfoil.

Lista de Figuras

Figura 1 – Moinho de Vento	16
Figura 2 - Aerogerador de eixo vertical	19
Figura 3 - Fluxo do vento incidente a um aerogerador de eixo horizontal.	20
Figura 4 – Aerogerador de eixo horizontal.	20
Figura 5 - Formato e composição de um aerogerador de pequeno porte.	21
Figura 6 – Comportamento do fluído ao decorrer de uma placa.....	24
Figura 7- Coeficiente do C_W para determinados perfis.....	26
Figura 8 - Velocidades e ângulos formados pela ação do vento, em uma palheta de aerogerador.....	27
Figura 9- Diagrama de forças da pá.	28
Figura 10 - Quantidade de pás (B) pelo TSR (λ).	30
Figura 11 - Fluxo de ar através de uma área transversal A.	31
Figura 12- Perdas da velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás. 32	
Figura 13 - Valores do expoente de Hellmann em função da rugosidade do terreno.	33
Figura 14 - Seção anular do rotor.....	34
Figura 15 - Velocidades e forças atuando sobre uma seção da pá de um rotor. ...	35
Figura 16 - Carregamento em uma seção de pá.	36
Figura 17: Descrição do Sistema de Coordenadas fixo no corpo.	39
Figura 18: Demonstração de um aerofólio discretizado.	40
Figura 19: Nomenclatura utilizada na formulação de distribuição de vórtice linear	41
Figura 20 - Modelos dos perfis pré-selecionados no software QBlade.	48
Figura 21 – Modelo do perfil selecionado.	50
Figura 22 – Caixa de diálogo para a modelagem.	53
Figura 23 - Representação da pá modelada.....	55

Lista de tabelas

Tabela 3 - Média da temperatura por mês em Mossoró.	44
Tabela 4 -Velocidade média do vento a 2 m e a 10 m de altura para série histórica de 2000 a 2012.	44
Tabela 5 - Propriedades dos perfis para as condições adotadas.	49
Tabela 6 - Tamanho das seções do aerogerador.	52
Tabela 7 - Valores obtidos com a modelagem para a pá.	54

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Variações do Cl/Cd dos perfis pré-selecionados.....	49
Gráfico 2 - Cl/Cd do perfil SG 6043	51
Gráfico 3 - Coeficiente de potência pelo TSR, para cada modelo gerado.....	53
Gráfico 4 - Coeficiente de potência pelo TSR, da hélice selecionada. Error! Bookmark not defined.	
Gráfico 5 - Pôtença gerada pela turbina, as condições especificadas. Error! Bookmark not defined.	
Gráfico 6 - Coeficiente de potência, para as condições especificadas. Error! Bookmark not defined.	

Sumário

1	Introdução	14
2	Objetivos do Trabalho	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	História da energia eólica	16
3.2	Desenvolvimento dos aerogeradores no século XX.....	17
3.3	Tipos de aerogeradores.....	18
3.3.1	Eixo vertical	18
3.3.2	Eixo horizontal	19
3.4	Componentes de um aerogerador horizontal	21
3.5	Interação do vento com a hélice do aerogerador.....	22
3.6	Regime de trabalho	22
3.6.1	Regime laminar	23
3.6.2	Regime Turbulento	24
3.7	Forças sobre um perfil	25
3.7.1	Ângulos da corda.....	26
3.7.2	Forças de Arrasto e sustentação	27
3.7.3	Força útil e axial	29
3.7.4	Influência do número de pás	29
3.7.5	Potencial energético	30
3.8	Lei exponencial de Hellmann	32
4	Método de simulação	33
4.1	Blade Element Method – BEM (Método de elemento da pá).....	33
4.2	Método dos Painéis.....	38

4.3	XFOIL	42
4.4	QBlade	43
5	Metodologia	44
5.1	Condições adotadas	44
5.1.1	Escolha da temperatura	44
5.1.2	Velocidade do vento	44
5.2	Premissas para o projeto	45
5.3	Definições para a potência	45
5.4	Escolha dos perfis a serem analisados	47
5.4.1	Pré-seleção dos perfis	47
6	Resultados e discussão	48
6.1	Seleção do perfil	48
6.2	Modelagem para o perfil selecionado	50
6.3	Simulação para o modelo de hélice	54
6.4	Simulação do desempenho do aerogerador	55
7	Conclusão	56
	Referências Bibliográficas	57

1 Introdução

A utilização da energia eólica segundo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) teve seu início quando as civilizações começaram a utilizar a força do vento, por meio de cata-ventos para moer grãos e bombear água, e com o avanço das tecnologias, no final do século 18 começou a surgir aerogeradores, mas nessa etapa inicial eles tinham pouca eficiência em comparação com o que é gerado hoje, além de que a energia elétrica estava em seu estágio inicial de desenvolvimento, limitando o uso da energia gerada por eles, mesmo assim foi algo que chamou a atenção e a curiosidade para que houvesse um aperfeiçoamento dessa tecnologia.

A energia eólica é uma das fontes de energia renovável que tem havido um maior investimento, porém ainda há muito a avançar nessa tecnologia para maximizar a sua eficiência. Segundo Pires (2010), os modelos mais comuns nos estudos são as TEEV (Turbinas Eólicas de Eixo Vertical), Darrieus, Savonius e Molinete e os aerogeradores de eixo horizontal TEEH (Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal). O tipo de aerogerador varia muito de acordo com as necessidades que são previstas e o meio que ele será instalado. Então para que o aerogerador seja implementado de forma correta, e para melhor a eficiência, primeiro deverá ser feito o estudo de seu funcionamento e principais características.

De acordo com Júnior (2008), um dos fatores de maior influência na sua eficiência são as pás do aerogerador, que variam de acordo com o seu comportamento aerodinâmico no meio há ser implantado. Segundo Júnior (2008), a quantidade de pás é variável para cada caso, além de que a forma aerodinâmica varia de acordo com as condições adotadas para o projeto. De acordo com Pires (2010), a eficiência do aerogerador é diretamente proporcional a eficiência do rotor e as pás são responsáveis diretas pela interação com o ar. Logo, é de suma importância estudar o seu comportamento aerodinâmico para melhorar a eficiência do aerogerador.

2 Objetivos do Trabalho

2.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento das turbinas eólicas de pequeno porte, assim como a sua utilização, analisar as características dos perfis de pás de turbinas eólicas, e selecionar um tipo de pá para uma turbina eólica, visando uma possível implementação em uma determinada área na Universidade Federal do Semi Árido - UFERSA.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o comportamento e aplicação para as turbinas eólicas de pequeno porte;
- Obter as condições de trabalho do aerogerador;
- Selecionar o perfil de pá adotando as condições para implantação na UFERSA;
- Simular do comportamento do perfil selecionado;
- Simular o comportamento do aerogerador.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 História da energia eólica

A energia dos ventos é utilizada desde os primórdios da civilização, sendo usada em diferentes tipos de tecnologias. Essa fonte de energia natural é utilizada há milênios para atividades como o beneficiamento de grãos e o bombeamento de água, sendo empregada de maneira a dividir o trabalho com outras tecnologias como a tração animal segundo Lopez (2002).

O primeiro registro histórico da utilização de aerogeradores é na Pérsia, por volta de 200 A.C., sendo empregados cata-ventos para as atividades de bombeamento de água e moagem de grãos. Esse cata-vento era um moinho de eixo vertical, e mesmo tendo uma eficiência baixa devido as suas características, os cata-ventos primitivos apresentavam vantagens importantes para as atividades que eram empregados, difundindo-se o seu uso pelo mundo islâmico (CHESFBRASCEP, 1987).

Figura 1 – Moinho de Vento



Segundo CRESESB, 2008, na Europa a utilização de cata-ventos teve início há 900 anos atrás. As máquinas primitivas foram utilizadas até o século XII então começaram a ser empregados os moinhos de eixo horizontal, e logo os moinhos de vento do tipo “holândes” foram disseminados em vários países da Europa.

Na Holanda, entre os séculos XVII a XIX, os moinhos tiveram uma importante função e grande utilização na drenagem das terras cobertas por água, exemplos disso

foram a área de Beemster Polder, que ficava a três metros abaixo do nível do mar, foram utilizados 26 moinhos de vento de até 50 HP cada, para realizar a drenagem e um período que foi entre os anos de 1608 e 1612. Posteriormente, a região de Schermer Polder também foi drenada por 36 moinhos de vento durante quatro anos, a uma vazão total de 1.000^3 /min (SHEPHERD, 1994). Os moinhos de vento tiveram uma influência gigante na Europa, principalmente na economia agrícola, seja na moagem de grãos seja no bombeamento de água. E o desenvolvimento tecnológico das pás, sistema de controle, eixos etc., permitiu o uso dos moinhos de vento em várias atividades utilizando-se a força motriz do vento, além de torná-lo mais eficiente.

3.2 Desenvolvimento dos aerogeradores no século XX

Segundo CRESESSB no início do século XX houve um grande avanço da rede elétrica, e com isso começaram a surgir várias pesquisas para o aproveitamento da energia eólica na geração de grandes blocos de energia. Nesse período enquanto nos Estados Unidos, aerogeradores de pequeno porte nas fazendas eram o maior foco e mais difundidos, a Rússia investia na conexão de aerogeradores de médio e grande porte diretamente na rede.

Como no período da Segunda Guerra Mundial a fonte de energia mais importante para as forças armadas era o petróleo, todos os países fizeram grandes esforços para economizar os combustíveis fósseis, com o intuito de serem utilizados na guerra. Esse cenário caótico acabou por contribuir para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte. Um dos exemplos desse esforço foi o Estados Unidos, que projetou o maior aerogerador até então projetado. O aerogerador Smith-Putnam cujo rotor tinha 53,3m de diâmetro, uma torre de 33,5m de altura e possuía duas pás de aço pesando 16 toneladas. (CRESESSB, 2008).

Como após a Segunda Guerra, não houve mais a necessidade de serem empregados e reservados grandes quantidades de combustíveis fósseis para as forças armadas, então voltou a ter combustíveis fósseis em grande escala em todo o cenário mundial. Um estudo econômico na época mostrava que aquele aerogerador não era mais competitivo e, sendo assim, o projeto foi abandonado. Esse projeto foi pioneiro na organização de uma parceria entre a indústria e a universidade, objetivando pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a geração de energia elétrica através dos ventos. Essa parceria

viabilizou o projeto com o maior número de inovações tecnológicas até então posto em funcionamento. (CRESESSB, 2008).

Porém, nesse período pós Segunda Guerra, entre 1955 e 1968, a Alemanha construiu e operou um aerogerador com o maior número de inovações tecnológicas na época. Os avanços tecnológicos desse modelo persistem até hoje na concepção dos modelos atuais, mostrando o seu sucesso de operação. Tratava-se de um aerogerador de 34 metros de diâmetro operando com potência de 1200kW, a ventos de 8m/s (HÜTTER, 1973, 1974 *apud* DIVONE, 1994). Esse aerogerador possuía rotor leve em materiais compostos, duas pás a jusante da torre, sistema de orientação amortecida por rotores laterais e torre de tubos estaiada; operou por mais de 4.000 horas entre 1957 e 1968. As pás, por serem feitas de materiais compostos, aliviaram os esforços em rolamentos, diminuindo assim os problemas de fadiga. Essa inovação mostrou ser muito mais eficiente comparada aos modelos até então feitos de metais. Em 1968, quando o modelo foi desmontado e o projeto encerrado por falta de verba, as pás do aerogerador apresentavam perfeitas condições de uso. (CRESESSB, 2008).

3.3 Tipos de aerogeradores

3.3.1 Eixo vertical

Segundo CRESESSB, em geral os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devido às forças de Coriolis. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (lift) e por forças de arrasto (drag). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torre de vórtices. Os rotores do tipo Darrieus são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical (CRESESSB, 2008). Podemos ver um exemplo de aerogerador de eixo vertical na Figura 2.

Figura 2 - Aerogerador de eixo vertical



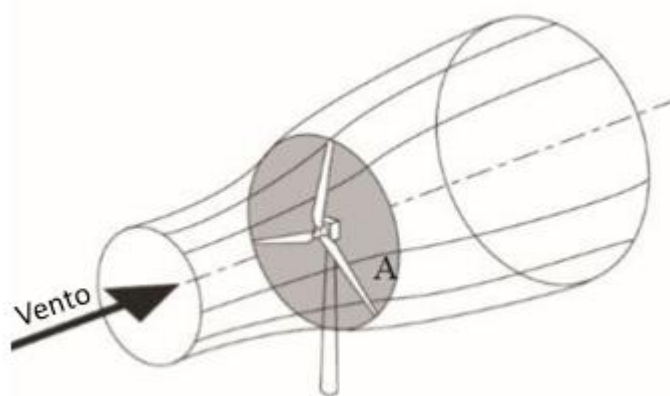
Fonte: SANDIA, 2006

3.3.2 Eixo horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns, e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (lift) e forças de arrasto (drag). Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo). (CRESESB, 2008).

Pode-se definir os aerogeradores de eixo horizontal como aqueles em que seu eixo é paralelo ao fluxo de vento. Sobre ele são exercidas forças aerodinâmicas, que são chamadas de força de arrasto que atua na direção do escoamento e a força de sustentação que atua perpendicular a força de arrasto. Como podemos ver na Figura 3.

Figura 3 - Fluxo do vento incidente a um aerogerador de eixo horizontal.



Fonte: Adaptado de Lima, 2015.

Quanto mais o rotor girar pelo efeito da força de sustentação mais potência ele irá liberar se comparado a uma mesma velocidade, com os que possuem uma força de arrasto maior. Os aerogeradores de eixo horizontal são predominantemente movidos pela força de sustentação. Podemos ver um exemplo de aerogerador de eixo horizontal na Figura 4.

Figura 4 – Aerogerador de eixo horizontal.

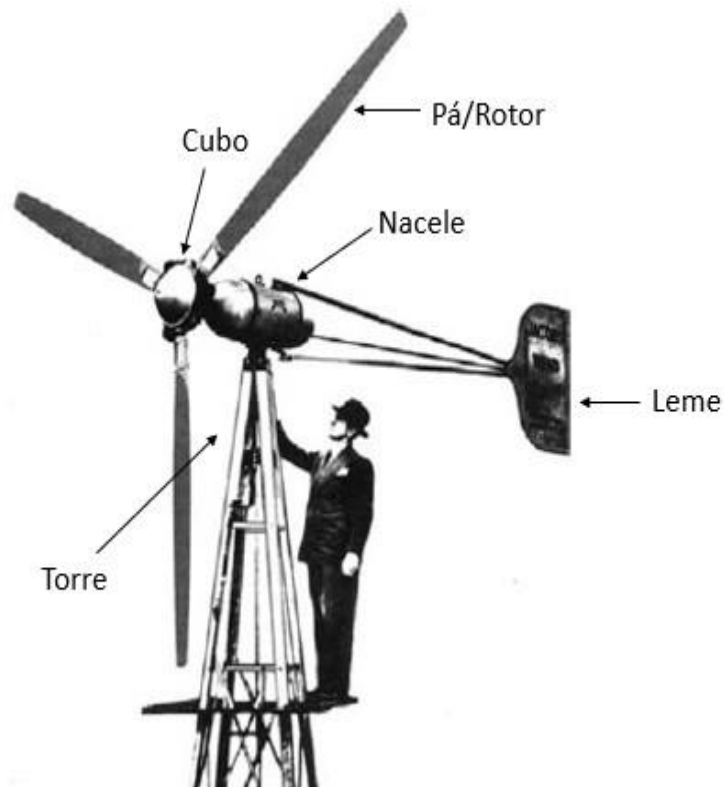


Fonte: CRESESB, 2008.

3.4 Componentes de um aerogerador horizontal

A formatação principal de um aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 - Formato e composição de um aerogerador de pequeno porte.



Fonte: Adaptado de Jacobs, 1961.

Os aerogeradores desse tipo podem ter diferentes tamanhos, formatos da nacela, podem apresentar ou não uma caixa multiplicadora, além de poderem se diferenciar pelo tipo de gerador utilizado. Logo, podem ser citados como os principais componentes de um aerogerador de pequeno porte:

- **Cubo:** O conjunto de pás fixado ao cubo forma o conjunto determinado rotor. A função deste é captar energia cinética do vento através das pás e transferi-la para os componentes do gerador.
- **Nacela:** Possui base rotativa, em torno de um eixo horizontal instalada no topo da torre, que possibilita o ajuste da direção do rotor

conforme direção do vento. Essa parte é a base para a instalação do rotor com cubo e pás.

- **Pás ou Aerofólios:** O conjunto das pás forma o rotor. Geralmente as pás são confeccionadas em compósitos de fibra de vidro e resinas, com o objetivo de reduzir o peso. Os aerogeradores podem possuir pás com perfis aerodinâmicos variados, no intuito de aumentar a sua eficiência. Vale ressaltar que as pás podem ter mais de um perfil em sua composição perfis.
- **Torre:** A torre é o que sustenta o aerogerador. É a parte que faz a elevação do mecanismo, permitindo a sua posição em alturas onde a velocidade do vento é maior, facilitando a geração de energia.
- **Leme:** É o mecanismo que permite manter a face do rotor perpendicular a corrente principal de vento.
- **Geradores:** Transformam a energia mecânica, a partir da rotação do eixo, em energia elétrica.

3.5 Interação do vento com a hélice do aerogerador

Seja em qual for o tipo de aerogerador, as pás são de extrema importância para seu rendimento. As pás são responsáveis pela interação do aerogerador com o vento, ou seja, são elas que captam a energia cinética do vento para que seja transformada em trabalho mecânico, e o seu perfil aerodinâmico terá total influência nessa relação, como veremos nos tópicos seguintes.

3.6 Regime de trabalho

O atrito superficial depende diretamente com qual regime o objeto se enquadrará, fazendo com que o rendimento e a escolha de perfil sejam alterados, de acordo com o melhor regime a ser enquadrado.

O regime é definido pelo número de Reynolds, que é dado por:

$$Re_x = \frac{\rho u x}{\mu} \quad (1)$$

Sendo:

Re: Número de Reynolds;

ρ : Densidade do fluido;

u : Velocidade do fluido;

X : Comprimento do objeto estudado;

μ : Viscosidade dinâmica do fluido.

3.6.1 Regime laminar

Nesse regime, o comportamento do fluido é ordenado, logo é possível identificar as linhas de corrente que são percorridas pelo fluido. A espessura da camada limite aumenta, o gradiente de velocidade diminui e a tensão de cisalhamento diminui, de acordo com o aumento do escoamento. isso pode ser observado na Figura 6.

Logo a tensão de cisalhamento é:

$$\tau = \frac{\mu du}{dy} \quad (2)$$

Sendo:

τ : Tensão de cisalhamento;

μ : Viscosidade do fluido.

Utilizando como base a eq. 6.27 do Incropera, 2013, o regime será laminar caso:

$$Re \leq 10^5 \quad (3)$$

Re: Número de Reynolds.

3.6.2 Regime Turbulento

O escoamento para o regime turbulento, na maioria das vezes é altamente irregular, e a grande parcela do fluido apresenta um movimento, em três dimensões, aleatório. O fluido com mais velocidade fica sem contato com o objeto, já o mais lento fica mais para dentro, em contato com o objeto. Como o movimento é caótico, ocorrem variações de velocidade e pressão em qualquer ponto da camada limite.

Na Figura 4 pode-se ver o comportamento do fluido quando está no regime turbulento, podemos ver que com o aumento da velocidade, e do comprimento percorrido, maior será a turbulência. Também podemos observar que até o x_c o regime será laminar, após isso terá uma zona de transição para o turbulento, para então ter o regime turbulento.

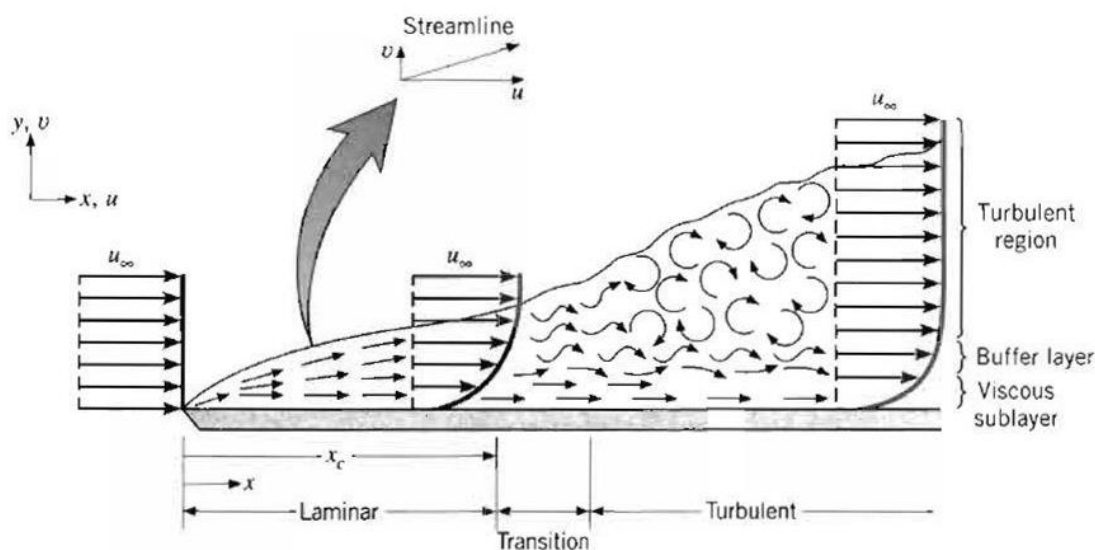
O regime será turbulento caso:

$$Re \geq 10^6 \quad (4)$$

Vale ressaltar o intervalo do regime de transição:

$$10^5 < Re < 10^6 \quad (5)$$

Figura 6 – Comportamento do fluido ao decorrer de uma placa.



Fonte: Incropera, 2013.

3.7 Forças sobre um perfil

Segundo Júnior (2008), quando um objeto está de encontro há uma corrente, esse apresenta uma resistência ao avanço, e isso acarreta na deformação dos filetes fluídos. Há uma dependência da forma do objeto e de sua posição em relação ao vento. Ao estudar os efeitos da resistência do ar sobre um placa plana, observa-se que a resultante $\vec{R}$ das forças aplicadas a placa, é um vetor cujo ponto de aplicação é o centro aerodinâmico, sendo sua direção perpendicular a placa, seu sentido é o do vento, e a sua intensidade é proporcional a superfície S exposta ao quadrado da velocidade do vento v na forma:

$$\vec{R} = C_W \rho \frac{Av^2}{2} = kAv^2 \quad (6)$$

Sendo o “ k ” um coeficiente que depende do ângulo de incidência, das unidades escolhidas e da regime de trabalho. O “ C_W ” é o coeficiente de resistência (penetração), o “ ρ ” e a densidade do ar e “ A ” a seção frontal do perfil do objeto.

Sendo o valor de C_W , para;

Regime laminar:

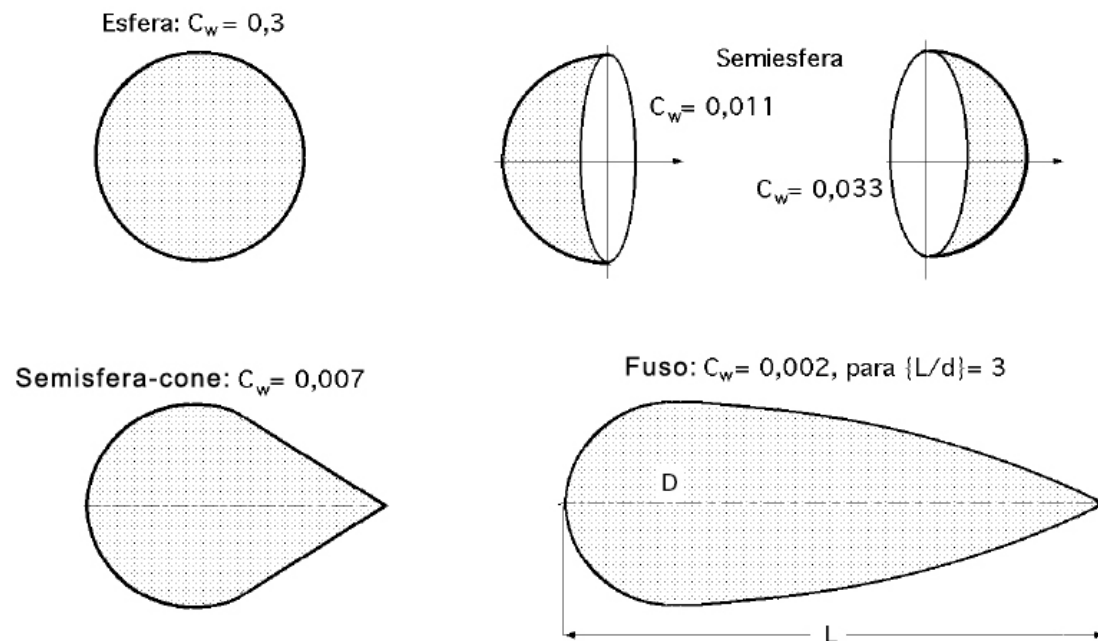
$$C_W = \frac{1,328}{\sqrt{Re}} \quad (7)$$

Regime turbulento:

$$C_W = \frac{0,074}{Re^{\frac{1}{5}}}; \quad \text{caso } 10^5 < Re < 10^7 \quad (8)$$

$$C_W = \frac{0,455}{(\log Re)^{-2,58}}; \quad \text{caso } Re > 10^7 \quad (9)$$

Figura 7- Coeficiente do C_W para determinados perfis.



Fonte: Díaz, 2003

3.7.1 Ângulos da corda

As hélices do aerogerador como dito anteriormente tem a função de captar a energia cinética do vento para que seja transformada em energia mecânica. Então, ao se estudar a ação do vento relativo à pá que se encontra girando, obtém-se a força por unidade de comprimento, podemos observar isso na Figura 6.

Sendo:

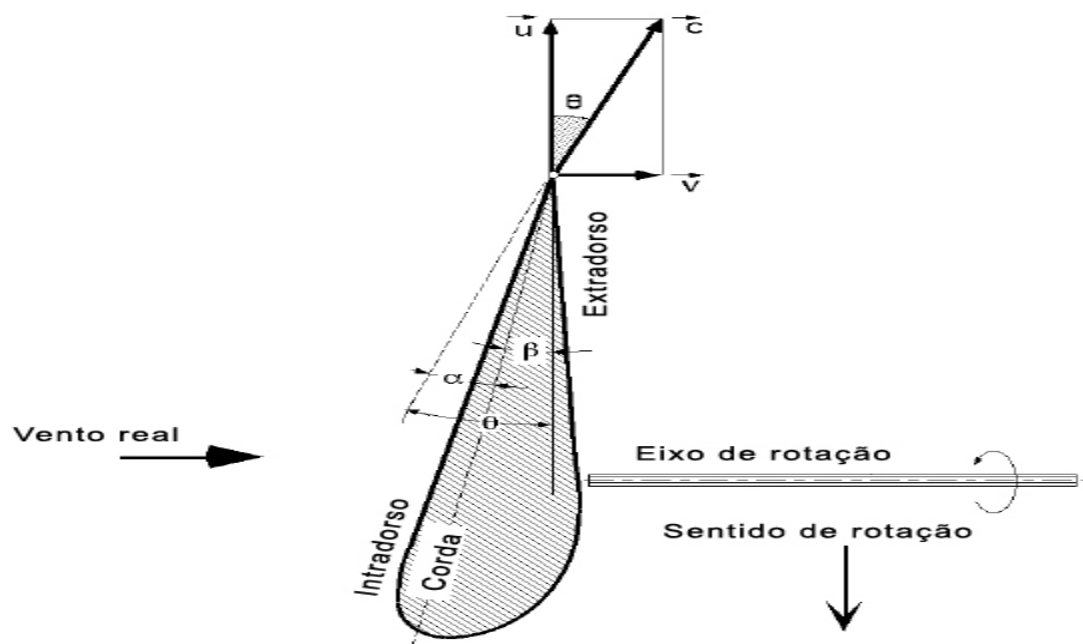
$\vec{c}$: Velocidade aparente do vento;

$\vec{v}$: Soma da velocidade do vento real;

$\vec{u}$: Soma do vento originado pela rotação da pá;

E se tem os ângulos que a pá forma, mostrados na Figura 8, que exercerão uma grande influência no comportamento aerodinâmico.

Figura 8 - Velocidades e ângulos formados pela ação do vento, em uma palheta de aerogerador.



Fonte: Díez, 2003

β : É o ângulo que uma corda qualquer do perfil forma com o plano de rotação, e o ângulo de inclinação (corda/u);

α : É o ângulo que a corda do perfil forma com a velocidade aparente do vento $\vec{c}$ (ângulo de incidência ou ataque);

θ : É o ângulo que o plano de rotação forma com a direção aparente do vento que passa pelo bordo de ataque, sendo conhecido como ângulo aparente do vento.

Por trigonometria, temos:

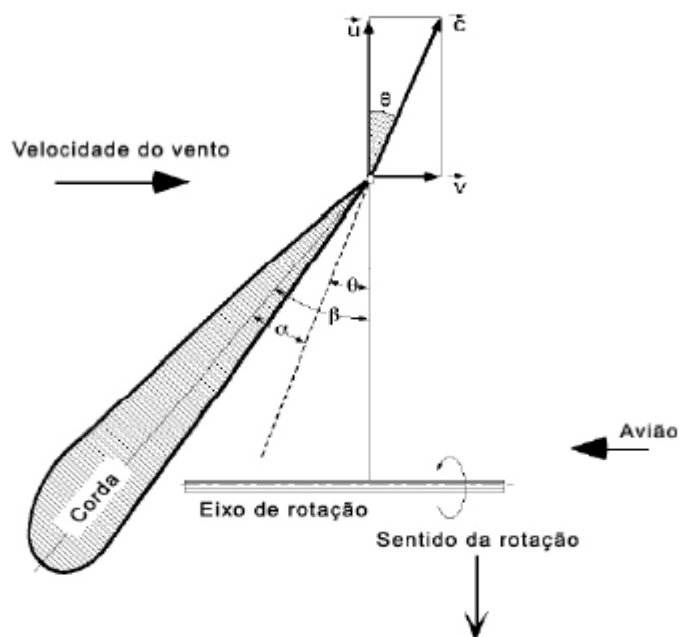
$$\beta = \theta - \alpha \quad (10)$$

3.7.2 Forças de Arrasto e sustentação

Para que possa ser compreendida a aerodinâmica dos rotores, tem que ser revisado as forças de arrasto e de sustentação, considera-se então um força que atua no centro aerodinâmico de um elemento de pá em rotação, de superfície frontal elementar A, essa

força é dada por F_R , essa força é a resultante de duas forças, uma que é a força de arrasto, sendo na direção do vento aparente, resultando em uma dissipação de energia e sendo representado por F_{Rx} , e a força de empuxo que é representado por F_{Ry} . Pode ser vista a representação dessas forças na Figura 9.

Figura 9- Diagrama de forças da pá.



Fonte: Diez, 2003

Outro fator a ser considerado é o coeficiente aerodinâmico, este varia de acordo com o perfil, ângulo de incidência, número de Reynolds e a área da pá.

Equação para o coeficiente aerodinâmico:

$$C_T^2 = C_x^2 + C_y^2 \quad (11)$$

Equação para a força de arrasto:

$$F_{Rx} = \frac{1}{2} C_x \rho c^2 A \quad (12)$$

Equação para a força de empuxo:

$$F_{Ry} = \frac{1}{2} C_y \rho c^2 A \quad (13)$$

Sendo:

F_{Rx} : Força do arrasto;

F_{Ry} : Força do empuxo;
 C_x : Coeficiente de arrasto;
 C_y : Coeficiente de empuxo;
 ρ : Densidade do ar;
 c : Velocidade do vento;
 A : Área da pá.

De acordo com Júnior (2008), se o ângulo formado pelo plano da placa com a direção do vento for grande, existe uma sobre pressão na parte dianteira da placa e uma depressão em sua parte posterior de caráter turbulento. Se o ângulo de incidência for pequeno, a sobre pressão aparece na parte inferior da placa e a depressão na parte de cima da placa, de forma que aparece uma força que tende a elevá-la conhecida como força de sustentação ou de elevação.

3.7.3 Força útil e axial

Projetando as forças obtidas anteriormente, sobre o plano de rotação da hélice, conseguimos obter uma força resultante, que será a força útil, também obtém uma força perpendicular, que será a força de empuxo que agirá sobre o rotor.

$$F_{\text{útil}} = F_{Ry} \sin \theta - F_{Rx} \cos \theta \quad (14)$$

$$F_{\text{axial}} = F_{Ry} \cos \theta - F_{Rx} \sin \theta \quad (15)$$

3.7.4 Influência do número de pás

A quantidade de pás é diretamente relacionada com o tip speed ratio (TSR), este, é o parâmetro que mensura a razão entre a velocidade linear de rotação na ponta da pá e a velocidade do vento incidente sobre a superfície da pá.

Em turbinas modernas, o índice de velocidade na ponta das pás oscila entre 6 e 9 para turbinas de três hélices, já que estes valores provaram ser mais eficientes para a produção de energia elétrica. Deve se considerar a velocidade de vento disponível para optar por uma determinada velocidade para a ponta da pá na fase de projeto, pois quanto

maior a velocidade da ponta da pá, menor o ângulo de ataque necessário naquele ponto e maior a velocidade do vento necessária para produzir a mesma quantidade de energia. De acordo com as equações apresentadas a taxa de velocidade da ponta da pá e o ângulo de passo combinados, tem influência direta no Coeficiente de Potência do aerogerador, conforme a Figura 10, visto que ambos são fatores essenciais na interação com a velocidade do ar (v_1): (BRETSCHNEIDER, 2017).

Figura 10 - Quantidade de pás (B) pelo TSR (λ).

λ	B
1	8-24
2	6-12
3	3-6
4	3-4
>4	1-3

Fonte: Júnior, 2008.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (16)$$

3.7.5 Potencial energético

O potencial energético eólico de um local é a energia máxima transmitida pelo vento do local, dado as condições adotadas. Para calcular o potencial eólico segundo Bretschneider (2017), deve-se calcular primeiro a quantidade de energia cinética contida na referida massa de ar, através da equação do potencial energético Equação 17.

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (17)$$

Sendo:

E: A quantidade de energia;

m : A massa do ar;

v : Velocidade da massa de ar;

Então considerando a massa de ar, com a velocidade perpendicular a um cilindro

imaginário, conclui-se que a potência disponível no vento que passa pela seção A, de acordo com a Figura 10, será:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (18)$$

Sendo:

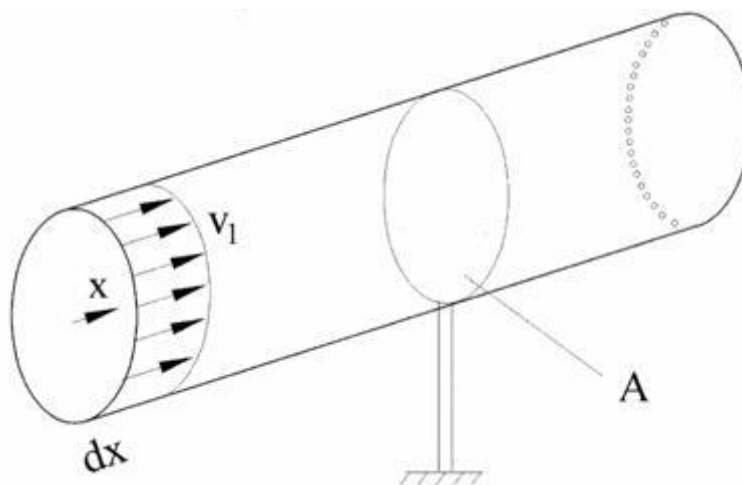
P : A potência do vento;

ρ : A densidade do ar;

v : Velocidade da massa de ar;

A : Área da secção do cilindro;

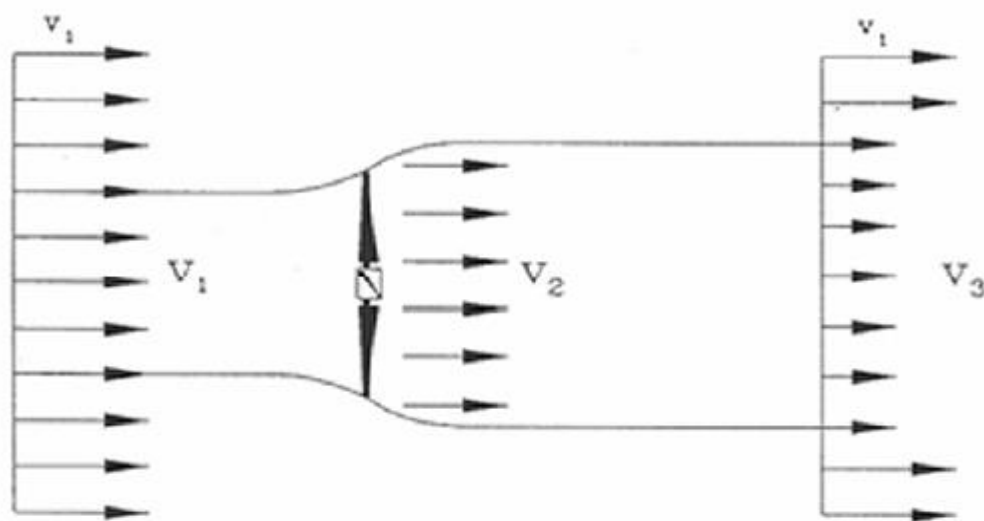
Figura 11 - Fluxo de ar através de uma área transversal A.



Fonte: CRESESB, 2008.

Segundo Bretschneider (2017), com a passagem do vento pelo aerogerador, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás do aerogerador, e com isso ocorre a diminuição da velocidade do vento. Porém, a potência disponível pelo vento não é totalmente transformada em energia elétrica pelo aerogerador. Então para que seja considerado esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência C_p e para determinar o valor máximo da energia extraída, o C_p máximo, o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo, onde V_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, V_2 a velocidade do vento no nível das pás e V_3 a velocidade do vento após deixar as pás. Conforme é representado na Figura 11.

Figura 12- Perdas da velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.



Fonte: CRESESB, 2008.

Conforme esquematizado na figura acima, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade V_1 que é retardada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade V_3 a jusante das pás. Logo, pela lei da continuidade, têm-se que:

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 = \rho V_3 A_3 \quad (19)$$

Além disso, segundo Bretschneider (2017), respeitando os limites da transformação de energia, compreende-se que, nas relações entre V_1 e V_3 , a velocidade instantânea do ar na superfície do rotor é determinada pela Equação 20:

$$V_2 = V_3 - V_1 \quad (20)$$

3.8 Lei exponencial de Hellmann

A velocidade do vento aumenta de acordo com a altura, e de acordo com a lei exponencial de Hellmann, a velocidade irá variar de acordo com a equação 21, sendo que

o expoente de Hellmann varia de acordo com a Figura 13.

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (21)$$

Sendo:

V_h : É a velocidade do vento na altura escolhida;

V_{10} : É a velocidade do vento a uma altura de 10 metros;

h : É a altura escolhida;

α : É o expoente de Hellmann que varia de acordo com a rugosidade do terreno;

Figura 13 - Valores do expoente de Hellmann em função da rugosidade do terreno.

Lugares planos com gelo	$\alpha = 0,08$ a $0,12$
Lugares planos (mar, costa)	$\alpha = 0,13$ a $0,16$
Terrenos pouco acidentados	$\alpha = 0,2$ a $0,26$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,25$ a $0,4$
Terrenos acidentados ou bosques	$\alpha = 0,2$
Terrenos muito acidentados ou cidades	$\alpha = 0,25$ a $0,4$

Fonte: Júnior, 2008.

4 Método de simulação

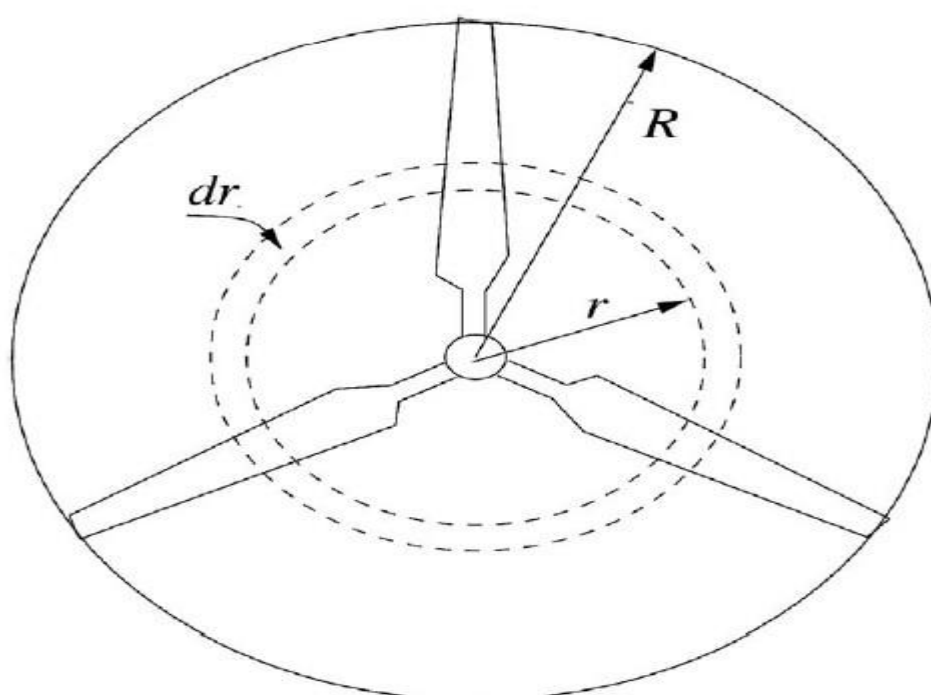
4.1 Blade Element Method – BEM (Método de elemento da pá)

A eficiência de um aerogerador realizar a conversão de energia eólica (da área varrida pelo rotor) em energia mecânica, varia de acordo com as propriedades aerodinâmicas do rotor.

Segundo Silva (2012), para estudar essa interação do rotor com o vento, foi desenvolvida o método de elemento da pá (BEM), que combina as teorias gerais do momento em suas componentes axial e angular e a teoria do elemento de pá. As propriedades dos perfis aerodinâmicos, como coeficientes de sustentação e arrasto, e comprimento de corda, são parâmetros nessa análise. A partir desse método é possível selecionar a geometria de pá que seja mais eficiente (para as condições determinadas).

Inicialmente, considera-se a pá dividida em várias seções de comprimento ao longo da dimensão radial. As forças aerodinâmicas em cada elemento podem ser calculadas tendo o conhecimento das características bidimensionais do perfil. Sabendo-se o ângulo de ataque, determinado a partir da velocidade resultante incidente na seção transversal do elemento e para um dado valor de fator de indução axial e fator de indução tangencial, pode-se determinar a força atuante em cada seção, e por meio de integração determinar a força e o torque sobre a pá inteira. (SILVA, 2012).

Figura 14 - Seção anular do rotor.

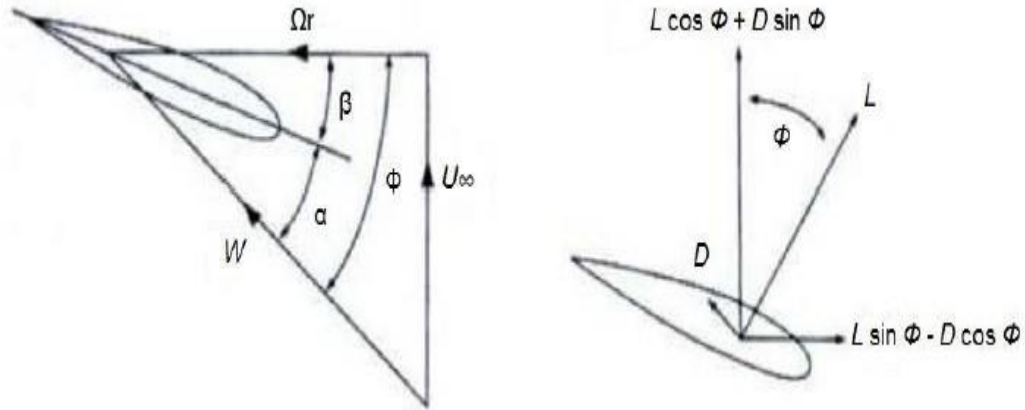


Fonte: Hansen, 2008.

Segundo Silva (2012), pelo método BEM, as forças aerodinâmicas resultantes da relação das pás com o ar, realizam a variação do momento angular do ar. Além disso, seções vizinhas da hélice são aerodinamicamente independentes. O escoamento radial é desconsiderado, o que resulta na consideração de um escoamento bidimensional.

Logo, teremos duas componentes, uma radial ($U_{\infty}^2(1-a)^2$) e a outra tangencial ($\Omega^2 r^2(1-a')^2$). Como pode ser visto nas figuras abaixo:

Figura 15 - Velocidades e forças atuando sobre uma seção da pá de um rotor.



Fonte: OLIVEIRA, 2017.

Após essas considerações, é possível estabelecer a equação da velocidade do ar relativa às pás, pela equação abaixo:

$$W = \sqrt{U_\infty^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (22)$$

Sendo:

- a : Fator de indução axial;
- a' : Fator de indução tangencial;
- Ω : Velocidade angular;
- W : Velocidade relativa incidente na pá.

Sendo, que os perfis são selecionados visando que o Cl/Cd seja máximo, como o objetivo de obter um C_p máximo, logo:

$$\tan \phi = \frac{U_\infty^2(1-a)^2}{\Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (23)$$

Para o rotor, o arrasto tem direção paralela ao vento e a sustentação perpendicular. A velocidade relativa, que é diferente da velocidade do vento, tem movimento de rotação perpendicular a direção do vento. Logo, essas forças podem ser determinadas a partir das

equações abaixo:

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (c(r) dr) Cl \quad (24)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (c(r) dr) Cd \quad (25)$$

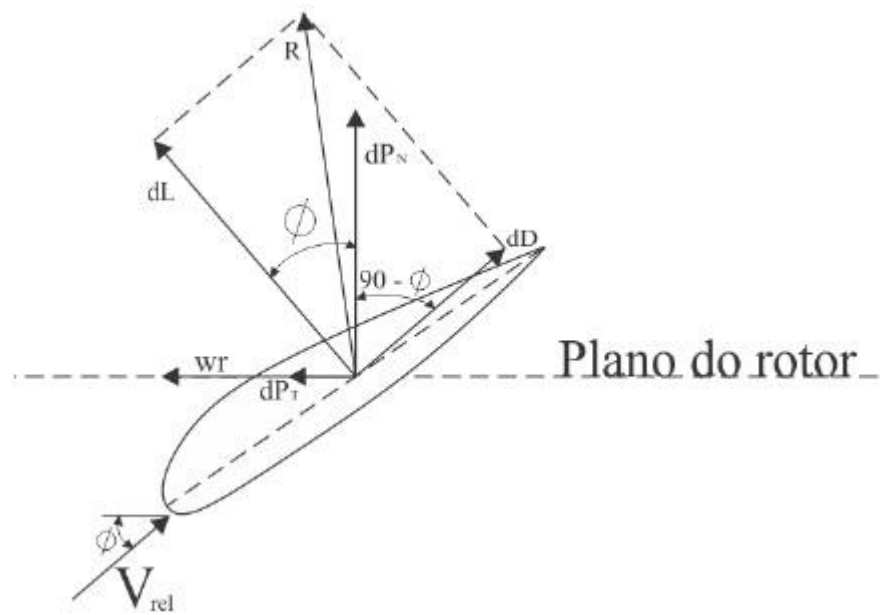
Sendo:

$c(r)$: A corda do perfil, em função do raio;

Cl : O coeficiente de sustentação;

Cd : O coeficiente de sustentação.

Figura 16 - Carregamento em uma seção de pá.



Fonte: NETO, 2019.

Logo, a força normal e tangencial ao plano do rotor, são encontradas projetando a resultante dessas forças, conforme a Figura 16. Resultando em:

$$dP_T = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (26)$$

$$dP_N = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (27)$$

Têm-se que dP_T e dP_N são componentes de força por comprimento. Essas forças atuam no anel anular (que é a área formado pelo rotor) conforme mostra a Figura 16, isso resulta em uma força normal ao plano do rotor e uma força tangencial. Logo, temos que a força normal e o torque, são:

$$dT = BP_N dr \quad (28)$$

$$dM = BP_T r dr \quad (29)$$

As variáveis P_N e P_T podem ser reescritas por formas normalizadas, e então usar o torque dM para que possa calcular a potência convertida. Tendo em vista que o coeficiente de arrasto não influenciará na força de sustentação, ou seja, será igual a zero, então:

$$dM = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c(r) dr (C_l \sin \phi) \quad (30)$$

Então, considerando a rotação e o número de pás, obtemos a potência convertida, como mostra a equação 31. Após isso, igualamos a equação 31 com a equação 32, então obtemos a equação 33 para a corda.

$$dPot = \frac{1}{2} B \rho V_{rel}^2 c(r) (C_l \sin \phi) \omega r dr \quad (31)$$

$$dPot = 0,592 \pi B \rho V_0^3 r dr \quad (32)$$

$$c(r) = \frac{0,592 \pi V_0^3}{\frac{1}{2} B \rho V_{rel}^2 C_l \sin \phi \omega} \quad (33)$$

A partir da equação 33, pode ser feita uma relação entre o comprimento da corda do perfil e o comprimento da circunferência, para obter o coeficiente de solidez. O ideal é que seja obtido um menor valor possível, pois, quanto maior, significa que existe uma maior massa para se mover, o que resulta em uma velocidade menor e como consequência

uma menor produção de corrente elétrica. Logo, temos a equação 34, que descreve o coeficiente de solidez:

$$\sigma(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (34)$$

Temos que, o empuxo é:

$$dT = 4\rho\pi V_0^2 a(1-a)rdr \quad (35)$$

Logo, é possível encontrar expressões para os fatores de indução axial e tangencial, que são demonstrados pelas equações 36 e 37 respectivamente.

$$a = \frac{1}{\frac{4sen^2\varphi}{\sigma C_n} + 1} \quad (36)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4sen\varphi cos\varphi}{\sigma t} - 1} \quad (37)$$

4.2 Método dos Painéis

Para o caso estudado nesse trabalho, o foco será o método dos painéis de escoamento de vorticidade linear simples. O método dos painéis é um método numérico que se baseia numa distribuição de elementos de escoamento potencial na superfície do corpo, reduzindo a solução em encontrar a intensidade destas singularidades, válido apenas para escoamentos incompressíveis e invíscidos (KATZ; PLOTKIN, 1991). Segundo Silva (2005), se considerarmos o corpo estudado, como tendo um escoamento potencial, bidimensional e incompressível, tem-se as seguintes condições iniciais:

$$\nabla^2\phi(r) = 0 \quad (38)$$

$$\nabla\phi(r) \cdot n = \frac{\partial\phi}{\partial n} = 0 \quad (39)$$

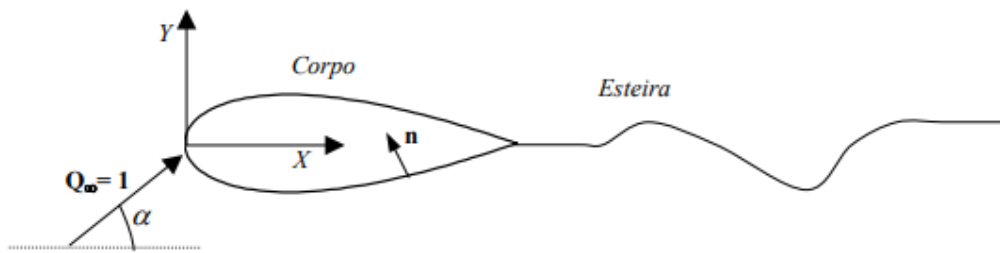
$$\lim_{r \rightarrow \infty} \nabla\phi(r, t) = 1 \quad (40)$$

As velocidades podem ser obtidas pelas coordenadas cartesianas da seguinte maneira:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial X} \quad (41)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad (42)$$

Figura 17: Descrição do Sistema de Coordenadas fixo no corpo.



Fonte: Silva (2005)

Sendo $\mathbf{n}$ a normal unitária que aponta no sentido exterior à superfície. Usando a identidade de Green, é possível construir uma solução geral, da seguinte maneira:

$$\phi(r) = \phi_\infty + \frac{1}{2\pi} \int \left(q \ln r - \mu \frac{\partial}{\partial n} \ln r \right) dS \quad (43)$$

Sendo:

σ : Intensidade da fonte;

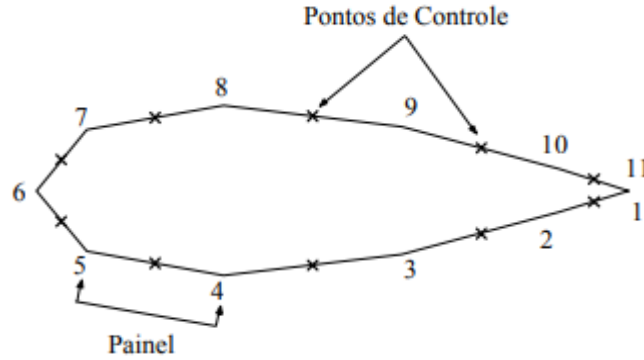
μ : Intensidade do dipolo;

n : Normal unitária, aponta no sentido exterior à superfície;

ϕ : Escoamento potencial ao redor do corpo.

Segundo Silva (2005), o aerofólio de maneira a ser estudado, pode ser separado (discretizado) em N painéis retos, ao longo da superfície do corpo, e nesses painéis serão distribuídos vórtices. As intensidades desses vórtices podem apresentar distribuição constante ou linear ao longo do painel.

Figura 18: Demonstração de um aerofólio discretizado.



Fonte: Silva (2005)

E no caso de distribuição linear, a equação pode ser descrita da seguinte forma:

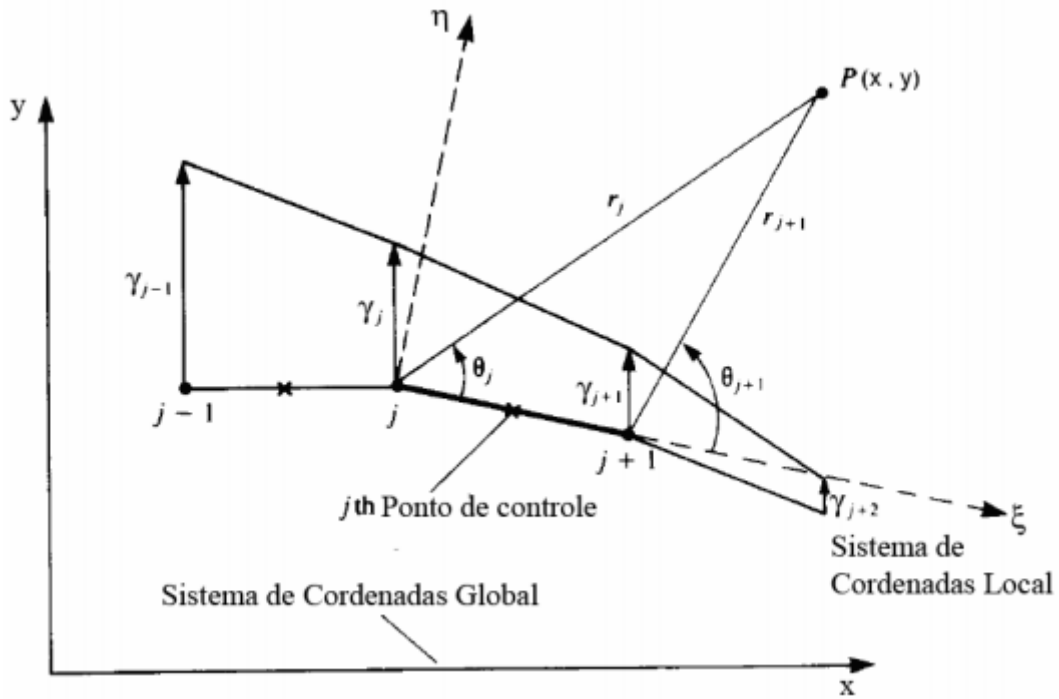
$$\left\{ \left(\sum_{j=1}^N \gamma_j A_j + \gamma_{j+1} A'_j \right) + \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j B_j + \lambda_{j+1} B'_j \right) \right\} \cdot n = -\nabla \phi_\infty \cdot n \quad (44)$$

Sendo A_j e B_j coeficientes de influência, que variam de acordo com a geometria do corpo, e γ a intensidade dos vórtices. Segundo Silva (2005) adota-se a condição de Kutta quando se tem escoamentos permanente ao redor do aerofólio, isso ocorre para que se tenha igualdade na superfície superior e inferior do bordo de fuga. Essa condição pode ser representada da seguinte forma:

$$\gamma_1 + \gamma_{N+1} = 0 \quad (45)$$

Utilizando a mesma nomenclatura de Vargas e Katz e Plotkin (1991). De acordo com a imagem abaixo.

Figura 19: Nomenclatura utilizada na formulação de distribuição de vórtice linear



Fonte: Vargas (2006)

Logo a velocidade induzida, em um determinado ponto P, no painel j será:

$$u_{\xi,n} = \frac{\gamma}{2\pi} \left(\frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{x_{j+1} - x_j} \right) \ln \frac{r_{ij+1}}{r_{ij}} + \frac{\gamma_j(x_{j+1} - x_j) + (\gamma_{j+1} - \gamma_j)(x - x_j)}{2\pi(x_{j+1} - x_j)} \quad (46)$$

$$v_{\xi,n} = \frac{\gamma}{2\pi} \left(\frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{x_{j+1} - x_j} \right) \times \left[\frac{x_{j+1} - x_j}{z} + (\theta_{j+1} - \theta_j) \right] - \frac{\gamma_j(x_{j+1} - x_j) + (\gamma_{j+1} - \gamma_j)(x - x_j)}{2\pi(x_{j+1} - x_j)} \ln \frac{r_{ij+1}}{r_{ij}} \quad (47)$$

Sendo $u_{\xi,n}$ e $v_{\xi,n}$ as velocidades induzidas, no sistema de coordenadas locais, θ o ângulo formado pelos pontos de controle e o painel, r a distância do ponto de controle ao vértice do painel. Utilizando a Equação 48, transforma-se a matriz de velocidades do sistema de coordenadas locais para o sistema de coordenadas globais.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_{x,y} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_{\xi,n} \quad (48)$$

Logo, aplicando a condição de Kutta, chegamos ao sistema linear de dimensão $N+1 \times N+1$, conforme mostrado abaixo.

$$\begin{pmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,N} & A_{1,N+1} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,N} & A_{2,N+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ A_{N,1} & A_{N,2} & \dots & A_{N,N} & A_{N,N+1} \\ 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_N \\ \gamma_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \\ 0 \end{pmatrix} \quad (49)$$

Sendo:

$$A_{i,j} = (u, v)_{i,j} \cdot n_i \quad (50)$$

$$b_i = V_\infty \cdot n_i \quad (51)$$

Importante notar que u e v representam as velocidades induzidas no sistema de coordenadas globais. Depois de resolver sistema linear, pode se calcular o coeficiente de pressão através da equação abaixo, e o coeficiente de sustentação pode ser determinado pela sua integração sobre a superfície do corpo.

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} = 1 - \frac{V_{ti}^2}{V_\infty^2} \quad (52)$$

Sendo V_{ti} a velocidade tangencial em cada ponto, podendo ser calculado pela equação abaixo:

$$\begin{aligned} V_{ti} &= V_\infty \cos(\theta_i - \alpha) + \\ &\sum_{j=1}^N \left[\frac{q_j}{2\pi} \sin(\theta_i - \theta_j) \beta_{ij} - \cos(\theta_i - \theta_j) \ln \frac{r_{ij+1}}{r_{ij}} \right] + \\ &\frac{\gamma}{2\pi} \sum_{j=1}^N \left[\ln \frac{r_{ij+1}}{r_{ij}} \sin(\theta_i - \theta_j) + \beta_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \right] \end{aligned} \quad (53)$$

4.3 XFOIL

De acordo com Ribeiro, 2009, o XFOIL realiza a análise de forma que os coeficientes aerodinâmicos em duas dimensões, são em funções do ângulo de ataque. O número de Reynolds, para uma determinada seção de pá é obtida usando a solução do programa XFOIL.

No código XFOIL, as equações permanentes de Euler na forma integral são usadas para representar o escoamento invíscido, e um método integral de dissipação compressível com atrasos é usada para representar as camadas limites e a esteira. Os

escoamentos viscosos e invíscidos estão completamente acoplados através da substituição da espessura. A formulação invíscida do XFOIL é uma função do método dos painéis de escoamento de vorticidade linear simples. A espessura da base de um segmento de vórtice é modelada com o painel fonte. As equações são próximas com uma condição explícita de Kutta. O cálculo invíscido de alta resolução com 160 painéis requer frações de segundos para ser executado num PC. (RIBEIRO, 2009).

O XFOIL calcula o arrasto a partir do momento da esteira à jusante, além disso, calcula os coeficientes de sustentação e de momento, utilizando a integração da pressão da superfície direta.

4.4 QBlade

Através das pesquisas bibliográficas, foram pesquisados programas computacionais que permitissem a simulação do aerogerador, para diferentes formatos de pás. O que mais se destacou, e que foi selecionado foi o QBlade Wind Turbine Design and Simulation. É um programa de código aberto, integrado ao software XFOIL, que realiza simulações de turbinas eólicas, foi desenvolvido pelo Institute for Fluid Dynamics and Technical Acoustics, antigo Hermann Föttinger da Technische Universität Berlin (TU Berlin). O QBlade utiliza o método Blade Element Method – BEM (Método de elemento da pá), sendo capaz de avaliar o comportamento da turbina eólica, como as forças geradas pelos coeficientes C_l e C_d do aerofólio em várias seções ao longo da pá. São geradas diversas equações que são resolvidas iterativamente por esse método.

Segundo Moraes, 2017, o QBlade funciona como um pós-processador para simulações de turbinas eólicas, e permite uma análise mais minuciosa, pois, permite detalhes mais aprofundados das variáveis de pá e rotor. Esse software é frequentemente avaliado por universidades e empresas, além de permitir ao usuário projetar aerofólios personalizados. Outros aspectos importantes a ressaltar é que ele permite funcionalidades muito interessantes como: o projeto e otimização avançados de pás eólicas de perfis criados pelo próprio usuário ou importados, contém a visualização 3D das pás, a definição da turbina eólica (pás do rotor, tipo de gerador, perdas etc.), e o desempenho do rotor.

Ceyhan (2008) mostra o poder da ferramenta BEM. Foram obtidos os dados aerodinâmicos da pá de uma turbina que foi testada experimentalmente e depois validada pelo método numérico. Projetando uma turbina eólica capaz de gerar até 100 kW de potência, utilizou algoritmo para otimizar a aerodinâmica da pá. Essa combinação pode

gerar novas pás de uma turbina, melhorando entre 40 e 80% a sua produção. Essa metodologia foi empregada numa pá de 25 m de comprimento. Com a otimização, observou uma maior potência gerada reduzindo em 5 metros a pá. (MORAIS, 2017).

5 Metodologia

5.1 Condições adotadas

5.1.1 Escolha da temperatura

Visando analisar as pás para uma implementação na UFERSA, a temperatura de trabalho escolhida foi de 28° C, obtida através da Tabela 1, onde observa-se a temperatura média em cada mês em Mossoró .

Tabela 1 - Média da temperatura por mês em Mossoró.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	28.6	28.2	27.8	27.7	27.3	27	27.3	27.8	28.3	28.6	28.9	28.3
Temperatura mínima (°C)	23.6	23.5	23.5	23.2	22.5	21.9	21.7	21.9	22.5	23	23.5	23.1
Temperatura máxima (°C)	33.6	32.9	32.2	32.3	32.1	32.2	32.9	33.7	34.1	34.3	34.4	33.6

Fonte: Climate-data.Org

5.1.2 Velocidade do vento

Tendo como fundamento Moraes, Sobrinho e Santos et. (2014), a velocidade do vento a uma altura de 10 metros, na UFERSA, terá uma média de 3,32 m/s, como podemos ver na Tabela 4.

Tabela 2 -Velocidade média do vento a 2 m e a 10 m de altura, na UFERSA em Mossoró, para série histórica de 2000 a 2012.

Estatística descritiva	V10 (m s ⁻¹)	V2 (m s ⁻¹)
Média	3,32	2,30
Erro padrão	± 0,07	± 0,06
Mediana	3,30	2,27
Desvio Padrão	0,90	0,75
Variância	0,80	0,56
Intervalo	3,60	2,76
Mínimo	1,72	1,04
Máximo	5,32	3,80
Soma	518,10	358,72
Contagem	156	156

Fonte: Moraes, Sobrinho e Santos et. al (2014)

5.2 Premissas para o projeto

Conforme norma internacional IEC-NORM 61400-2 (2013), geradores de pequeno porte horizontais são definidos como os que têm rotores com área de até 200 m² (Com diâmetro menor que 16m). Considerando uma média de 350 W/m², isto significa uma potência máxima de 70 kW. Nesse caso, a torre não pode ser mais alta que 20m. (IEC, 2013). (BRETSCHNEIDER, 2017).

Segundo Wind Power Generation and Wind Turbine Design as turbinas eólicas mais modernas possuem coeficientes de potência por volta de 52%, mas essas turbinas possuem aerofólios especialmente desenvolvidos para suas condições de serviço e muitos desses aerofólios são segredos industriais e patentes dentro da indústria de geração eólica. Para aerofólios disponíveis para o público em geral, em sua maioria aerofólios da indústria aeronáutica, as turbinas eólicas possuem um limite de coeficiente de potência por volta de 45%. (FREITAS, 2014).

5.3 Definições para a potência

A potência que será gerada pela turbina depende de uma série de fatores, como a velocidade do vento, raio do rotor e o coeficiente de potência. Na Equação 54, podemos ver como esses fatores se relacionam entre si:

$$D = \sqrt{\frac{8P}{\pi C_p \eta_m \rho v^3}} \quad (54)$$

Sendo:

D : Diâmetro do rotor;

C_p : Coeficiente de potência;

η_m : Rendimento mecânico da turbina;

ρ : Densidade do ar;

v : Velocidade do vento;

P : Potência gerada;

A primeira definição será da densidade do ar, como visto no tópico 3.1.1 a temperatura média é igual a 28°C, então utilizando como referência o Incropera (2013),

foi obtido um valor de 1,158 Kg/m² para a densidade do ar.

Como uma das propostas do presente trabalho é escolher, um modelo de aerofólio, para uma possível implementação de um aerogerador na UFERSA, características favoráveis seriam uma torre com a menor altura possível, assim como um raio relativamente pequeno para rotor, com a intenção de reduzir os gastos.

Logo, para definirmos a potência, temos que primeiro definirmos o rendimento. Segundo o Wind Power Generation and Wind turbine Design as turbinas eólicas que tem ageometria de domínio público, possuem um limite de coeficiente de potência por volta de 45%.

Tendo em vista esses fatores, foi confeccionado um modelo em planilha eletrônica, relacionando a Equação 55 com a Equação 56, para que fosse definido a potência, altura da torre e o raio do rotor. Logo, foi visto que ao contrário do objetivo inicial, de uma construção de menor custo, o rotor irá gerar uma potência mais interessante, a uma altura de 20 metros. Para prever a velocidade média a uma altura de 20 metros, foi utilizada a lei de Hellman como mostra a Equação 21, o expoente de Hellman considerado, foi de 0,4 e para uma zona rústica. Então, têm-se o seguinte:

$$V_{20} = 3,32 \left(\frac{20}{10} \right)^{0,4} = 4,38 \text{ m/s} \quad (55)$$

Além disso, para obtermos os valores do raio e potência, foram estipulados valores para os rendimentos. Os valores escolhidos foram os seguintes:

- $C_p = 40 \%$
- $\eta_m = 90 \%$

Esses valores foram selecionados, tendo em vista que o máximo C_p para perfis de domínio público é de 45%, logo foi selecionado um valor inicial abaixo do valor máximo, e para o η_m foi selecionado tendo em vista que o rendimento mecânico de um aerogerador varia de 80% a 90%. Logo, tendo em posse esses valores, é possível fazer a seleção do raio do rotor/potência gerada, priorizando a geração da potência de energia, foi definido o raio do rotor como 3,5 metros, com isso temos conforme mostra a Equação 56:

$$P = \frac{D^2 \pi C_p \eta_m \rho v^3}{8} = 758,42 \text{ W} \quad (56)$$

Vale ressaltar, que, esses parâmetros foram adotados para que se tenha um parâmetro inicial do projeto, ou seja, foi definido um alvo (uma meta para o projeto), de acordo com a proposta para esse projeto.

5.4 Escolha dos perfis a serem analisados

5.4.1 Pré-seleção dos perfis

Para as condições gerais alguns perfis se mostraram interessantes, tanto pela quantidade de estudos sobre eles quanto facilidade de fabricação, que é um fator importante na hora de se escolher um aerofólio, logo, foi primeiramente realizada uma pré-seleção, para após isso escolhermos os dois melhores perfis que se enquadram no caso, para serem analisados fluido dinamicamente.

Existem várias padronizações de perfis, como por exemplo os perfis da NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), comitê que precedeu a NASA (National Aeronautics and Space Administration), que hoje também possui perfis padronizados, e perfis BOEING. Atualmente, as pás dos aerogeradores não são fabricadas apenas com um perfil e sim com a combinação de dois ou mais perfis. Isso possibilita uma pá com o perfil ideal para cada característica de escoamento do vento pelo seu comprimento (SANCHI, 2020). Tendo em vista essas vantagens, e com base no estudo realizado por Sancha (2020), os perfis NACA pré-selecionados, são os perfis NACA 4415 e NACA 4418.

Segundo Lyon (1998), o perfil S822, S823 e S834 projetado pelo laboratório americano especializado NREL, proporciona vantagens estruturais e aerodinâmicas em comparação aos aerofólios desenhados para aeronaves e adaptados para turbinas eólicas.

De acordo com Selig e McGranahan (2003), O perfil E 387 apesar de criado em 1960 ainda continua sendo utilizado atualmente, além disso é um dos perfis para baixo número de Reynolds, mais testadas, aumentando então a quantidade de informações que podem ser obtidas sobre esse perfil.

Segundo Selig e McGranahan, 2003, FX 63-137, projetado por F.X. Wortmann tem sido usado para várias aplicações de baixo número de Reynolds, devido a sua alta sustentação e por apresentar um bom desempenho global.

Além desses, os perfis SG 6041, SG 6042 e SG 6043 se mostraram muito interessantes, para serem testados para a proposta do presente trabalho. Esses perfis são

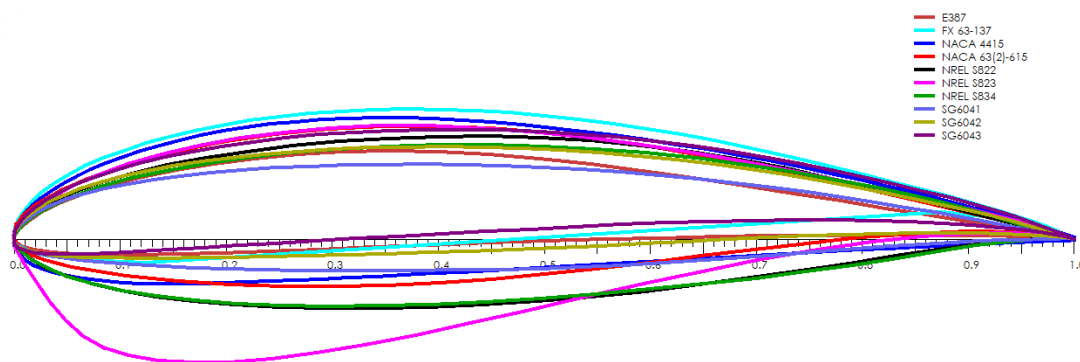
bastante utilizados em situações de baixo número de Reynolds. Tendo como base Pereira e Tudida (2015), pode-se perceber a eficiência, principalmente do perfil SG 6043 em comparação a outros perfis de domínio público, para um aerogerador de baixa velocidade.

6 Resultados e discussão

6.1 Seleção do perfil

Para realizar a análise dos perfis, foi utilizado o software QBlade. Tendo em posse, as coordenadas dos perfis pré selecionados, estas foram postas no software, gerando a Figura 20.

Figura 20 - Modelos dos perfis pré-selecionados no software QBlade.

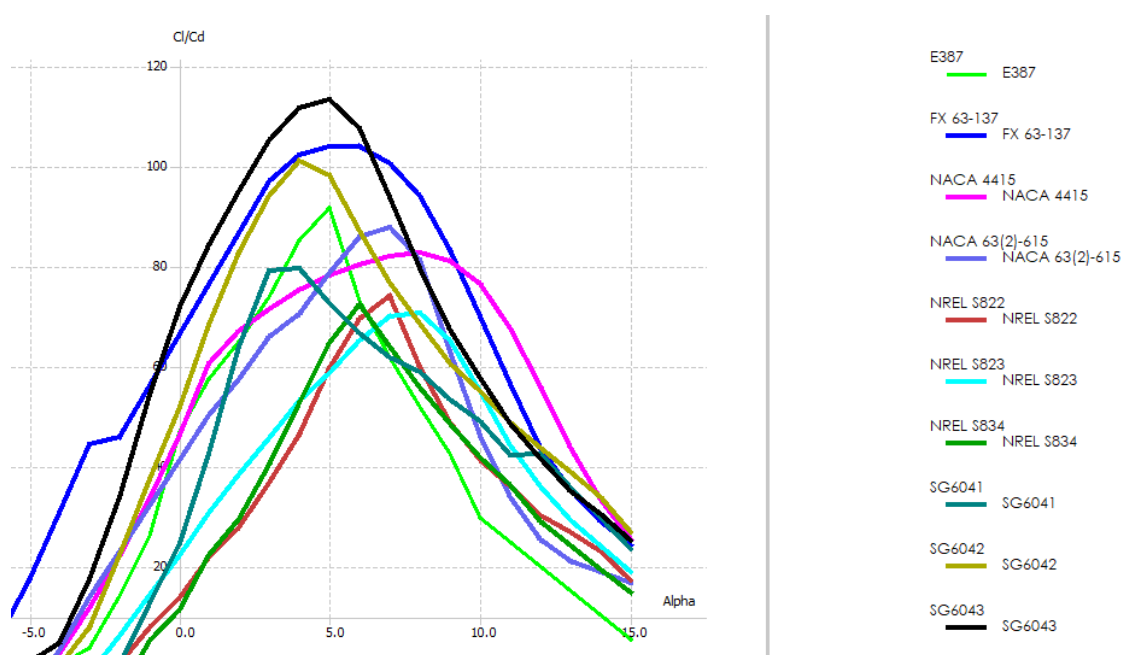


Fonte: Autoria própria.

Para a análise dada as condições de serviço já definidas, foi calculado o número de Reynolds sendo o valor da corda igual a 1 metro. Com isso, e o que já foi definido anteriormente, calcula-se o número de Reynolds.

$$Re = \frac{1,16 \times 4,38 \times 1}{1,85 \times 10^{-5}} = 273899,7 \quad (57)$$

Após ter calculado, as condições de uso (os parâmetros a serem utilizados), foram aplicados esses parâmetros no software QBlade, para obter os fatores como coeficiente de potência e o C_l/C_d para cada perfil pré selecionado. Com essas informações para cada perfil foi montado o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Variações do C_l/C_d dos perfis pré-selecionados.

Fonte: Autoria própria.

O gráfico foi gerado no software Qblade, e mostra os valores de C_l/C_d pelo ângulo de ataque para os perfis pré-selecionados, para uma melhor visualização dos valores foi feita a Tabela 5.

Tabela 3 - Propriedades dos perfis para as condições adotadas.

	CL/CD	Ângulo
E 387	91.75	5°
NACA 0010	36.00	4°
NACA 4415	83.00	8°
NACA 63(2)-615	87.80	8°
FX 63-137	104.00	5°
NREL S822	74.00	7°
NREL S823	71.00	8°
NREL S834	72.50	6°
SG 6041	79.50	4°
SG 6042	101.00	4°
SG 6043	113.50	5°

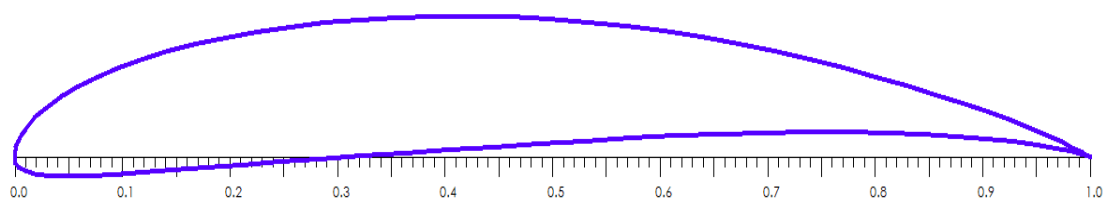
Fonte: Autoria própria.

Para a escolha do perfil, é selecionado o perfil que tem o maior valor para a relação C_l/C_d , devido esse apresentar um maior coeficiente de sustentação em relação ao coeficiente de arrasto no ponto máximo, dentre os perfis estudados. Logo, a escolha é o modelo SG6043, para um ângulo de ataque de 5° .

6.2 Modelagem para o perfil selecionado

Uma melhor visualização do perfil selecionado pode ser feita através da Figura 21.

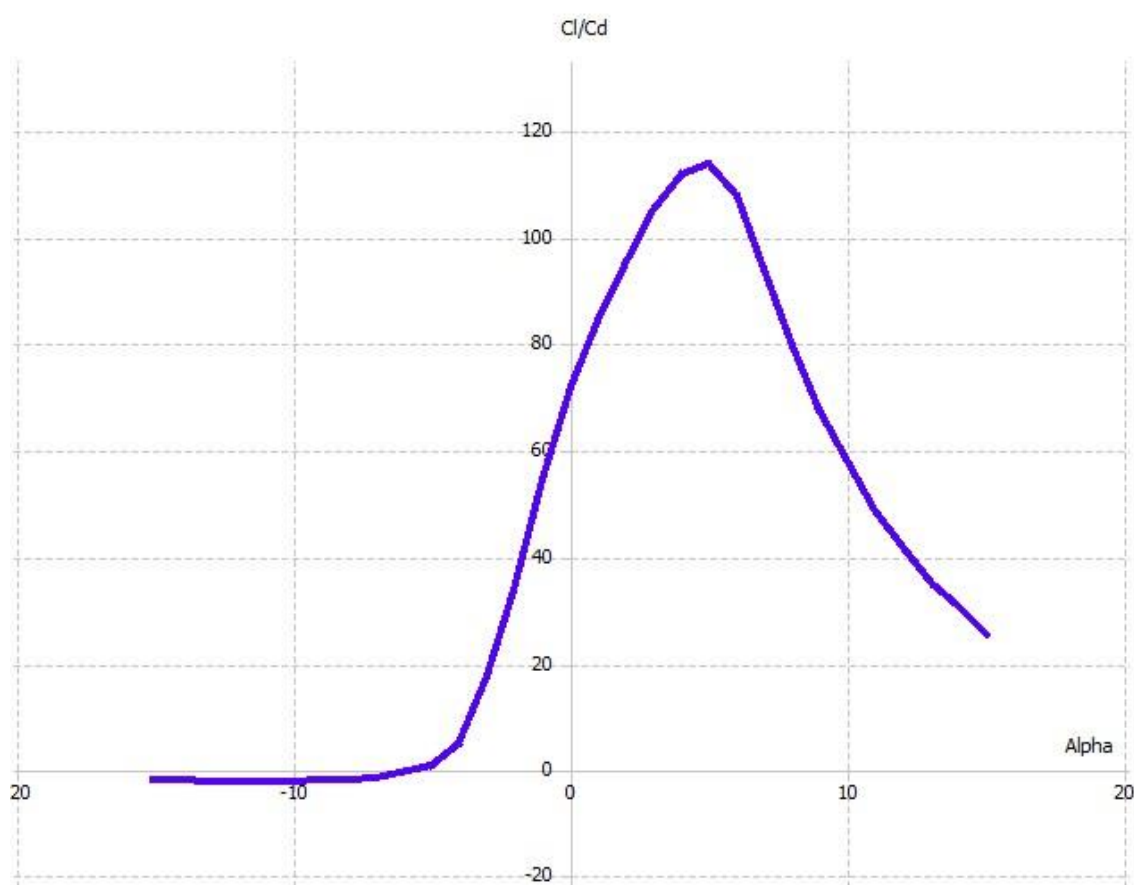
Figura 21 – Modelo do perfil selecionado.



Fonte: Autoria própria.

Além disso, também pode ser visto de forma mais detalhada, o comportamento do C_l/C_d em detrimento do ângulo, do perfil selecionado, pelo do Gráfico 2. Esse foi o critério utilizado para selecionar o perfil, onde o objetivo foi selecionar o perfil que tenha a maior taxa C_l/C_d e saber em que ponto essa máxima ocorre. Vale ressaltar que a comparação desse quesito entre os perfis foi feito no gráfico 1.

Gráfico 2 - Cl/Cd do perfil SG 6043



Fonte: Autoria própria

Para gerar o modelo otimizado da hélice, utilizando o software Qblade, a pá foi dividida em 20 seções de igual tamanho, conforme mostra a Tabela 5, com o intuito de que ocorresse uma melhor modelagem. Segundo Bretschneider (2017), para um aerogerador de 3 pás o TSR deve ser de 5 a 8.

Para a modelagem no software, deve ser informado TSR, então foi realizado as modelagens para quatro modelos, com otimização variada, para o TSR de 5 até 8 com o intuito de definir o melhor modelo a ser implementado.

Na Figura 22, pode ser visto a caixa de diálogo que serve para definir como a pá será otimizada, onde deve ser informado o TSR desejado, o ângulo de inclinação da pá, e a opção do modelo de seleção de tamanho de corda para o modelo. O ângulo escolhido para a simulação foi de 5° devido o fator Cl/Cd ter sido para as condições adotadas, maior nessa angulação. Para o tamanho de corda foi selecionado o modelo de Betz.

Além disso, de acordo com o modelo de Betz o cubo deve ter o tamanho de 15% do tamanho do raio da pá, logo, o tamanho do cubo para a simulação é de 0,525 metros.

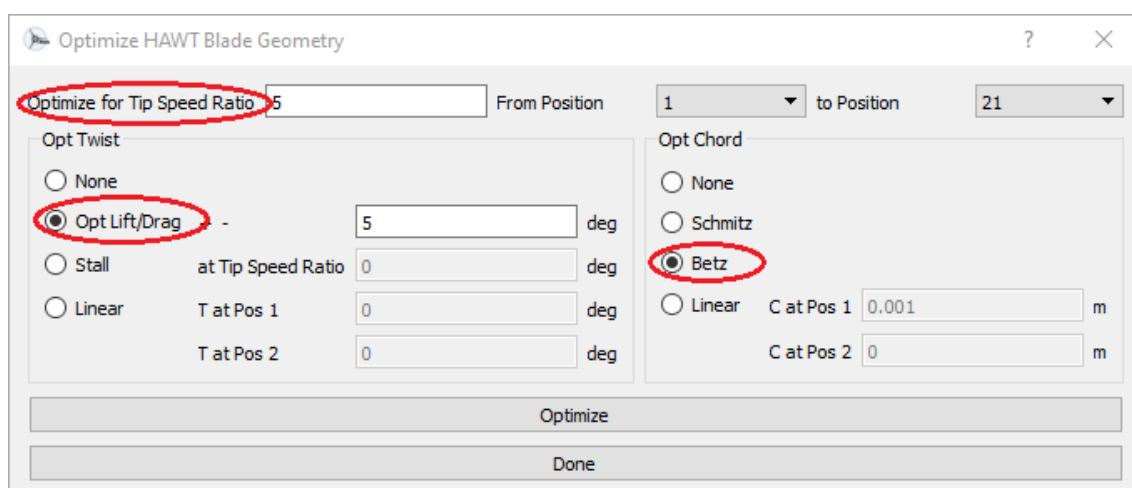
Outro fator a ser destacado, é o número de pás do aerogerador, segundo Bretschneider (2017), um aerogerador com grande número de pás, faria com que as pás tivessem uma distância muito pequena entre elas, acarretando em distúrbios de fluxo de ar, que não se normalizaria entre a passagem das pás. Em aerogeradores com três pás, o intervalo entre elas é o suficiente para que haja um menor distúrbio aerodinâmico para o mesmo caso, além de que ocorre um balanço decorrente das massas rotativas nesta configuração.

Tabela 4 - Tamanho das seções do aerogerador.

Seção	Posição em x
1	0.175
2	0.35
3	0.525
4	0.7
5	0.875
6	1.05
7	1.225
8	1.4
9	1.575
10	1.75
11	1.925
12	2.1
13	2.275
14	2.45
15	2.625
16	2.8
17	2.975
18	3.15
19	3.325
20	3.5

Fonte: Autoria própria.

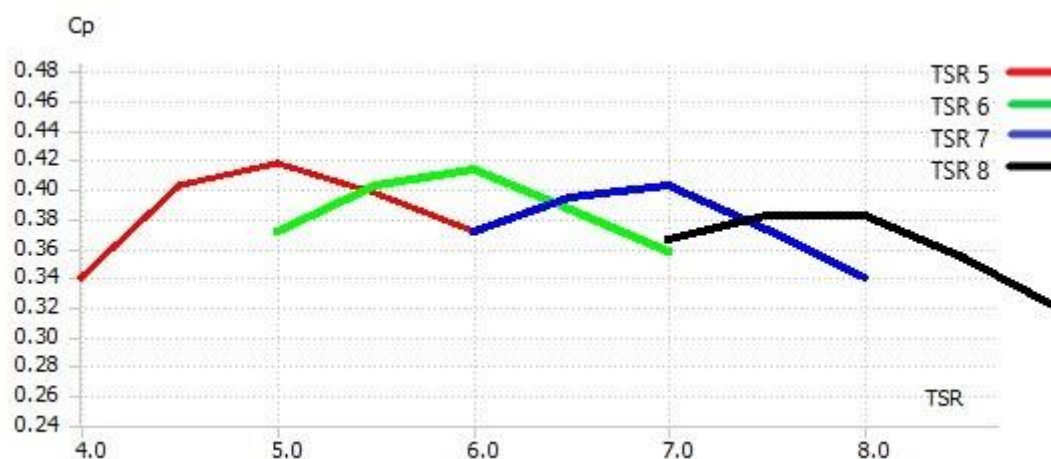
Figura 22 – Caixa de diálogo para a modelagem.



Fonte: Autoria própria.

Após a criação desses quatro modelos, foi simulado a eficiência de cada modelo pelo TSR, com o objetivo de escolher o modelo com a melhor eficiência, além disso, foi feita a variação do TSR, com o intuito de verificar que foi otimizada, realmente para o TSR definido. Pode-se ver o resultado dessa simulação na imagem abaixo.

Gráfico 3 - Coeficiente de potência pelo TSR, para cada modelo gerado.



Fonte: Autoria própria.

Logo, foi definido que o modelo mais interessante a ser utilizado nas demais simulações é o que foi otimizado para o TSR igual a 5, devido esse modelo obter um C_p maior do que os demais, conforme ilustra o Gráfico 3.

6.3 Simulação para o modelo de hélice

A partir dos resultados obtidos anteriormente, foi definido que o modelo a ser utilizado, foi o que a pá foi modelada para o TSR igual a 5. Podemos ver abaixo na tabela 7 os valores que foram obtidos para o formato da pá, esse formato foi modelado pelo software Qblade, através do método BEM, com os pontos definidos anteriormente. Além disso, pode ser visto como ficou visualmente a pá do rotor, para essa simulação, na Figura 23.

Tabela 5 - Valores obtidos com a modelagem para a pá.

Seção	Posição (m)	Corda (m)	Twist
0	0	0.2	40.6296
1	0.175	0.19	32.4762
2	0.35	0.1875	26.5222
3	0.525	0.185	22.0721
4	0.7	0.596213	13.658
5	0.875	0.531819	10.9735
6	1.05	0.479214	8.81607
7	1.225	0.435619	7.04903
8	1.4	0.399005	5.57783
9	1.575	0.36788	4.33544
10	1.75	0.341131	3.27327
11	1.925	0.3117921	2.35536
12	2.1	0.297606	1.55458
13	2.275	0.279686	0.850105
14	2.45	0.263768	0.225736
15	2.625	0.249539	-0.331331
16	2.8	0.236748	-0.831332
17	2.975	0.22519	-1.2854
18	3.15	0.214696	-1.69172
19	3.325	0.205127	-2.06445
20	3.5	0.196368	-2.40536

Fonte: Autoria própria.

Figura 23 - Representação da pá modelada.



Fonte: Autoria própria.

6.4 Simulação do desempenho do aerogerador

Para a simulação seguinte, foi necessário informar a rotação por minuto desenvolvido pelo rotor, como temos o TSR e o comprimento da pá, é possível calcular pela Equação 42.

$$N = \frac{60.V.\lambda}{2.r.\pi} = 59,76 \text{ rpm} \quad (42)$$

A partir desses dados informados, para a continuação das simulações, foi simulado com o software QBlade a potência que poderá ser extraída pelo rotor. Vale ressaltar que para essa simulação não é considerado o rendimento mecânico, além disso, a simulação foi realizado para os parâmetros anteriormente definidos durante o presente trabalho, com essa simulação foi possível obter um coeficiente de potência de 0,42 além de uma potência de 950 Watts.

7 Conclusão

Logo, podemos concluir que os objetivos do presente trabalho foram alcançados. Através do levantamento bibliográfico, foi possível compreender o comportamento das turbinas eólicas de pequeno porte, assim como estudar a sua melhor utilização (implementação). A partir do estudo bibliográfico e condições pré-definidas como a localização do aerogerador, foi possível obter as condições de trabalho do aerogerador, dessa forma foi possível selecionar o melhor perfil de pá para o aerogerador. Com a utilização do software QBlade, foi obtido os valores de Cl/Cd para os perfis pré-selecionados, e foi escolhido o SG 6043, pois, este foi o que obteve um maior valor para o Cl/Cd .

Para a simulação do comportamento do aerogerador, foi definido um aerogerador com uma torre de 20 metros de altura, para obtenção de uma maior velocidade de vento, o diâmetro escolhido foi de 7,5 metros, para uma maior obtenção de potência. Por conta do TSR obtido, e por questões de estabilidade, ruídos sonoros e custos de construção, definiu-se o aerogerador tendo 3 pás. O cubo foi definido como tendo 0,525 metros.

Após isso, com a utilização do software QBlade que utiliza o método dos painéis, foi possível modelar a pá do aerogerador. Por fim, com software QBlade utilizando o método BEM, e dos resultados anteriormente obtidos no trabalho, foi estipulado a potência produzida pela turbina, que foi de 950 W (valor que não engloba as perdas mecânicas do aerogerador), e o coeficiente de potência que foi de 0,42, como o previsto era de 40% e o máximo que poderia ser obtido, visto que o perfi é de domínio público, era de 45%, o resultado foi superior as expectativas.

Referências Bibliográficas

BARROS, Karla Cristina Silva Análise. **Aerodinâmica de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal para Microgeração de Energia Elétrica em Ambientes Rurais**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Cabo de Santo Agostinho, 2019.

BRETSCHNEIDER, Maximilian da Rosa. **Projeto e Simulação de Pás para Aerogerador Horizontal de Pequeno Porte**. 2018. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Feevale, Novo Hamburgo - RS, 2017.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Projeto e Simulação de Pás para Aerogerador Horizontal de Pequeno Porte**. 2008.

FREITAS, Raphael Viggiano Neves de. **Projeto do Protótipo de um Aerogerador para Utilização em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias na Área de Geração Eólica**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2014.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Tradução de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrine Pessoa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

JÚNIOR, Eden Rodrigues Nunes. **Metodologia de Projeto de Turbinas Eólicas de Pequeno Porte**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, 2008.

Katz, J.; Plotkin, A. **Low- Speed Aerodynamics: From wing Theory to Panel Methods**. McGraw-Hill, Inc, 1991.

LOPES, R. A. Energia Eólica. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012. MACHADO, Caio Filippo de Faria. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal**. 2014. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Rio de Janeiro, 2014.

MORAIS, A. Á. (2017). **ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA PÁ EÓLICA DO AEROGERADOR MODELO VERNE 555**. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 54A/2017, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 149p.

MORAIS, Giuliana Mairana de; SOBRINHO, José Espínola; SANTOS, Wesley de Oliveira. Caracterização da velocidade e direção do vento em Mossoró/RN. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], p. 746-754, 5 set. 2014.

NETO, J. M. B. **Projeto Aerodinâmico e Impressão 3D das Pás de um Aerogerador de Eixo Horizontal de Baixa Potência**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

OLIVEIRA, F. V. M. **Projeto de um aerogerador de baixa escala com intensificador de potência**. 2019. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

OLIVEIRA, M. S. **Análise de Pás para Aerogeradores de Eixo Horizontal Aplicados à Geração de Microenergia**. 2017. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

PEREIRA, Rafael B. S. ; TUTIDA, Victor U. C. **PROPOSTA DE PERFIS AERODINÂMICOS PARA AEROGERADORES EM BAIXAS VELOCIDADES**. 2015 Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília – UnB - Faculdade UnB Gama – Brasília, DF, 2015.

PINTO, M. D. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PIRES, Julio Cesar Pinheiro. **Estudo de Rotor para Turbina Eólica de Eixo Horizontal de Pequeno Porte com Aplicação de Modelagem e Simulação Virtual**. 2010. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul -

UFRGS, 2010.

RODRIGUES, Rafael Valotta. **SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

RIBEIRO, R. P. **Metodologia de projeto de turbinas eólicas de eixo horizontal para baixa potência**. Tese (Doutorado) | Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

RIBEIRO, Álvaro. **Análise Aerodinâmica de Asas Usando o Método VLM Acoplado ao XFOIL**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica) - Universidade Beira Interior, [S. l.], 2009.

SILVA, Amanda briggs da. **Projeto Aerodinâmico de Turbinas Eólicas**. Orientador: Su Jian. 2013. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica/UFRJ, 2013.

SILVA, Daniel Paixão da. **Desempenho aerodinâmico das pás de um aerogerador de pequeno porte, perfil NREL S809, em diferentes velocidades específicas de projeto**. 2012. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2012.

SANCHÁ, Matheus Rodrigues. **Análise Aerodinâmica e projeto mecânico dos componentes de um Aerogerador de Eixo horizontal**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, [S. l.], 2020.

VARGAS, Luiz Augusto Tavares. **Desenvolvimento e implementação de um procedimento numérico para cálculo de conjuntos asa-empenagens de geometria complexa em regime de voo subsônico, assimétrico e não linear**. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

VIEIRA, Pâmela Larissa de Sousa. **Análise da Influência Geométrica de geradores de**

vórtices aplicados em Turbinas eólicas de Pequeno Porte. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Semi-Árido, 2018.

SELIG, M. S.; MCGRANAHAN, B. D. **Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines.** University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois: NREL - National Renewable Energy Laboratory, 2003. v. 4.

SILVA, Daniel Fonseca De Carvalho. **Simulação Numérica do Escoamento ao redor de Aerofólios Via Método de Vórtices Associado ao Método dos Painéis.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005.