



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA - DE
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

GEORGE LOPES MORAIS

PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA

CARAÚBAS-RN

2018

GEORGE LOPES MORAIS

PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de Engenharia mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador Prof. Dr. Rafael Luz Espindola.

CARAÚBAS-RN

2018

© 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.

MM832 Morais, George Lopes.
p PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE UMA TURBINA
 EÓLICA / George Lopes Moraes. - 2018.
 45 f. : il.

 Orientador: Rafael Luz Espindola.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2018.

 1. Energia Renovável. 2. Aerogerador. 3.
Projeto aerodinâmico. I. Espindola, Rafael Luz ,
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.

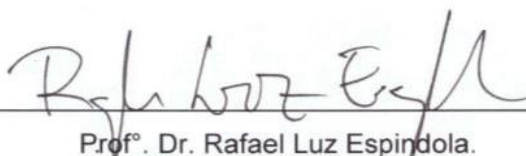
GEORGE LOPES MORAIS

PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de Engenharia mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia mecânica.

APROVADO EM: 17 / 04 / 2018

BANCA EXAMINADORA



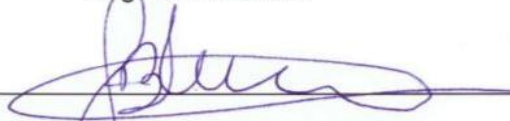
Prof. Dr. Rafael Luz Espindola.

Presidente



Prof. Dr. Dorgival Albertino da Silva Junior

Segundo Membro



Prof. Dr. Jackson de Brito Simoes

Terceiro Membro

Dedico esse trabalho aos meus amados pais **Lindecia Lopes da Silva** e **Jady Clesio José de Moraes** (*in memorian*), que sempre me apoiaram, e proporcionaram uma ótima educação.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por me dar saúde e sabedoria. A toda minha família, que me apoiou e lutaram junto comigo para a realização desse sonho.

Ao orientador deste trabalho, Rafael Luz, pelas contribuições e auxílios durante toda etapa de aprendizagem da aerodinâmica.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo projetar pás de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte, partindo de uma metodologia simplificada para determinação de um perfil aerodinâmico, seguido pela obtenção da corda de cada elemento e suas respectivas forças atuantes em cada elemento. Esse estudo é fundamental para o projeto de uma turbina eólica, uma vez que as pás realizam interação com o vento, sendo o componente responsável por captar parte da energia do vento. Através da ferramenta computacional XFLR5 foram feitas simulações aerodinâmicas com intuito de obter parâmetros de cada perfil analisado e com isso definir o melhor perfil para aplicação em um aerogerador de pequeno porte. O perfil selecionado teve bom desempenho dada as condições de projeto.

Palavras-chave: Energia renovável. Aerogerador. Projeto aerodinâmico.

ABSTRACT

The present work aims to design blades of a wind turbine of small horizontal axis, starting from a simplified methodology to determine an aerodynamic profile, followed by obtaining the rope of each element and its respective forces acting on each element. This study is fundamental for the design of a wind turbine, since the blades interact with the wind, being the component responsible for capturing part of the energy of the wind. Through the XFLR5 computational tool, aerodynamic simulations were performed with the purpose of obtaining parameters of each profile analyzed and with that to define the best profile for application in a small wind turbine. The selected profile performed well given the design conditions.

Keywords: renewable energy. Wind turbine. Aerodynamic design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Conversão de energia	13
Figura 2: Tipos de aerogeradores	14
Figura 3 : Classificação das turbinas.....	15
Figura 4 : Componentes de um aerogerador.....	16
Figura 5 : Numero de pás variando de acordo com o TSR.	19
Figura 6: Fluxo de ar em torno de um aerogerador.....	21
Figura 7: Coeficiente de potência em função do TSR	22
Figura 8: Geometria de um perfil aerodinâmico	23
Figura 9: Velocidades de fluxo e forças atuantes no perfil	24
Figura 10: Velocidades atuantes	25
Figura 11: Forças resultantes.....	27
Figura 12: Fluxograma	28
Figura 13: Perfil NACA 0010	30
Figura 14: Curva polar C_L em função de C_D	31
Figura 15: Relação entre sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque	31
Figura 16: Perfil FX 63-137	32
Figura 17: Curva polar C_l em função de C_d	33
Figura 18: Relação entre sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque	33
Figura 19 : Elementos de pá	36
Figura 20: Pá eólica	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de velocidade de ponta de acordo com número de pás	20
Tabela 2: Perfil aerodinâmico NACA 0010	32
Tabela 3: Perfil aerodinâmico FX 63-137	34
Tabela 4: Elementos de pás e seus respectivos parâmetros	37
Tabela 5: Corda e componente da velocidade relativa	38
Tabela 6: Componentes de força	39

LISTA DE SIMBOLOS

A_v Área varrida pelo rotor

B Número de pás

c Corda

C_p Coeficiente de potência

C_L Coeficiente de sustentação

C_D Coeficiente de arrasto

D_r Diâmetro do rotor

D Força de arrasto

F_N Componente de força normal

F_T Componente de força tangencial

L Força de sustentação

P Potência da turbina

r distância do centro do rotor até o elemento de pá

R Raio do rotor

U_∞ Velocidade nominal do vento

W Velocidade relativa

α Ângulo de ataque

β Ângulo de passo

β_r Ângulo de passo local

ϕ Ângulo de fluxo

ϕ_r Ângulo de fluxo local

λ Relação de velocidade de ponta

λ_r Relação de velocidade de ponta local

ρ Massa específica do ar

Ω_r Velocidade angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.2 Objetivos Específicos	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 TIPOS DE AEROGERADORES	14
2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES	16
2.2.1 Rotor	16
2.2.2 Pás	17
2.2.3 Anemômetro	17
2.2.4 Sistema de passo	17
2.2.5 Freio	18
2.2.6 Eixo de alta velocidade	18
2.2.7 Eixo de baixa velocidade	18
2.2.8 Gerador	18
2.2.9 Caixa multiplicadora	18
2.2.10 Mecanismo de direção	18
2.2.11 Nacele	18
2.2.12 Torre	19
2.3 NÚMERO DE PÁS	19
2.3.1 Relação de velocidade de ponta local	20
2.4 LEI DE BETZ	20
2.5 GEOMETRIA DE UM PERFIL	22
2.6 MÉTODO SIMPLIFICADO DE DESENHO DE PÁS	23
2.7 FORÇAS ATUANTES EM UM PERFIL AERODINÂMICO	24
2.7.8 Teoria de elemento de pá	24
3 MATERIAIS E METODOS	28
3.1 SIMULAÇÕES DOS PERFIS	28
3.1.1 Método computacional	28
3.2 ESCOLHA DO PERFIL	29
3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO	29

3.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS PARA PROJETO	29
4 RESULTADOS	30
4.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO SIMPLIFICADO DE DESENHO DE PÁS	36
5 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE A – GEOMETRIA NACA 0010	44
APÊNDICE B – GEOMETRIA FX 63-137	45

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente preocupação com o meio ambiente, atrelado a futura escassez de algumas fontes de energia, o homem vem buscando métodos de geração de energia utilizando fontes sustentáveis. Nos últimos anos, a energia eólica vem se destacando como uma das fontes de energia renováveis mais promissoras, devido a sua natureza inesgotável e não poluidora. Com isso, estudos e desenvolvimentos de aerogeradores vem crescendo cada vez mais, buscando melhorias e maiores eficiências.

Com o progresso tecnológico, sabe-se que em 2015, aproximadamente 81% da energia consumida no planeta são provenientes de combustíveis fósseis, os quais favorecem o aquecimento global, que é a elevação da temperatura da superfície terrestre devido à liberação dos gases do efeito estufa. No entanto, a Ciência busca alternativas nas fontes renováveis para minimizar os danos causados e usufruir dessas matrizes energéticas que são derivadas de: água, vento, biomassa e sol, fontes menos poluentes e abundantes (REN21, 2016).

Diante das fontes de energias renováveis existentes, a eólica vem apresentando um crescente aumento nos últimos anos devido a vários motivos, tais como os incentivos governamentais; o alto grau de desenvolvimento que esta tecnologia vem apresentando; além da sua confiabilidade. O elevado grau de progresso atingido pela indústria eólica foi alcançado devido ao crescimento histórico desta tecnologia, que teve início com os moinhos de vento até chegar nas modernas turbinas eólicas utilizadas atualmente (MARQUES, 2004).

Ao final do século XIX, o uso da energia elétrica começou a crescer no mundo, diante disto, foram surgindo as primeiras turbinas eólicas. Contudo, pode-se dizer que a avançada tecnologia das turbinas eólicas surgiu na Dinamarca na década de 1950, já com pás fabricadas com materiais compostos, controle de passo e torres na forma tubular e esbelta (RUNCOS *et al.*, 2004).

Sabe-se que diversos fatores são responsáveis pela quantidade de energia a ser produzida por uma turbina eólica, onde os principais são o tamanho e perfil aerodinâmico das pás, eficiência dos componentes elétricos e mecânicos e a constância e regime de vento da região.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

- Dimensionar as pás de um aerogerador de pequeno porte.

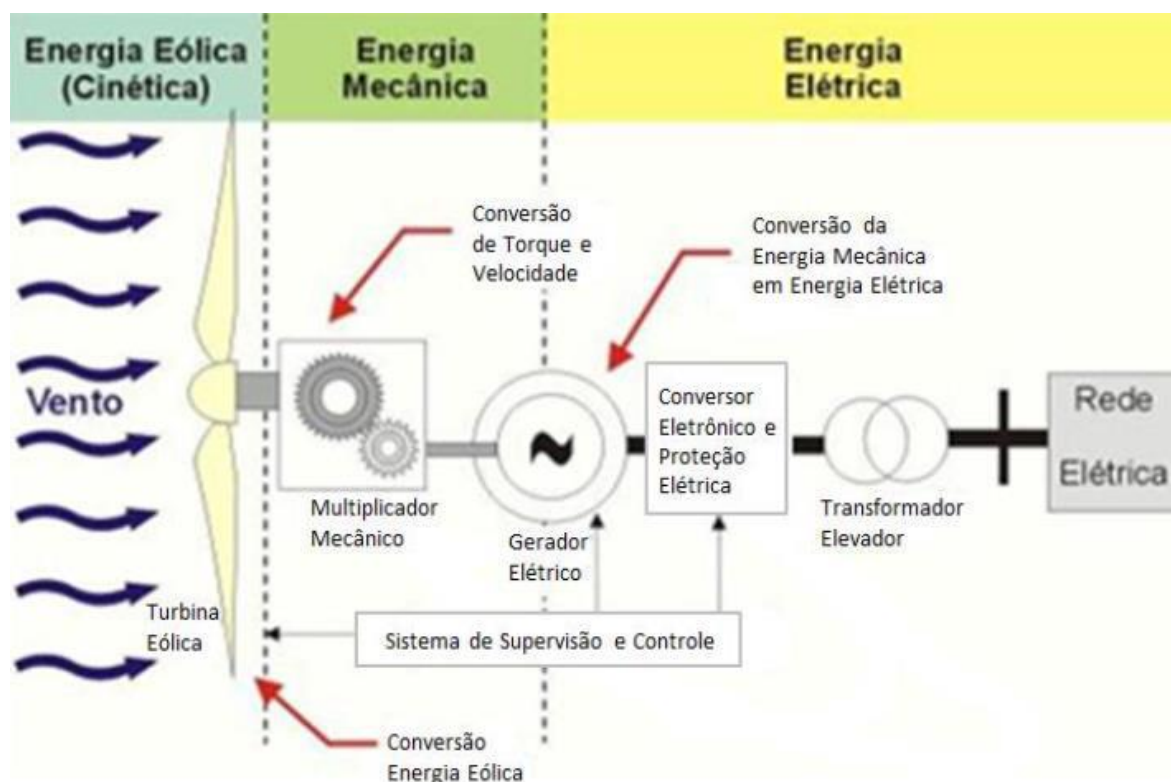
1.2 Objetivos Específicos

- Comparar perfis aerodinâmicos;
- Efetuar uma análise aerodinâmica de perfis.
- Obter os parâmetros necessários para o projeto de pás eólicas;
- Projetar pás eólicas, com base no melhor perfil aerodinâmico analisado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Aerogeradores são máquinas desenvolvidas para converter parte da energia cinética dos ventos em energia elétrica. Essa energia cinética captada pelas pás do rotor é convertida em energia rotacional, para em seguida ser transferida por um eixo para o gerador, responsável por converter a energia mecânica em elétrica. A Figura 1 ilustra esse processo.

Figura 1: Conversão de energia



Fonte: RESEARCHGATE (2018)

Um dos meios de classificar essas máquinas, é de acordo com seu potencial de geração de energia. De acordo com Wenzel (2007), elas podem ser de:

- Pequeno Porte (máquinas que geram até 50KW de potência);
- Médio Porte (potência que varia de 50KW a 1000KW);
- Grande Porte (máquinas que operam com potência igual ou superior a 1MW de potência).

2.1 TIPOS DE AEROGERADORES

As turbinas podem ser classificadas de acordo com a orientação do eixo do rotor em relação a terra (Figura2), podendo ser de eixo vertical ou horizontal.

Turbinas de eixo vertical (Figura 2a) são constituídas de pás mais próximas ao solo, o que facilita a montagem e manutenção da máquina. Essa configuração, possibilita melhores adaptações às turbulências decorrentes de variações de ventos. Este dispositivo possui uma taxa de velocidade de arranque menor, o que potencializa a geração de energia em condições de vento de menor intensidade (SANTOS, 2013).

Já os aerogeradores de eixo horizontal (Figura 2b) apresentam seu eixo de forma paralela ao fluxo de vento e operam devido as forças aerodinâmicas exercidas sobre as mesmas, sendo elas a força de sustentação que atua perpendicular ao escoamento e a força de arrasto que atua na direção do escoamento. (SANTOS, 2006).

Figura 2: Tipos de aerogeradores



(a) Aerogerador eixo vertical (b) Aerogerador eixo horizontal

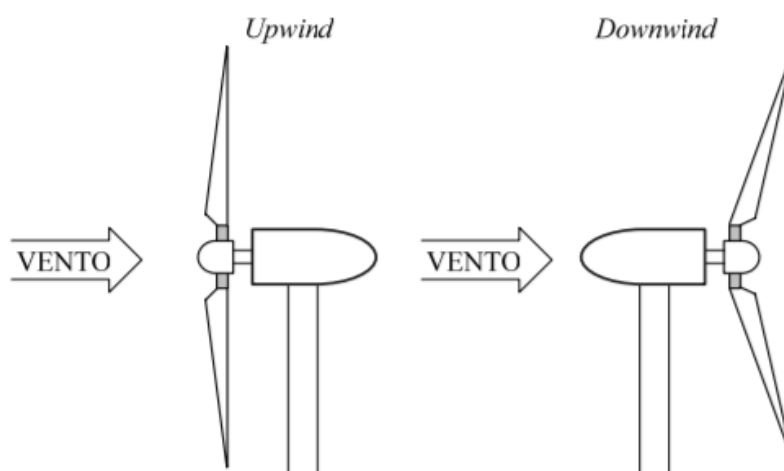
Fonte: WINDPOWERENGINEERING (2018)

As turbinas de eixo horizontal, podem ainda ser classificadas, de acordo com a posição do rotor em relação a torre em *upwind* e *downwind* (Figura3). Nas turbinas *upwind*, a incidência de vento ocorre primeiramente nas pás e em seguida no corpo do aerogerador (nacele). Este tipo de configuração evita a geração de turbulência no

vento provocado pela torre, tornando-a o modelo mais usual atualmente (MARQUES, 2004).

Nas turbinas *downwind*, o vento incide primeiro na nacele e depois escoa para as pás da turbina eólica. Essa configuração apresenta como vantagem não haver necessidade da utilização de um mecanismo de posicionamento da máquina em relação ao vento (MARQUES, 2004).

Figura 3 : Classificação das turbinas

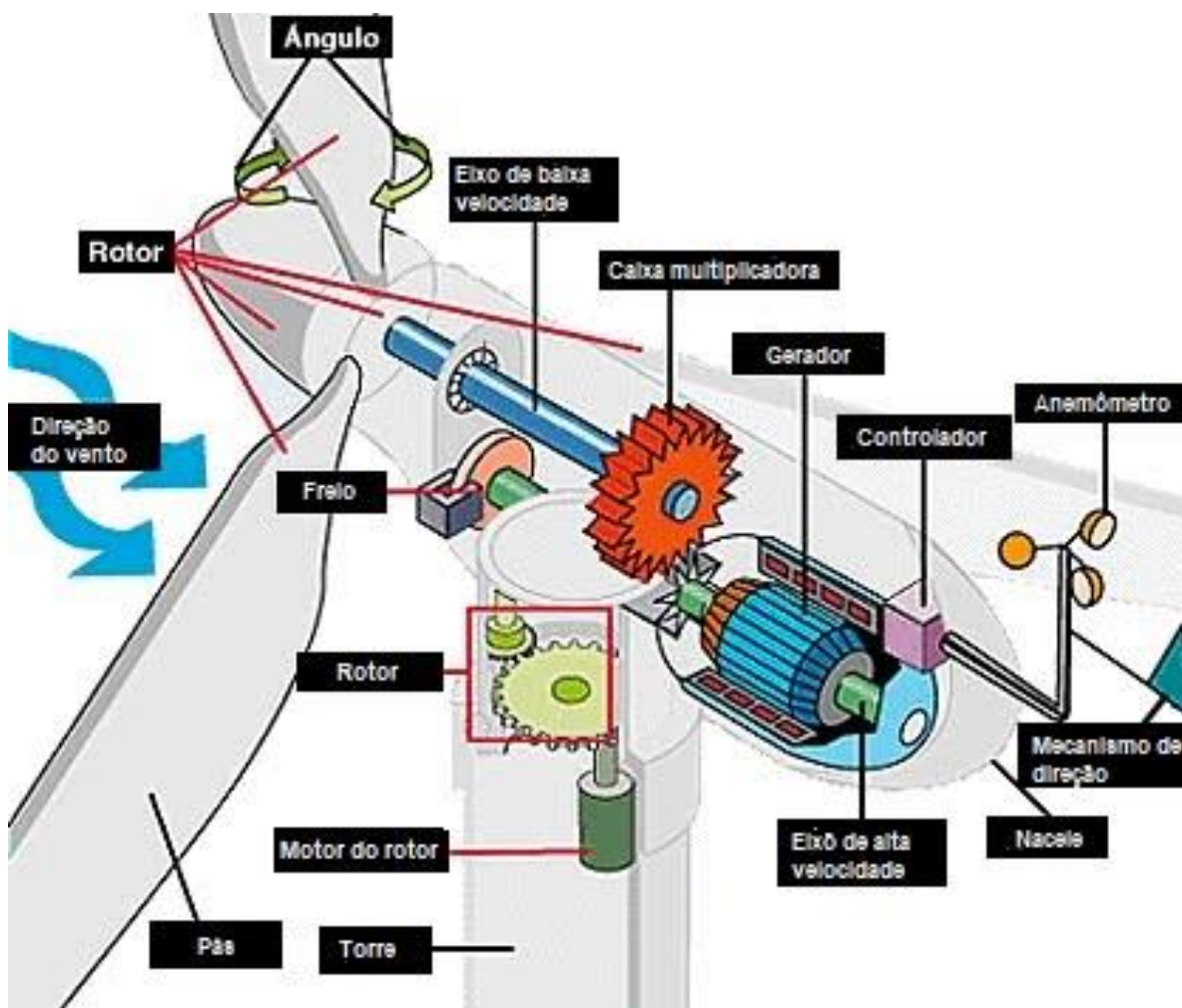


Fonte: Marques (2004)

2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES

Uma turbina eólica é composta por diversos elementos, cada um com uma função específica. Através da Figura 4 é possível observar os principais.

Figura 4 : Componentes de um aerogerador



Fonte: Adaptado, Marques (2004)

2.2.1 Rotor

Conjunto de pás que se acoplam ao cubo juntamente ao eixo de transmissão do aerogerador. Esse componente é responsável pela conversão e transmissão de energia proveniente da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação.

2.2.2 Pás

São os elementos aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento. São fixadas através de flanges no cubo do rotor e pode ser fabricada de vários materiais, com fibra de vidro reforçada com epóxi, alumínio e com fibras de carbono. Segundo Fadigas (2011), as pás têm como função realizar conversão da energia proveniente do movimento das massas de ar, e transformá-las em energia mecânica de rotação.

Vale salientar que esse elemento influencia diretamente o cálculo da potência da turbina, uma vez que quanto maior a área varrida, maior o aproveitamento da energia cinética contida nos ventos. Na fase de projeto vários fatores devem ser considerados para obtenção de pás com melhores geometrias, visando uma melhor aerodinâmica, tais como:

- O perfil da pá não apresenta uma geometria uniforme. Ao longo do seu comprimento há variações da sua seção transversal bem como espessura;
- O comprimento das pás está diretamente ligado às condições de vento e potência nominal da turbina;
- Quanto maior a área varrida pelas pás, maior será a captação da energia cinética, conseqüentemente maior será a velocidade.

2.2.3 Anemômetro

Responsável por medir o vento e transmitir as informações ao sistema de controle do aerogerador.

2.2.4 Sistema de passo

Responsável por realizar o controle das pás de acordo com a velocidade do vento, limitando a potência da turbina. Este sistema faz alterações no ângulo das pás.

2.2.5 Freio

Freio a disco que pode ser mecânico, elétrico ou hidráulico, é um sistema auxiliar de segurança que trabalha em sincronia com os elementos eletrônicos do sistema, sendo acionado para parar a turbina em condições extremas climáticas ou que possam afetar a integridade da estrutura.

2.2.6 Eixo de alta velocidade

Aciona o gerador assíncrono (Marques, 2004).

2.2.7 Eixo de baixa velocidade

Devido ao TSR (*tip speed ratio*) das turbinas eólicas, a velocidade de rotação do rotor está na faixa de 10 a 60 rpm (Marques, 2004).

2.2.8 Gerador

Elemento responsável em converter energia mecânica em energia elétrica, através de componentes eletromecânicas sendo o mais usual o gerador assíncrono que são ligados direto no sistema de transmissão elétrica.

2.2.9 Caixa multiplicadora

Situada entre o gerador e o rotor, é responsável por aumentar a velocidade do eixo através de engrenagens.

2.2.10 Mecanismo de direção

Mecanismo responsável por manter o rotor sempre paralelo ao fluxo de vento.

2.2.11 Nacele

Responsável por comportar o conjunto de engrenagens, gerador, eixo, freio, controlador dentre outros componentes citados a cima.

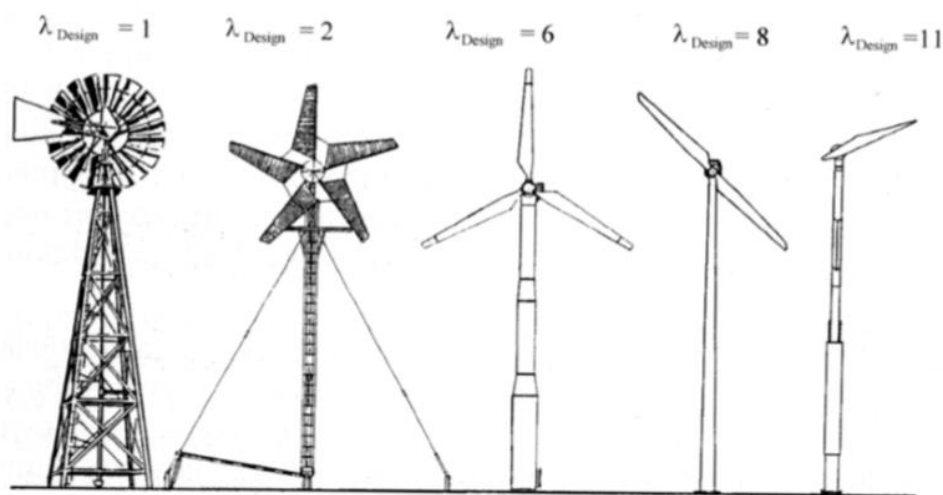
2.2.12 Torre

Componente que pode ser composto de concreto, aço tubular ou de treliça, projetado para suportar o carregamento referente a turbina e os seus componentes.

2.3 NÚMERO DE PÁS

Segundo Marques 2004, o número de pás está diretamente relacionado ao *tip speed ratio* (TSR, parâmetro responsável em mensurar a razão entre a velocidade linear de rotação na ponta da pá e a velocidade do vento incidente sobre a superfície da pá). Assim, quando $\lambda=1$, maior será o número de pás necessário para uma melhor eficiência do dispositivo (Figura 5). Enquanto que, para turbinas que operam em alta velocidade $\lambda>6$, o número de pás tende a diminuir.

Figura 5 : Numero de pás variando de acordo com o TSR.



Fonte: Marques (2004)

A Tabela 1 mostra o número de pás ideal a serem utilizadas em um projeto de acordo com a TSR desejada (WENZEL, 2007).

Tabela 1: Relação de velocidade de ponta de acordo com número de pás

Relação de velocidade de ponta - λ	Número de pás - B
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 8	2 - 3
8 - 15	1 - 2

2.3.1 Relação de velocidade de ponta local

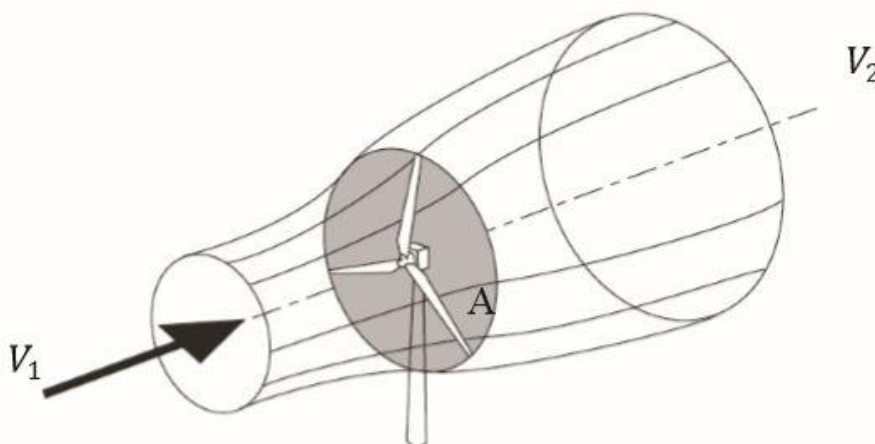
Segundo Wenzel (2007), com base na relação de velocidade de ponta local para um elemento de pá, é possível determinar o TSR local em cada elemento de pá, levando em consideração a distância do centro do rotor até o elemento de pá (r), o raio da pá da turbina (R) e o TSR (λ) através da Equação1:

$$\lambda_r = \lambda \frac{r}{R} \quad (1)$$

2.4 LEI DE BETZ

Desenvolvido por Albert Betz, este modelo conclui que nenhuma turbina eólica seria capaz de converter mais do que 59.3% (16/27) da energia cinética contida no vento em energia mecânica. Esse parâmetro é chamado de Lei de Betz ou limite de Betz. Logo, este modelo simula a passagem de ar por um tubo de corrente, onde no seu interior possui um disco (turbina) nas zonas de transições, que gera uma descontinuação na pressão do ar, como visto na Figura 6 (Lima, 2015).

Figura 6: Fluxo de ar em torno de um aerogerador



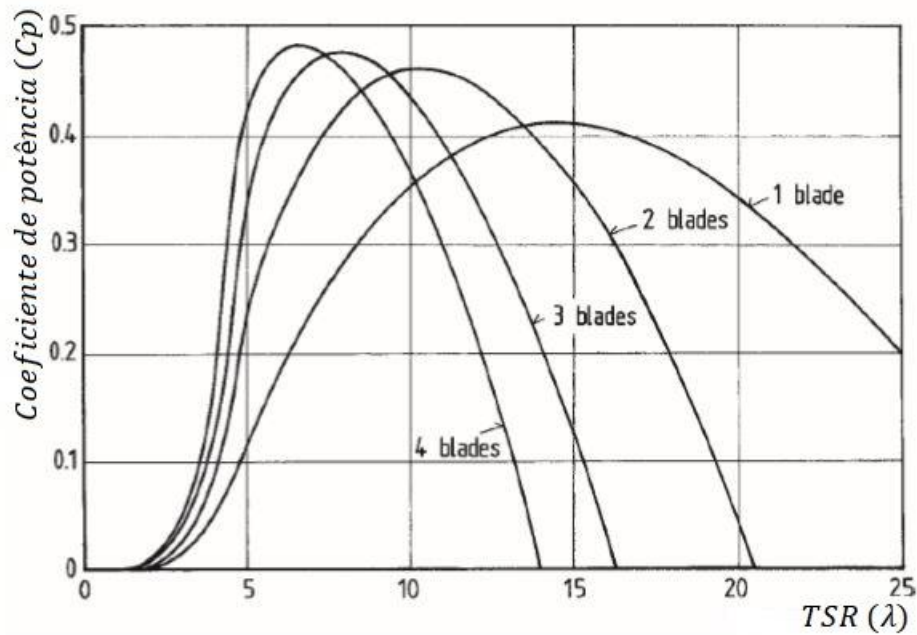
Fonte: Lima (2015)

Onde V_1 é a velocidade antes da turbina, e V_2 a velocidade após a passagem pela turbina. Vale salientar que, a velocidade após a turbina será menor, uma vez há o aumento da área transversal de fluxo de ar, e pela vazão volumétrica, tem-se que a Equação 2:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

O coeficiente de potência (C_p), define-se como a relação entre a potência real obtida e a potência máxima disponível. Sabe-se que, atualmente os valores desse coeficiente variam entre 35% a 45% para turbinas eólicas modernas (Lima, 2015).

Portanto, pode-se estimar um valor de C_p através da seguinte curva Figura 7, através do número de pás e TSR:

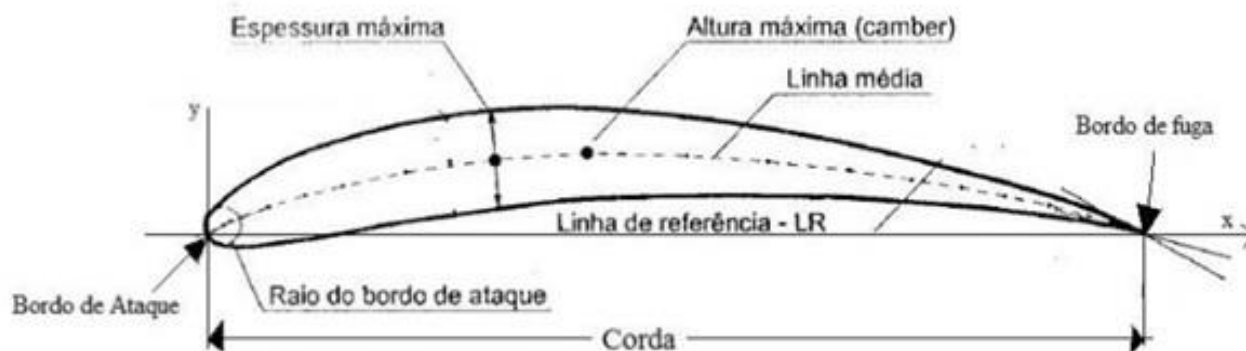
Figura 7: Coeficiente de potência em função do TSR**Fonte:** Lima (2015)

Segundo Machado (2015), para obtenção da potência de uma turbina, deve-se levar em consideração parâmetros importantes, como o coeficiente de potência (C_p), velocidade nominal do vento (U_∞), diâmetro do rotor (D_r), massa específica do ar (ρ) e o coeficiente de rendimento global (η) dos componentes elétricos e mecânicos da turbina. Através da Equação 3, é possível determinar a potência da turbina.

$$P = \frac{\rho \pi D_r^2 (U_\infty)^3 C_p \eta}{8} \quad (3)$$

2.5 GEOMETRIA DE UM PERFIL

Ao analisar um perfil aerodinâmico, deve-se conhecer a geometria do aerofólio de acordo com alguns parâmetros. Através da Figura 8, pode-se observar os principais parâmetros de um perfil.

Figura 8: Geometria de um perfil aerodinâmico

Fonte: Rosa (2006)

Onde, para o presente estudo os parâmetros essenciais na análise dos perfis são, (Rosa, 2006):

- Linha média: é a linha arqueada, que representa o ponto médio entre a linha superior e a linha inferior do perfil.
- Corda: refere-se ao comprimento do centro de referência até o outro limite do perfil (bordo de fuga).
- Altura máxima (camber): é o ponto na qual a linha média tem a maior altura devido ao arqueamento da linha média.
- Raio do bordo de ataque: é o parâmetro responsável por determinar a curvatura do bordo de ataque do perfil.

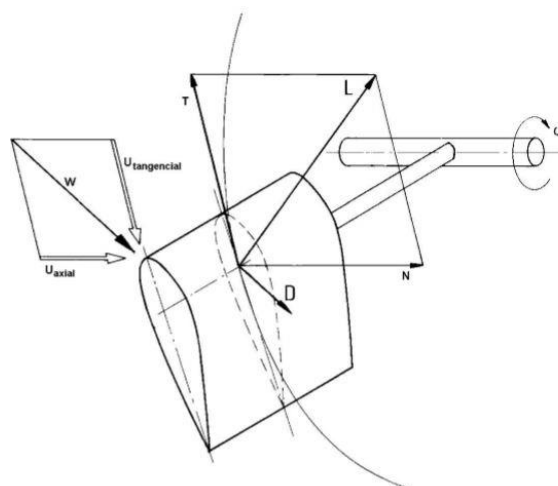
2.6 MÉTODO SIMPLIFICADO DE DESENHO DE PÁS

O método simplificado de desenho consiste numa forma de geração de pás de turbinas eólicas, onde não há variação do ângulo de ataque para todos os elementos de pá. Além de que, o ângulo de fluxo teórico neste método desconsidera os efeitos das velocidades axial e tangencial decorrentes do escoamento, levando em consideração somente a relação de velocidades (WENZEL, 2007).

2.7 FORÇAS ATUANTES EM UM PERFIL AERODINÂMICO

Quando sobre um perfil escoar um fluido (ar), sobre ele atuam forças provenientes dessa interação. Essas reações são responsáveis por gerar pressões em volta da superfície inferior e superior do perfil, essas forças recebem o nome de sustentação e arrasto, e são responsáveis em gerar um momento em torno do aerofólio. Através da Figura 9 é possível observar as forças atuantes em um elemento da pá.

Figura 9: Velocidades de fluxo e forças atuantes no perfil



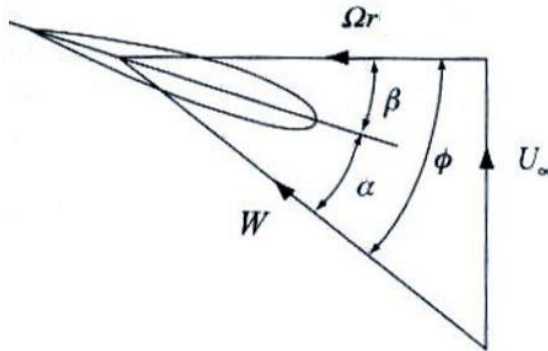
Fonte: Wenzel (2007)

2.7.8 Teoria de elemento de pá

Assume-se que as forças atuantes em um elemento de pá, podem ser obtidos através da análise do perfil em duas dimensões, levando em consideração o ângulo de ataque definido como sendo o ângulo da incidência da velocidade na seção transversal do elemento Figura 10. Sobre cada elemento analisado, atuará componentes de velocidade, expressos em termos da velocidade do vento, em um dado ângulo de ataque. Portanto, existirá uma variação dos coeficientes de sustentação e coeficientes de arrasto, de acordo com o ângulo de ataque (Silva, 2013).

Logo, os componentes:

Figura 10: Velocidades atuantes



Fonte: Adaptado, Lima (2015)

Onde a velocidade relativa resultante (W) na pá, pode ser obtida como visto na Equação 4:

$$W = \sqrt{U_\infty^2 + \Omega_r^2} \quad (4)$$

Atuando em um ângulo tal no plano de rotações que:

$$\text{sen}(\phi) = \frac{U_\infty}{W} \quad (5)$$

$$\text{cos}(\phi) = \frac{\Omega_r}{W} \quad (6)$$

O ângulo de fluxo (ϕ) é o ângulo formado entre o plano de rotação da turbina e a velocidade relativa Equação 7. Este se compõe do ângulo de ataque (α), sendo este o ângulo formado entre a velocidade relativa e a linha de referência do perfil e do ângulo de passo do elemento de pá.

$$\phi = \alpha + \beta \quad (7)$$

Segundo Wenzel (2007), pode-se estimar o ângulo de fluxo teórico, através da Equação 8:

$$\phi = \frac{2}{3} \arctang\left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (8)$$

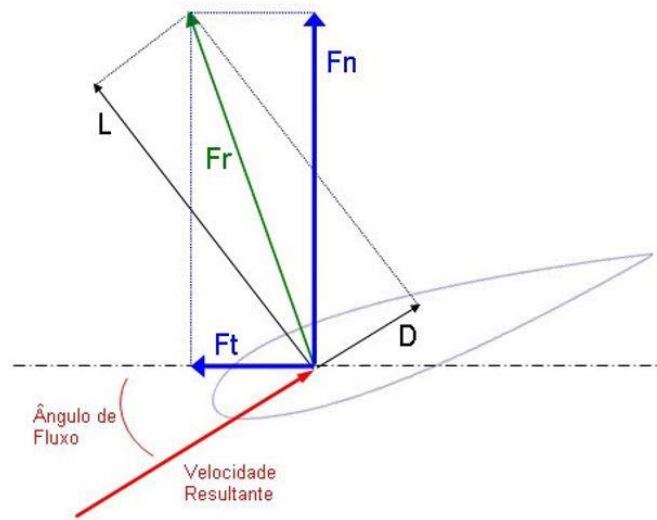
De acordo com a Teoria de Elemento de Pá, deve-se considerar uma hipótese, onde as forças de arrasto (L) e de sustentação (D) atuantes no elemento, são as mesmas das que atuam num elemento idêntico, isolado, com mesmo ângulo de ataque em escoamento bidimensional (Silva, 2013).

Através das Equações 9 e Equações 10, pode-se definir os coeficientes de sustentação (C_L) e coeficiente de arrasto (C_D).

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho W^2 c} \quad (9)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho W^2 c} \quad (10)$$

Como visto na Figura 11, devido a inclinação do perfil em relação ao plano do rotor, surgem forças que devem ser decompostas, visto que em cada elemento, atuará forças de arrasto e força de sustentação, gerando forças resultantes. Essa decompostas podem ser obtidas através das Equação 11 e Equação 12.

Figura 11: Forças resultantes**Fonte:** Wenzel (2007)

$$F_N = \cos(\phi)L + \sin(\phi)D \quad (11)$$

$$F_T = \sin(\phi)L - \cos(\phi)D \quad (12)$$

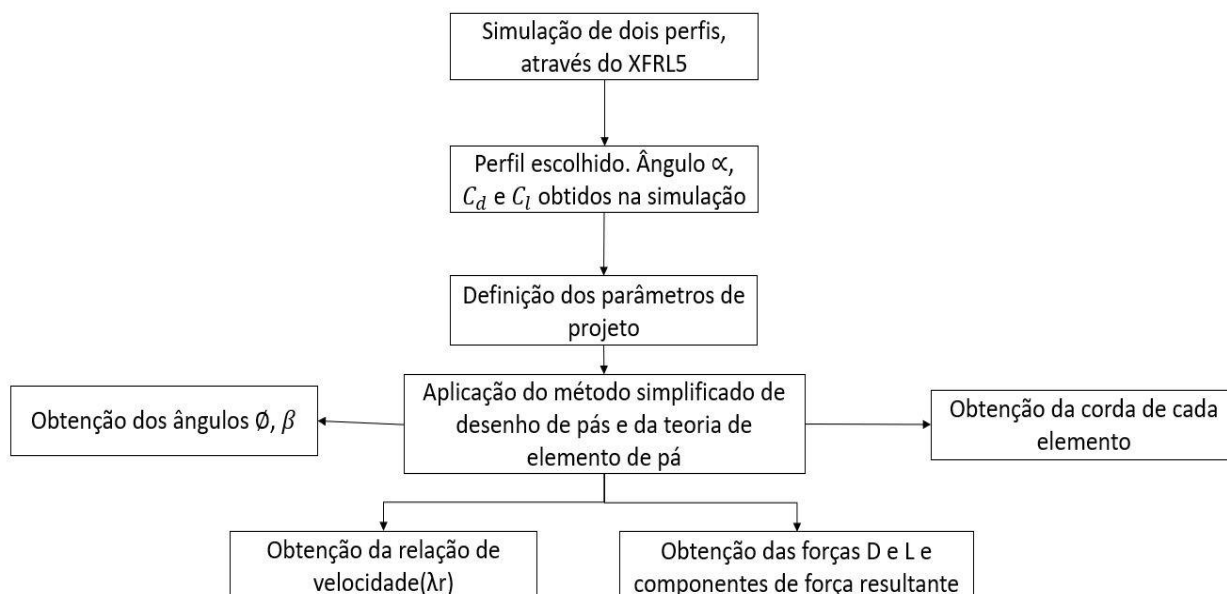
Vale salientar, que cada elemento de pá possuirá um comprimento de corda (c) diferente, uma vez que ao variar o raio (r), tem-se também uma alteração do ângulo de fluxo (ϕ). Para determinação da corda, deve-se definir o número de pás (B) e coeficiente de sustentação (C_L). Segundo Wenzel (2007), através da Equação 13 será possível determinar a corda de cada elemento:

$$c = (1 - \cos(\phi)) \frac{8\pi r}{BC_L} \quad (13)$$

3 MATERIAIS E METODOS

Através da Figura 12, é possível observar o fluxograma detalhando a estrutura da sequência de passos que serão adotados para o desenvolvimento deste projeto.

Figura 12: Fluxograma



3.1 SIMULAÇÕES DOS PERFIS

Dois perfis foram analisados, o NACA 0010, onde suas coordenadas foram obtidas no site m-selig.ae.illinois.edu e o perfil FX 63-137 selecionado através de pesquisas bibliográfica (SELIG e MCGRANAHAN, 2003), onde o autor disponibiliza os parâmetros geométricos.

3.1.1 Método computacional

O XFLR5 é um programa livre que tem como finalidade, proporcionar o estudo de iniciantes na área da engenharia aeronáutica. O software realiza uma refinada análise aerodinâmica, possibilitando de forma aproximada a obtenção de vários parâmetros necessários para o projeto de perfis (DANTAS, 2014).

Através dos dados de geometria de cada perfil, o software é capaz de simular diversas condições, variando o ângulo de ataque (ângulo formado entre a linha de

referência do perfil e a componente de velocidade relativa), obtendo assim uma variação dos parâmetros.

3.2 ESCOLHA DO PERFIL

Através dos resultados obtidos na análise, pode-se determinar diversos parâmetros, como coeficiente de arrasto e de sustentação, referente a cada ângulo de ataque simulado. Sendo possível por exemplo, determinar a inclinação responsável por um maior efeito de sustentação quando comparado ao arrasto. Com base nesses resultados, será definido o melhor perfil para o projeto.

3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO

Para projetar a pá eólica será necessário definir parâmetros de funcionamento como velocidade do vento, massa específica, potência da turbina, eficiência global etc.

3.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS PARA PROJETO

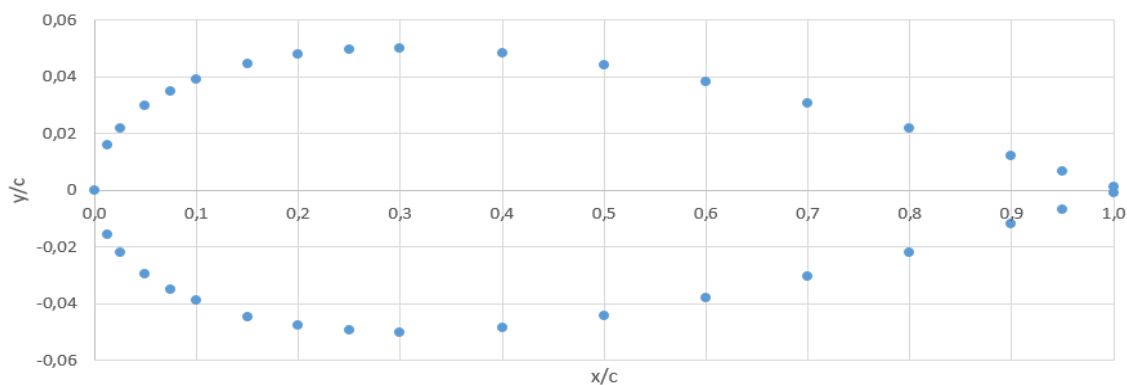
Com base no método simplificado de desenho de pás e da teoria de elemento de pá será possível obter os parâmetros locais, atuantes em cada elemento.

4 RESULTADOS

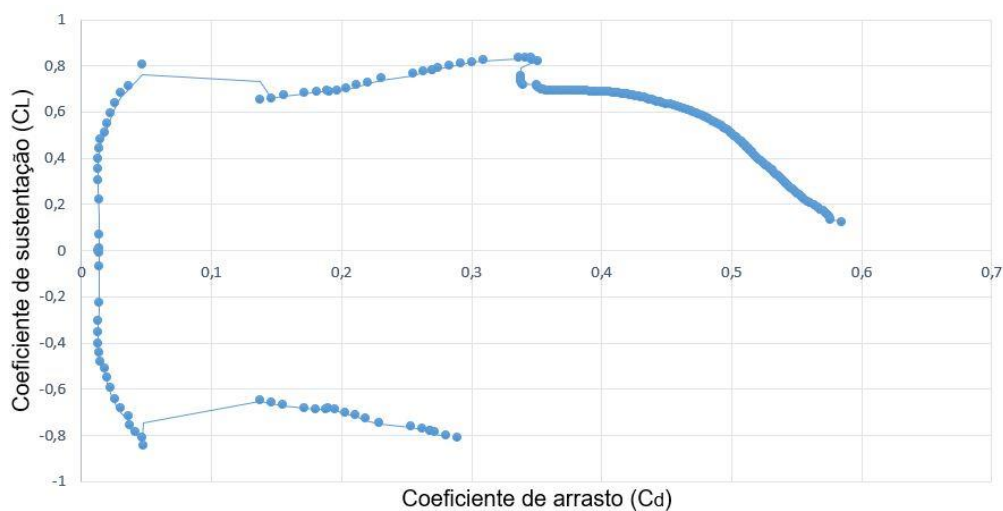
4.1 PERFIL NACA 0010

Utilizando o software XFLR5, foi realizado a análise do perfil NACA 0010 selecionado. Foram obtidos através do software as seguintes curvas características, e através dessa análise, extraídos parâmetros importantes do perfil. Na Figura 13 é possível observar a geometria do perfil NACA 0010.

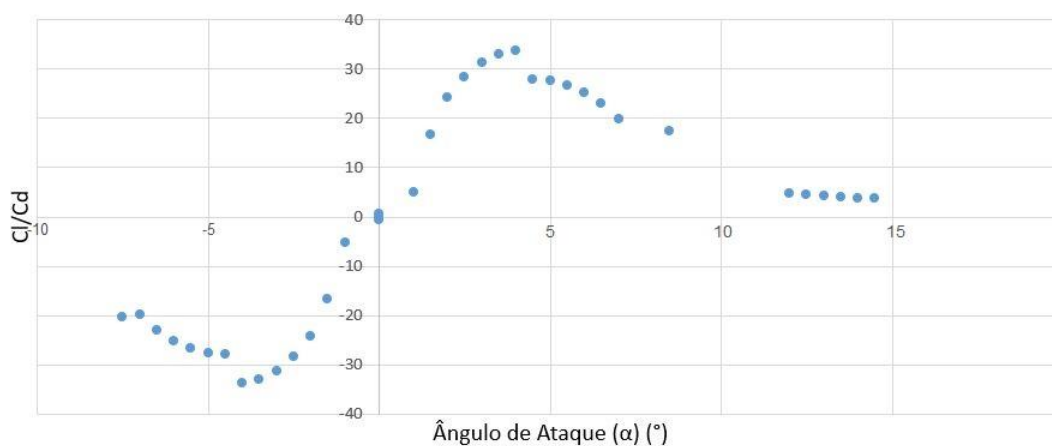
Figura 13: Perfil NACA 0010



A Figura14 representa a curva polar, onde relaciona-se o coeficiente de sustentação com o coeficiente de arrasto.

Figura 14: Curva polar C_L em função de C_D 

Por fim, analisa-se a variação do ângulo de ataque (α) em função da relação da curva polar C_L/C_D Figura 15, com intuito de determinar o ângulo α onde essa relação é maior.

Figura 15: Relação entre sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque

Através da análise da curva C_L/C_D em função do ângulo de ataque, obteve-se os parâmetros expostos na Tabela 2.

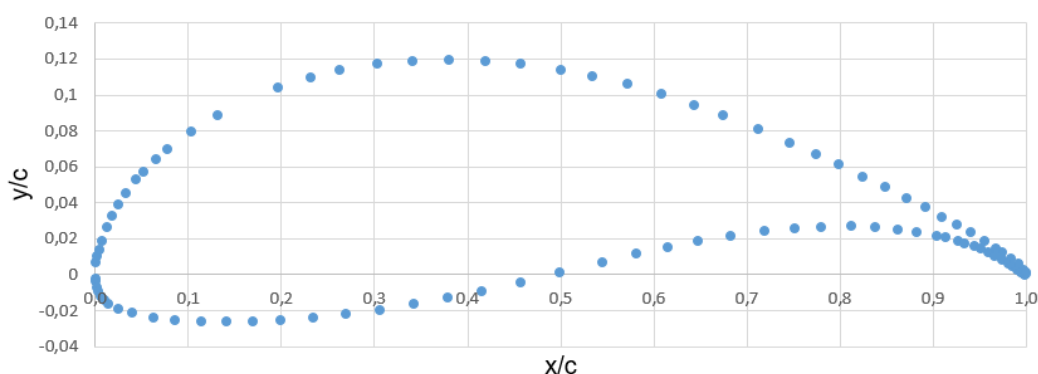
Tabela 2: Perfil aerodinâmico NACA 0010

Perfil	NACA 0010
Ângulo de Ataque (α)	4°
Coeficiente de Sustentação	0,4825
Coeficiente de Arrasto	0,01434
Cl/Cd (máximo)	33,647

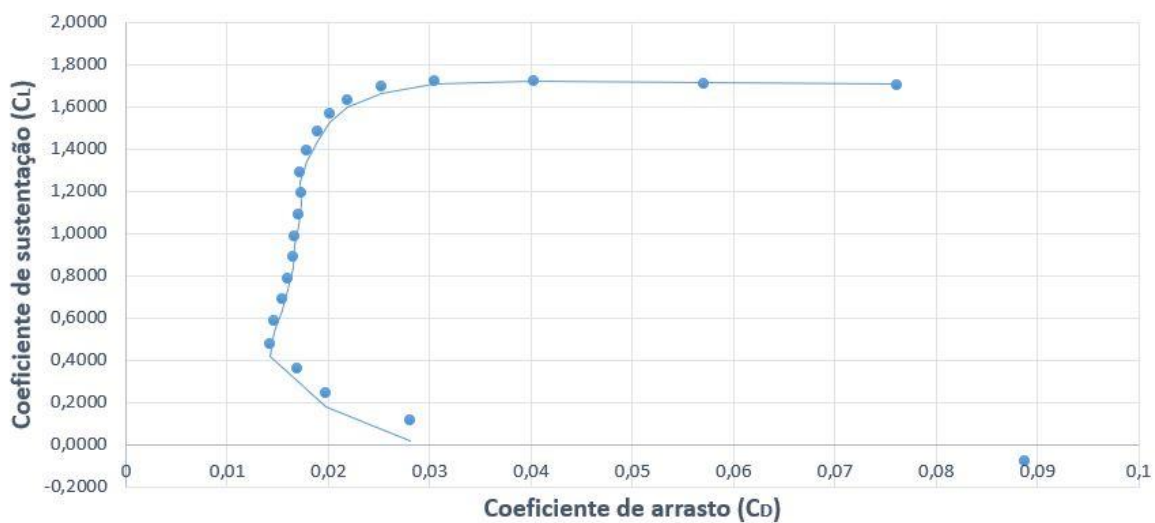
4.2 PERFIL FX 63-137

Projetado por F.X. Wortmann, o perfil vem sendo amplamente utilizado desde a aplicação em aeromodelos, até a aplicação em aerogeradores de pequeno porte, uma vez que o perfil apresenta uma alta sustentação e um arrasto consideravelmente baixo (SELIG; MCGRANAHAN, 2003).

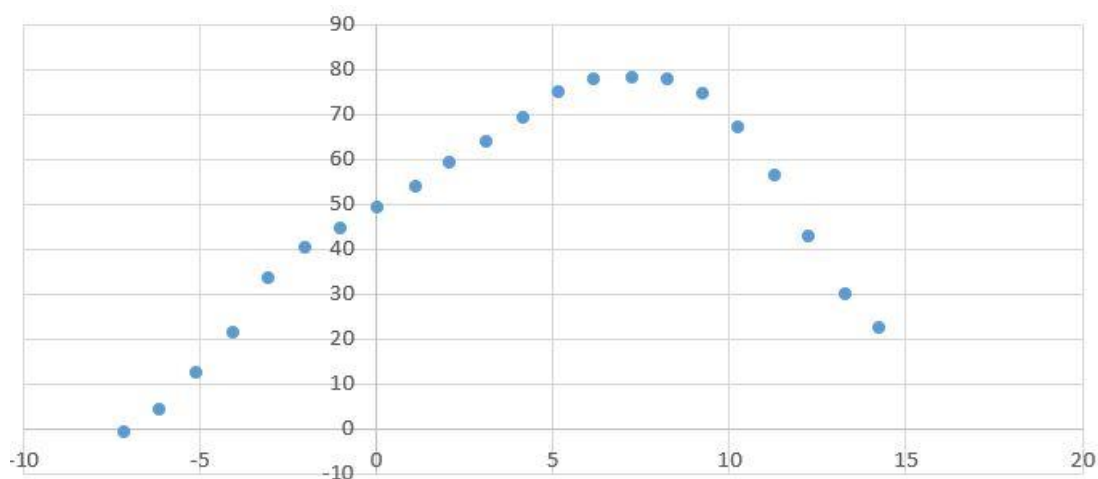
Através da Figura 16 é possível observar o perfil FX 63-137.

Figura 16: Perfil FX 63-137

A Figura 17 representa a curva polar, onde relaciona-se o coeficiente de sustentação e com o coeficiente de arrasto.

Figura 17: Curva polar C_l em função de C_d 

Analisa-se também a variação do ângulo de ataque (α) em função da relação C_l/C_d , Figura18, com intuito de determinar o ângulo α onde essa relação é maior.

Figura 18: Relação entre sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque

Logo, através da análise dos parâmetros obtidos na curva C_l/C_d em função do ângulo de ataque, obteve-se os seguintes parâmetros (Tabela3):

Tabela 3: Perfil aerodinâmico FX 63-137

Perfil	FX 63-137
Ângulo de Ataque (α)	7,25°
Coeficiente de Sustentação	1,484
Coeficiente de Arrasto	0,0190
Cl/Cd (máximo)	78,11

4.3 SELEÇÃO DO PERFIL

Comparando os parâmetros obtidos, expostos na Tabela2 e Tabela3 conclui-se que o perfil FX 63-137 apresenta melhores coeficientes aerodinâmicos, uma vez que a relação Cl/Cd é bem superior ao perfil NACA 0010. Ou seja, o perfil FX gera uma maior sustentação quando comparado com o NACA.

Embora que o perfil FX 63-137 tenham obtido melhores resultados, sua construção seria bem mais dificultosa, uma vez que sua geometria apresenta complexidade, acarretando em um custo de fabricação mais elevado .

Portanto, o perfil selecionado para o projeto será o NACA 0010, que apresentou bons resultados, e tem geometria simples para construção.

4.4 DEFINIÇÃO DOS PARAMETROS DE PROJETO

Inicialmente, foram definidos parâmetros característicos de funcionamento da turbina eólica Tabela 3, para que a partir deles fosse possível utilizar o método simplificado de desenho da pá.

- Adotou-se como velocidade nominal do vento (U_{∞}) 10 m/s, com intuito de obter uma maior potência da turbina.
- A massa específica do ar foi escolhida como sendo 1,225 kg/m³, valor médio para região.
- O número de pás (B) foi definido como sendo 3, com base na eficiência desses modelos serem maiores.
- De acordo com o número de pás, estimou-se a relação de velocidade de pá, como sendo $\lambda=5$ (Tabela 1).
- Adotou-se o rendimento global (η) como sendo 0,8 considerando os rendimentos mecânicos e elétricos.

- O raio da pá eólica foi fixado em 1m, de modo que a mesma fosse dividida em 32 elementos. Logo, com base no diâmetro do rotor (D_r), obtêm-se a área varrida do rotor.

$$A_v = \frac{\pi D_r^2}{4} = \frac{\pi(2)^2}{4} = 3,1415 \text{ m}^2$$

- A potência foi estimada em 630W, calculada através dos parâmetros necessários.

$$P = \frac{\rho \pi D_r^2 U_\infty^3 C_p \eta}{8} = \frac{1,255 * \pi (2)^2 * (10)^3 * 0,35 * 0,8}{8} = 552W$$

- O ângulo de ataque α será 4° , valor correspondente a uma maior relação de sustentação ou arrasto. Obtido através das iterações do software XRFL5.

Tabela 4: Parâmetros de projeto da turbina

Parâmetros	Símbolo	Valores	Unidade
Velocidade nominal	U_∞	10	m/s
Massa específica	ρ	1,225	kg/m ³
Potência turbina	P	552	W
Relação de velocidade de ponta	λ	5	-
Número de pás	B	3	-
Coeficiente de potencia	C_p	0,35	-
Rendimento global	η	0,8	-
Área varrida pelo rotor	A_v	3,1415	m ²
Ângulo de ataque alpha	α	4	°

Ao dividir a pá em 32 elementos, foi possível definir o comprimento de corda necessária para cada um desses elementos. Para análise de cada um, considerou-se o ângulo de ataque (α) constante de modo que ocorresse variação apenas nos ângulos de fluxo (ϕ) e ângulo de passo (β).

Para obtenção dos componentes de sustentação (L) e de arrasto (D), deve-se obter o componente de velocidade relativa atuante em cada elemento e o comprimento de corda. Por fim, com base na força de sustentação e arrasto define-se os componentes de força normal e tangencial.

Observou-se que a velocidade relativa na extremidade da pá é maior, uma vez que o ângulo de fluxo diminui gradativamente ao longo do comprimento da pá. Com

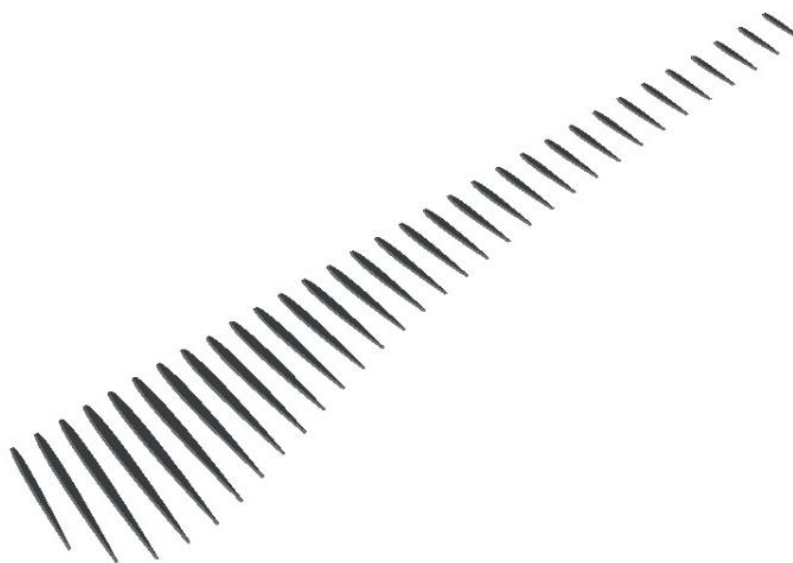
base na velocidade relativa, observou-se que as variações de força de arrasto foram bem pequenas, o que acarretou em componentes de forças tangenciais quase uniformes. Enquanto que, a força de sustentação teve grandes variações, bem como seus respectivos componentes de força normal, o que já era esperado.

Para um perfil aerodinâmico é importante que a força de sustentação e o componente tangencial sejam superiores aos componentes de arrasto, uma vez que essa força é responsável pela rotação da turbina.

4.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO SIMPLIFICADO DE DESENHO DE PÁS

Aplicando o método simplificado, dividiu-se a pá em 32 elementos distanciados igualmente 3cm entre cada seção, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 : Elementos de pá



Com base em cada elemento, foram calculados seus respectivos ângulos de fluxo, ângulo de passo e relação de velocidade local. Como mostrado na Tabela 4. Observou-se que quanto mais distante do centro (r), menor o ângulo de fluxo, isso ocorre porque o mesmo é inversamente proporcional a relação de velocidades local, logo, quando o λ_r aumenta, menor será o ângulo. Já o ângulo de passo também

diminui, pois este é obtido através da diferença entre o ângulo de fluxo e o ângulo de passo.

Tabela 4: Elementos de pás e seus respectivos parâmetros

Elemento de pá	Raio local (r)(m)	Relação de Velocidades (λ_r)	Ângulo de fluxo local (Φ_r) (°)	Ângulo de Passo (β_r) (°)
1	0,05	0,253	50,552	46,552
2	0,08	0,404	45,333	41,333
3	0,11	0,556	40,630	36,630
4	0,14	0,707	36,491	32,491
5	0,17	0,859	32,901	28,901
6	0,2	1,010	29,808	25,808
7	0,23	1,162	27,149	23,149
8	0,26	1,313	24,860	20,860
9	0,29	1,465	22,882	18,882
10	0,32	1,616	21,165	17,165
11	0,35	1,768	19,665	15,665
12	0,38	1,919	18,348	14,348
13	0,41	2,071	17,185	13,185
14	0,44	2,222	16,152	12,152
15	0,47	2,374	15,230	11,230
16	0,5	2,525	14,402	10,402
17	0,53	2,677	13,657	9,657
18	0,56	2,828	12,981	8,981
19	0,59	2,980	12,368	8,368
20	0,62	3,131	11,807	7,807
21	0,65	3,283	11,294	7,294
22	0,68	3,434	10,823	6,823
23	0,71	3,586	10,388	6,388
24	0,74	3,737	9,986	5,986
25	0,77	3,889	9,614	5,614
26	0,8	4,040	9,268	5,268
27	0,83	4,192	8,945	4,945
28	0,86	4,343	8,644	4,644
29	0,89	4,495	8,362	4,362
30	0,92	4,646	8,097	4,097
31	0,95	4,798	7,849	3,849
32	0,98	4,949	7,615	3,615

A Tabela 5 exibe também, parâmetros baseados nos elementos de pás. Foram definidos a corda e a velocidade relativa do vento em cada elemento.

Tabela 5: Corda e componente da velocidade relativa

Elemento de pá	Corda (c) (m)	W (relativa)
1	0,3165	12,950
2	0,4126	14,061
3	0,4604	15,357
4	0,4766	16,815
5	0,4734	18,410
6	0,4594	20,117
7	0,4400	21,915
8	0,4183	23,786
9	0,3962	25,717
10	0,3748	27,697
11	0,3544	29,716
12	0,3354	31,768
13	0,3178	33,846
14	0,3016	35,947
15	0,2866	38,068
16	0,2728	40,204
17	0,2602	42,354
18	0,2485	44,517
19	0,2377	46,689
20	0,2278	48,870
21	0,2186	51,060
22	0,2100	53,256
23	0,2021	55,458
24	0,1947	57,665
25	0,1878	59,878
26	0,1813	62,094
27	0,1753	64,315
28	0,1696	66,539
29	0,1643	68,766
30	0,1593	70,996
31	0,1545	73,229
32	0,1501	75,464

Obteve-se ainda, as forças de arrasto (D) e sustentação (L), bem como cada componente de força (F_N e F_T) atuante em cada elemento através da Tabela 6.

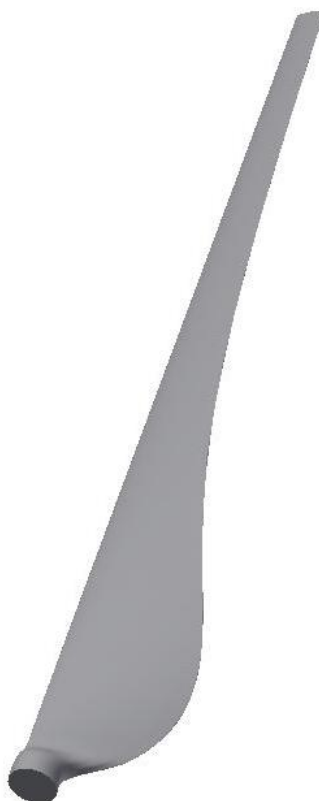
Tabela 6: Componentes de força

Elemento de pá	D (Arrasto)	L (Sustentação)	F_N	F_T
1	0,466	15,688	10,328	11,818
2	0,716	24,105	17,455	16,640
3	0,954	32,090	24,975	20,172
4	1,184	39,823	32,719	22,731
5	1,409	47,418	40,579	24,574
6	1,633	54,948	48,490	25,897
7	1,856	62,450	56,416	26,845
8	2,079	69,947	64,340	27,520
9	2,302	77,451	72,251	27,995
10	2,525	84,966	80,146	28,322
11	2,749	92,494	88,025	28,538
12	2,973	100,037	95,887	28,668
13	3,198	107,593	103,734	28,734
14	3,423	115,161	111,567	28,748
15	3,648	122,740	119,388	28,723
16	3,873	130,330	127,197	28,665
17	4,099	137,928	134,997	28,582
18	4,325	145,535	142,787	28,478
19	4,552	153,149	150,570	28,356
20	4,778	160,770	158,346	28,220
21	5,005	168,397	166,116	28,073
22	5,232	176,029	173,880	27,915
23	5,459	183,665	181,639	27,749
24	5,686	191,306	189,394	27,576
25	5,913	198,951	197,144	27,396
26	6,140	206,599	204,891	27,212
27	6,368	214,250	212,635	27,023
28	6,595	221,905	220,376	26,829
29	6,823	229,562	228,113	26,633
30	7,050	237,221	235,849	26,433
31	7,278	244,882	243,582	26,231
32	7,506	252,546	251,313	26,026

O arrasto é uma força gerada pelos mesmos efeitos resultantes na força de sustentação, contudo a componente de arrasto tem sentido contrário ao deslocamento, tornando-a uma força indesejada, pois isso gera uma ineficiência no projeto. Uma vez que a sustentação é superior ao arrasto, tem-se maiores componentes de força responsáveis em transmitir o movimento para o conjunto do rotor, resultando em uma maior eficiência. Logo, foi observado que a força de sustentação foi bem superior à força de arrasto em cada elemento, indicando que o perfil tem bom desempenho.

Com base nos parâmetros anteriormente calculados, e nos elementos de pás foi possível projetar a pá, podendo ser observado na Figura 20.

Figura 20: Pá eólica



Fonte: Gondim (2018)

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo principal realizar o estudo aerodinâmico de perfis, visando a construção de um pequeno aerogerador.

Portanto, diante do exposto e das condições de realização do trabalho pode-se concluir que:

- Através da análise aerodinâmica de cada perfil, foi possível definir qual o melhor para construção de um aerogerador de pequeno porte, o NACA 0010.
- Com base no método simplificado e análise dos elementos de pás foi possível obter os parâmetros (corda, componente de velocidade relativa, forças e suas componentes, dentre outros) atuante em cada seção, levando em consideração os fatores de projeto.
- Em cada elemento de pá, o componente de força normal (F_N) foi superior ao componente de força tangencial (F_T), firmando que o perfil simulado tem bom desempenho.
- Com a idealização deste trabalho, pode-se realizar uma confrontação entre os valores de potência obtidos empiricamente e os valores que podem ser obtidos de modo experimental. Fica assim, uma sugestão de um futuro trabalho.

REFERÊNCIAS

DANTAS, Albert Franklin de Moura. **Análise aerodinâmica de perfis de asa para veículos aéreos não tripulados usando software XFLR5**. 2014. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Angicos, 2014.

FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. **Energia eólica**. Manoele Ltda. 1ª ed. 2011.

GONDIM, Luann Marcos. **Análise da influência dos geradores de vórtices por meio do estudo de suas posições em turbinas eólicas de pequeno porte**. 2018. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Semi Árido, Caraúbas, 2018.

GROUP, Uiuc Applied Aerodynamics. **UIUC Applied Aerodynamics Group: Department of Aerospace Engineering**. 2018. Disponível em: <<http://m-selig.ae.illinois.edu/index.html>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

LIMA, Thiago Novelli de Abreu e. **Projeto de um protótipo de uma turbina eólica de eixo horizontal**. 2015. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MACHADO, Caio Fillipo de Faria. **Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal**. 2014. 67 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MARQUES, Jeferson. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

RESE ARCHGATE. **Funcionamento de um aerogerador**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Esquema-geral-de-funcionamento-de-um-aerogerador-15_fig5_292623126> Acesso em: 10/03/2018.

Relatório da situação global 2016 (Paris: Secretariado REN21).

RÜNCOS, F. CARLSON, R. KUO-PENG, P. VOLTOLINI, H. BATISTELA, J. **Geração de energia eólica, tecnologias atuais e futuras**. Florianópolis, 2004.

SANTOS, Núbia Alice Alves Silva. **Otimização de torre de aço para aerogerador eólico**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, Alisson Alves dos. **Projeto de Geração de Energia Eólica**, USC, Santos, 2006.

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, Amanda Brigss da. **Projeto aerodinâmico de turbinas eólicas**. 2013. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas de eixo horizontal**. 2007. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WIND POWER ENGINEERING. **Vertical Axis Wind Turbines vs Horizontal Axis WindTurbines**. Disponível em:

<https://www.windpowerengineering.com/construction/vertical-axis-wind-turbines-vs-horizontal-axis-wind-turbines/>> Acesso em: 07/03/2018.

ROSA, Edison. **Introdução ao projeto aeronáutico: uma contribuição à competição SAE Aerodesign**. Santa Catarina: UFSC Centro Tecnológico, 2006.

APÊNDICE A – GEOMETRIA NACA 0010

x	y
1,0	0,00105
1,0	0,00672
0,9	0,01207
0,8	0,02187
0,7	0,03053
0,6	0,03803
0,5	0,04412
0,4	0,04837
0,3	0,05002
0,3	0,04952
0,2	0,04782
0,2	0,04455
0,1	0,03902
0,1	0,035
0,1	0,02962
0,0	0,02178
0,0	0,01578
0,0	0
0,0	-0,01578
0,0	-0,02178
0,1	-0,02962
0,1	-0,035
0,1	-0,03902
0,2	-0,04455
0,2	-0,04782
0,3	-0,04952
0,3	-0,05002
0,4	-0,04837
0,5	-0,04412
0,6	-0,03803
0,7	-0,03053
0,8	-0,02187
0,9	-0,01207
1,0	-0,00672
1,0	-0,00105

APÊNDICE B – GEOMETRIA FX 63-137

x	y
1,0	0,001313
1,0	0,002655
1,0	0,005587
1,0	0,008637
1,0	0,012071
1,0	0,01467
1,0	0,018539
0,9	0,0233
0,9	0,027731
0,9	0,032107
0,9	0,037167
0,9	0,042586
0,8	0,048423
0,8	0,054516
0,8	0,060894
0,8	0,066824
0,7	0,073388
0,7	0,080748
0,7	0,088419
0,6	0,09432
0,6	0,100263
0,6	0,105691
0,5	0,110443
0,5	0,113917
0,5	0,117057
0,4	0,118802
0,4	0,119413
0,3	0,118831
0,3	0,116934
0,3	0,113454
0,2	0,109598
0,2	0,103709

0,1	0,088412
0,1	0,079594
0,1	0,069346
0,1	0,063834
0,1	0,057195
0,0	0,052481
0,0	0,044958
0,0	0,038803
0,0	0,032701
0,0	0,026302
0,0	0,018783
0,0	0,013634
0,0	0,010443
0,0	0,006806
0,0	-0,002725
0,0	-0,004175
0,0	-0,007373
0,0	-0,009321
0,0	-0,012181
0,0	-0,014205
0,0	-0,016199
0,0	-0,019038
0,0	-0,021554
0,1	-0,023874
0,1	-0,025281
0,1	-0,026153
0,1	-0,026389
0,2	-0,02617
0,2	-0,025452
0,2	-0,024121
0,3	-0,022201
0,3	-0,019712
0,3	-0,016692

0,4	-0,013261
0,4	-0,009441
0,5	-0,00453
0,5	0,000739
0,5	0,006575
0,6	0,011214
0,6	0,014968
0,6	0,018421
0,7	0,021515
0,7	0,024104
0,8	0,025679
0,8	0,026524
0,8	0,026666
0,8	0,026107
0,9	0,024999
0,9	0,023575
0,9	0,02151
0,9	0,020353
0,9	0,018453
0,9	0,017361
0,9	0,015498
1,0	0,014145
1,0	0,0123
1,0	0,010398
1,0	0,008106
1,0	0,006159
1,0	0,004491
1,0	0,002657
1,0	0,001256
1,0	0,000367
1,0	-0,0002
1,0	0