



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

YAN NUNES NASCIMENTO

FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPO DE DESEMPENHO DE TURBINAS HAWT

FORTALEZA

2018

YAN NUNES NASCIMENTO

FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPO DE DESEMPENHO DE TURBINAS HAWT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção de título de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Claus Franz Wehmann.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N199f Nascimento, Yan Nunes.

Fabricação de protótipo de desempenho de turbinas HAWT / Yan Nunes Nascimento . – 2018.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Claus Franz Wehmann..

1. Aerogeradores de pequeno porte. 2. Aerogeradores. 3. Pequeno porte. I. Título.

CDD 621.042

YAN NUNES NASCIMENTO

FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPO DE DESEMPENHO DE TURBINAS HAWT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção de título de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Aprovada em ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a. Dr. William Magalhães Barcelos

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Felipe Alves de Albuquerque Araújo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

A construção de pás de aerogeradores para testes em laboratório exige certo cuidado durante sua fabricação. Todas as partes devem possuir determinados padrões especificados de tamanho, torção, e rugosidade para que se tenha um estudo mais próximo da realidade. O Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos Computacional (LAERO) da Universidade Federal do Ceará utiliza constantemente protótipos de pás para estes testes. Neste trabalho é apresentado uma forma de confecção de pás baseada em madeira balsa e vinil para posterior comparação com outro método utilizado como a produção através de molde e resina. Foram, inicialmente, dimensionados e desenhados os perfis das pás nos softwares SDPA e Solidworks; fabricadas em madeiras balsas; montado esqueleto; e, por fim, tudo foi coberto com madeira de menor espessura e finalizado com vinil. Posteriormente, foi feito teste de geração de potência mecânica através do uso de um transdutor de torque e rotação e de um anemômetro. Os resultados relacionados à construção foram positivos se analisados ao modelo de comparação por moldes pelo fato de o peso das pás ser menor e pela maior resistência conferida à estrutura por meio da longarina. No que tange aos dados, estes foram condizentes em relação à potência versus velocidade do vento, visto que esta variou entre 3 e 7 m/s enquanto a potência de saída se manteve entre 0,2 e 1,2 W. Quanto aos dados das adimensionais de coeficiente de potência e velocidade específica, com o primeiro variando de 0,005 até 0,055 e o outro variando de 0,1 até 0,7, o arranjo dos sensores de rotação, torque e velocidade do vento, além do local de teste que foi em dentro do próprio LAERO não eram adequados para que se chegasse ao valor máximo de λ_p previsto pelo projeto da pá, λ_p .

Palavras-Chave: Construção de pás. Aerogerador de Pequeno Porte. Madeira balsa.

ABSTRACT

The construction of wind turbine blades for laboratory testing requires some care during manufacturing. All parts must have certain specified patterns of size, twisting, and roughness to have a study closer to reality. The Laboratory of Aerodynamics and Computational Fluid Mechanics (LAERO) of the Federal University of Ceará constantly uses blade prototypes for these tests. This work presents a way of making blades based on balsa wood and vinyl for later comparison with another method used as production through mold and resin. The profiles of the blades were initially designed and designed in the software SDPA and Solidworks; made from wooden rafts; mounted skeleton; and finally, everything was covered with thinner wood and finished with vinyl. Subsequently, a mechanical power generation test was performed using a torque and rotation transducer and an anemometer. The results related to the construction were positive if analyzed for the model of comparison by molds because the weight of the blades is smaller and the greater resistance imparted to the structure by means of the spar. Regarding the data, these were consistent with the power versus wind speed, since this varied between 3 and 7 m/s while the output power remained between 0.2 and 1.2 W. As for the dimensionless data of power coefficient and specific velocity, with the first varying from 0.005 to 0.055 and the other ranging from 0.1 to 0.7, the arrangement of the rotation, torque and wind velocity sensors in addition to the location of the test that was inside the LAERO itself were not adequate to arrive at the maximum value of lambda predicted by the blade design, λ_p .

Key words: Wind rotor blade construction. Small-sized wind turbine. Balsa wood.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema eólico	20
Figura 2 - Terminologia das pás.	21
Figura 3 - Corte Transversal de uma pá	22
Figura 4 - Formato das pás	23
Figura 5 - Componentes das forças	23
Figura 6 - Volume de controle.....	24
Figura 7 – Perfil escolhido	29
Figura 8 - Raio de bicicleta.....	29
Figura 9 – Impressão em folha A4 dos perfis.....	30
Figura 10 - Furo da longarina.....	31
Figura 11 - Valores das distâncias entre perfis.....	31
Figura 12 - Esqueleto da pá.....	32
Figura 13 - Madeiras de 1mm coladas.....	32
Figura 14 - Aplicação de Primer.....	33
Figura 15 - Pá finalizada.....	34
Figura 16 - Torquímetro	35
Figura 17 - Arduíno e protoboard.....	35
Figura 18 - Anemômetro	36
Figura 19 - Exaustor	36
Figura 20 – Pás Acopladas ao eixo.....	37
Figura 21 - Construção do pistão.....	37
Figura 22 - Pistão finalizado e fixado.....	38
Figura 23 - Montagem final do sistema.....	38
Figura 24 - pá impressa e pá moldada	45
Figura 25 - Bloco de notas.....	49
Figura 26 - Opção no excel.....	49
Figura 27 - Dados no excel.....	50
Figura 28 - Coluna z no excel.....	50

Figura 29 - Seleccionando-se os espaços no bloco de notas	51
Figura 30 - Retirando-se os espaços	51
Figura 31 - Software SDPA.....	52
Figura 32 – Abrindo-se arquivo no solidworks	52
Figura 33 - Abrindo-se arquivo .txt	53
Figura 34 – Pontos abertos no solidworks.....	53
Figura 35 – Desenho do ponto e da linha central	54
Figura 36 - Criando-se linha de torção	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico da relação entre Potência e velocidade do vento.	42
Gráfico 2 - Pontos de C_p versus λ	43
Gráfico 3 – Velocidade do vento versus potência de saída.	44
Gráfico 4 - Curva de C_p por λ	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da calibração de torque.....	40
Tabela 2 – Exemplo de alguns dados coletados	41
Tabela 3 - Exemplo de dados tratados.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
UFC	<i>Universidade Federal do Ceará</i>
SDPA	<i>Programa para desenvolvimento de perfis</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
GWEC	<i>Global Wind Statistics</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

U	<i>Velocidade do vento</i>
α	<i>Ângulo de ataque</i>
p	<i>Distribuição de pressão superficial</i>
T	<i>Distribuição de tensão de cisalhamento</i>
R	<i>Resultante aerodinâmica das forças</i>
M	<i>Resultante aerodinâmico dos torques</i>
U_{∞}	<i>Velocidade do vento em corrente livre</i>
N	<i>Força normal</i>
A	<i>Força tangente</i>
L	<i>Sustentação</i>
D	<i>Arrasto</i>
ρ	<i>Densidade</i>
A_r	<i>Área</i>
P_r	<i>Pressão</i>
\dot{m}	<i>Fluxo de massa</i>
P	<i>Potência</i>
T_i	<i>Impulso</i>
a	<i>Fator de indução axial</i>

C_p	<i>Coeficiente de potência</i>
λ	<i>Lambda ou velocidade específica</i>
K	<i>Constante elástica</i>
x	<i>Varição de comprimento da mola</i>
f_{atrito}	<i>Força de atrito</i>
μ	<i>Coeficiente de atrito</i>
R_{motor}	<i>Raio do motor</i>
T_s	<i>Torque de saída</i>
ω	<i>Velocidade de rotação</i>
λ_p	<i>Lambda de projeto</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVO GERAL.....	18
2.1.	Objetivos específicos	18
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1.	Energia Eólica.....	19
3.2.	Aerogeradores	19
3.2.1.	<i>Partes de um aerogerador.</i>	19
3.2.2.	<i>Terminologia das pás.....</i>	20
3.2.3.	<i>Terminologia do perfil das pás.</i>	21
3.2.4.	<i>Processo de acionamento das pás.</i>	22
3.2.5.	<i>Energia e potência extraída dos ventos.</i>	23
3.2.6.	<i>Limite de Betz</i>	26
4.	METODOLOGIA	28
4.1.	Projeto Básico	28
4.2.	Projeto Construtivo.	29
4.2.1.	<i>Longarinas</i>	29
4.2.2.	<i>Construção e corte dos perfis.....</i>	29
4.2.3.	<i>Corte Manual</i>	30
4.2.4.	<i>Acoplamento dos perfis às pás.</i>	31
4.2.5.	<i>Fixação das madeiras de cobertura.....</i>	32
4.2.6.	<i>Balanceamento das pás.</i>	33
4.2.7.	<i>Finalização com vinil.</i>	33
4.3.	Instrumentação.....	34
4.3.1	<i>Torquímetro</i>	34
4.3.2.	<i>Placa e Arduíno</i>	35
4.3.3.	<i>Anemômetro</i>	35
4.4.	Montagem do sistema de medição.....	36

<i>4.4.1. Acoplamento das pás</i>	36
<i>4.4.2. Ligação da placa e o arduino com torquímetro</i>	37
<i>4.4.3. Pistão de freio</i>	37
<i>4.4.4. Montagem final para testes</i>	38
<i>4.4.5. Calibração dos sensores</i>	38
<i>4.4.6. Coleta de dados.</i>	39
5. RESULTADOS	40
5.1. Discussão dos resultados	42
6. CONCLUSÃO	47
APÊNDICE	51
BIBLIOGRAFIA	55

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade utiliza-se sistemas de captação da energia dos ventos. Alguns dos primeiros registros datam de 200 A.C. na Pérsia, como uma espécie de cata-vento. Essa utilização era feita, principalmente, para bombeamento de água. A partir do séc. XIII eles já eram parte da economia rural (BURTON, 2001). No entanto, nas últimas duas décadas, os aerogeradores passaram a ser utilizados em larga escala para geração de energia elétrica. (GWEC, 2015)

Esses sistemas consistem na captação da energia dos ventos e posterior conversão em energia mecânica. A partir disto é utilizado um motor elétrico para geração de eletricidade.

A utilização desses sistemas vem crescendo significativamente há cerca de duas décadas. A capacidade acumulada das instalações no mundo era em torno de 17.400 MW em 2000 e em 2016 passou a ser de 432.419 MW, (GWEC, 2015). Dados nacionais também mostram o crescimento dessa utilização no Brasil de 2005 até 2014, (BEM 2015). Pela análise de todos estes dados, a tendência é que o aumento de instalações de aerogeradores em todo o planeta continue.

No entanto, para que sejam feitas instalações desse tipo são necessários estudos envolvendo regime anual dos ventos, terreno e geografia local, já que essas variáveis alteram o resultado da geração final. Logo, não é necessariamente simples fazer um levantamento de geração em um projeto eólico, (BURTON, 2001). Tendo em vista tais dificuldades, faz-se necessário elaborar projetos com mecanismo e designs que ajudem na captação da energia dos ventos, privilegiando, por exemplo, o formato aerodinâmico das pás, acoplamentos, motores, sensores e alguns outros.

Dentre os fatores mencionados anteriormente, as pás de um aerogerador influenciam diretamente o processo de transformação da energia associada ao movimento dos ventos. Para estes processos de conversão, tem-se dois tipos principais de aerogeradores: os de eixo horizontal e os de eixo vertical, (MANWELL, 2009). O primeiro tem por característica utilizar, através de uma resultante de forças atuantes sobre a pá, uma força conhecida como sustentação, e o segundo, também através de uma resultante de forças, utiliza um arrasto sobre as pás.

A construção das pás, então, torna-se extremamente importante. Erros durante a sua confecção podem levar a imperfeições e gerar, por consequência, problemas com balanceamento, perda de sustentação, dentre outros. Este trabalho pretende apresentar uma forma de construção de pás através do uso de madeira balsa e vinil.

Considerando-se a construção de pás, a obtenção dos melhores resultados se dá quando os conjuntos são confeccionados utilizando-se o melhor design possível comparados com o modelo proposto pelo *software* SDPA que faz estimativa teórica dos parâmetros das pás como tamanho, grau de torção e tipo de perfil para que se minimize o número de erros, pois um simples defeito na fabricação pode influenciar o processo de geração de potência como também problemas relacionados à obtenção de dados em testes em laboratório ou em campo.

No laboratório da universidade são estudados diversos tipos de aerogeradores de pequeno porte. A construção das pás torna-se um ponto chave para muitos dos experimentos. Portanto, um processo de fabricação que consiga trazer um bom resultado para os testes com boa aerodinâmica e resistência facilitaria futuros experimentos dentro do próprio laboratório.

2. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo de projetar e construir um conjunto de três pás de aerogerador de eixo horizontal utilizando-se madeira balsa como base para posterior teste em uma bancada. O perfil selecionado foi o *National Renewable Energy Laboratory* NREL S809, com a velocidade relativa de ponta de pá igual a 7 que relaciona a velocidade do vento com a velocidade de rotação na ponta das pás e que também é conhecida como λ_p , além possuir comprimento de 0,5m.

2.1. Objetivos específicos

Para que seja atingido o objetivo geral, serão necessárias as seguintes etapas:

- Confeção de três pás;
- Montagem do sistema na bancada de teste;
- Coleta de dados de velocidade de rotação, torque e velocidade do vento;
- Avaliação e comparação de resultados da confecção e dos dados coletados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Energia Eólica

Os ventos são causados pela diferença de pressão em pontos diferentes da Terra através do aquecimento causado pela radiação solar incidente na superfície. O ar em um ponto mais próximo ao equador, com um maior índice de radiação, sofre um maior aquecimento, ocorrendo a diminuição da densidade do ar neste local. O inverso ocorre mais próximo aos polos, logo, forma-se um ponto de maior pressão comparado com o equador que, por consequência, desloca a massa densa de ar na direção do local de menor densidade. Outro ponto em questão consiste no fato de a velocidade de rotação da terra variar em torno de 600 Km/h partindo-se do equador até ser zero nos polos. Estes efeitos causam o deslocamento de ar que conhecemos como os ventos. (MANWELL, 2009)

3.2. Aerogeradores

Aerogeradores têm por característica a capacidade de captar a energia cinética da movimentação dos ventos para transformação em energia elétrica.

O conjunto de pás possui geometria, posição e fixação específicas e, ao ser atingido pelos ventos em uma determinada direção, começa a rotacionar um eixo que está acoplado diretamente por correias ou por engrenagens a um motor elétrico. Como resultado dessa movimentação é criada uma potência elétrica de saída.

3.2.1. Partes de um aerogerador.

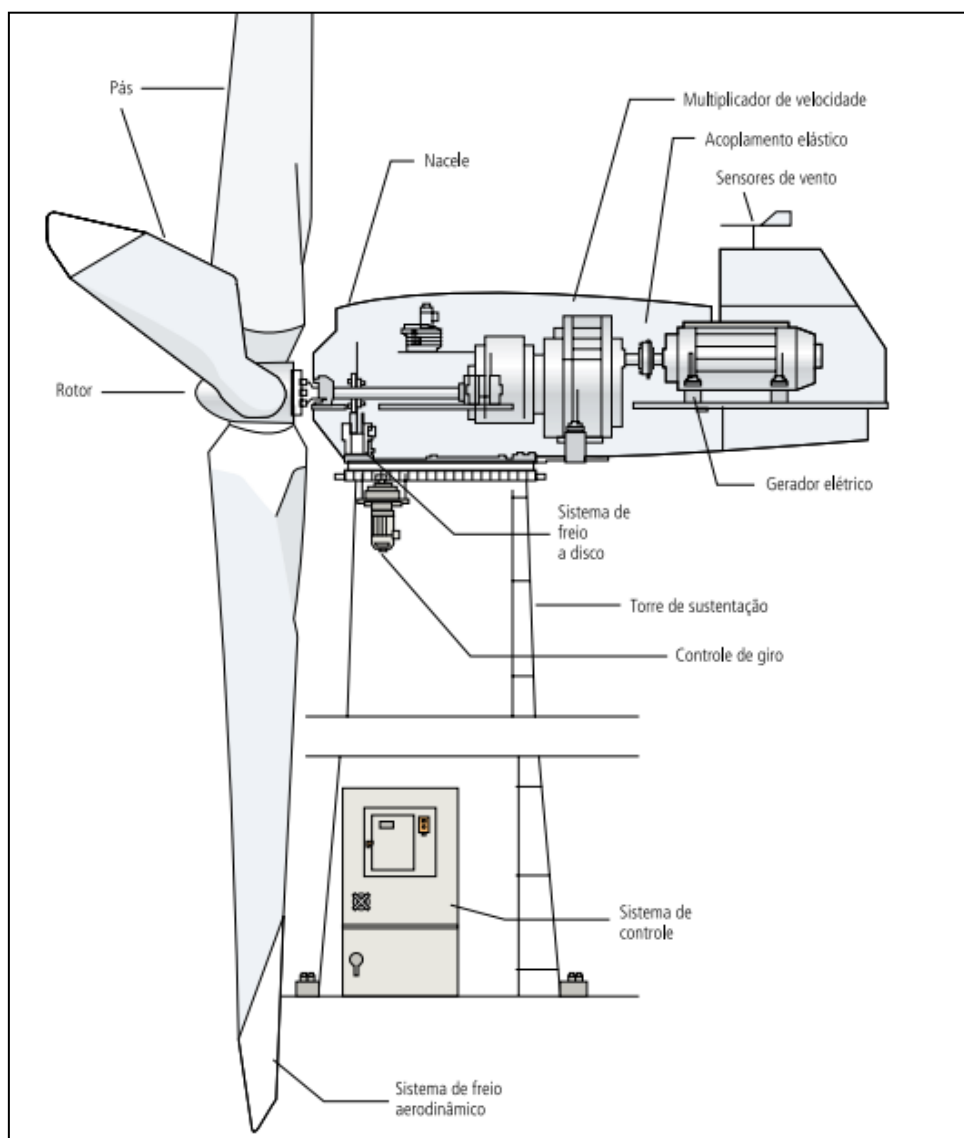
Estes mecanismos se subdividem em:

- Torre: parte estrutural instalada em uma fundação de suporte para o todo o sistema instalado.
- Nacele: onde está localizado a parte mecânica de engrenagens caso existam, o gerador, sistema de Yaw responsável por rotacionar o aerogerador em torno da torre para colocá-lo na direção do vento, sensores, Hub ou Cubo responsável para acoplamento das pás e outros componentes do sistema.

- Pás: acopladas ao hub ou cubo, parte mecânica que sofre ação dos ventos para transformação de um movimento linear em um movimento angular.

A Figura 1 mostra um sistema eólico.

Figura 1 - Sistema eólico



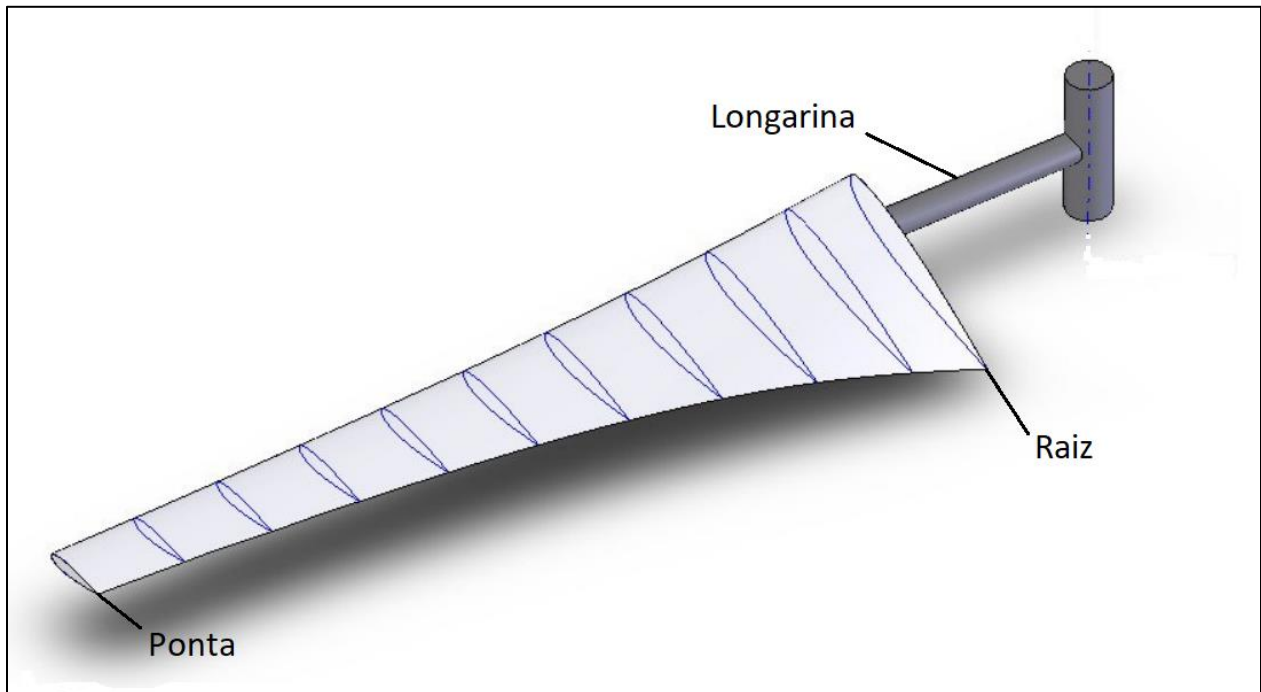
Fonte: Atlas de Energia Eólica do Brasil (2002).

3.2.2. Terminologia das pás.

As pás possuem três partes principais para sua diferenciação. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático.

- Raiz da pá: região mais próxima ao hub.
- Ponta: região mais distante do hub.
- Longarina: filamento que transpassa os perfis e que fixa as pás ao hub.

Figura 2 - Terminologia das pás.



Fonte: Wenzel, 2007. Adaptado pelo autor.

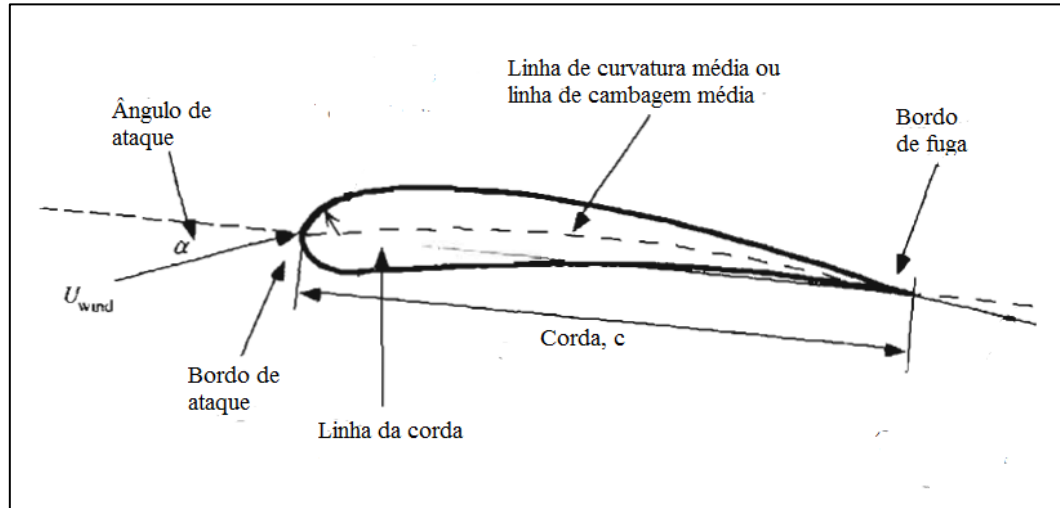
3.2.3. Terminologia do perfil das pás.

O perfil da pá de um aerogerador é dividido em várias partes para caracterização:

- α : ângulo de ataque que representa o ângulo feito entre o vento e a linha de corda.
- Bordo de ataque: ponto inicial do escoamento do vento.
- Bordo de fuga: ponto final do escoamento do vento.
- Linha de curvatura média: linha média entre a superfície superior e inferior.
- Corda: maior distância entre bordo de ataque e bordo de fuga.

Na Figura 3 encontra-se uma ilustração do perfil de uma pá.

Figura 3 - Corte Transversal de uma pá



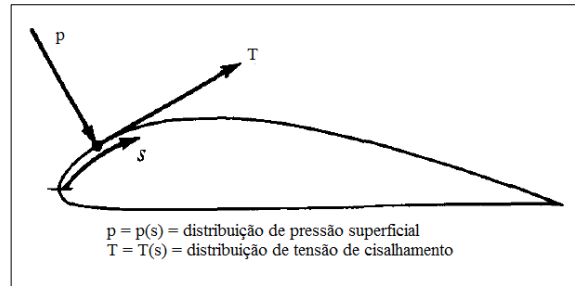
Fonte: MANWELL (2009), adaptada pelo autor.

3.2.4. Processo de acionamento das pás.

O processo da movimentação das pás é baseado na Força de Sustentação, que age perpendicularmente à direção da corda da pá. (ANDERSON, 2001)

O fluxo de ar inicia seu movimento no bordo de ataque da pá, causando uma distribuição de pressão. Devido ao formato diferenciado entre as superfícies superior e inferior como também à direção do fluxo de ar, uma diferença de pressão é causada como mostrado na Figura 4. Além disso, existe como resultado do fluxo de ar, a distribuição de tensão de cisalhamento que vai criar um arraste sobre o corpo, atuando como atrito. A diferença de pressão normal ao corpo cria uma força conhecida como sustentação (L) e a diferença de pressão tangente ao corpo cria uma força conhecida como força de arraste (D), (ANDERSON, 2001). Na Figura 5, observa-se a resultante de todas as forças sobre a pá.

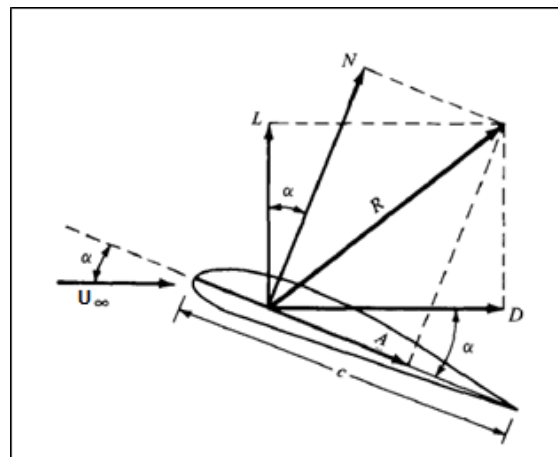
Figura 4 - Formato das pás



Fonte: Anderson (2001), adaptada pelo autor.

Na Figura 6 é mostrado a resultante L e D , sustentação e arraste, respectivamente. Observa-se que a sustentação é a responsável pelo movimento das pás em aerogeradores de eixo horizontal. Sendo N e A as componentes normais e axiais, respectivamente, (ANDERSON, 2001).

Figura 5 - Componentes das forças

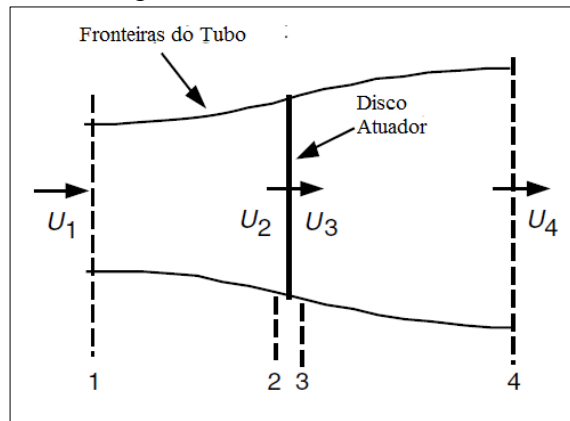


Fonte: Anderson (2001), adaptada pelo autor.

3.2.5. Energia e potência extraída dos ventos.

Partindo-se de um volume de controle com o formato de um tubo com áreas de um dos lados menor que a área do outro lado, como na Figura 7. Há um fluxo de ar dentro desse tubo partindo ponto 1 para o ponto 4. Entre o ponto 2 e 3 existe um disco atuador que cria uma diferença de pressão entre estes dois pontos.

Figura 6 - Volume de controle



Fonte: Anderson (2001), adaptada pelo autor.

Considerando-se:

- O fluido incompressível;
- Regime do fluxo permanente;
- Número de pás infinito, condição ideal para que não haja fluxo de ar entre as pás;
- Força aplicada sobre o rotor uniforme;
- Esteira não rotacional, condição idealizada para o ar não retorne;
- Pressão estática no ambiente.

Aplicando-se conservação do momento linear ao volume de controle, encontra-se:

$$T = U_1(\rho A_r U)_1 - U_4(\rho A_r U)_4 \quad (1)$$

T é a força líquida resultante ou impulso axial que age sobre a turbina, ρ a densidade do fluido, A a área seccional e U a velocidade do ar.

Segundo a consideração de escoamento permanente: $(\rho A_r U)_1 = (\rho A_r U)_2 = \dot{m}$.

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2)$$

O impulso T_i é positivo, então a velocidade atrás do rotor, U_4 , é menor que e a de corrente livre. Nenhum trabalho é realizado. Logo, é possível a utilização da equação de Bernoulli nos dois volumes de controle antes e depois do disco atuador.

$$P_{R1} + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = P_{R2} + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (3)$$

$$P_{R3} + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = P_{R4} + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (4)$$

Assumindo-se que pressões 1 e 4 são iguais e que $U_2 = U_3$. Encontra-se que:

$$T_i = A_{r2}(P_{R2} - P_{R3}) \quad (5)$$

Substituindo-se as equações 3 e 4 em 5:

$$T_i = \frac{1}{2}\rho A_{r2} (U_1^2 - U_4^2) \quad (6)$$

Utilizando-se a equação 2 em 6, encontra-se:

$$U_2 = (U_1 + U_4)/2 \quad (7)$$

Definindo-se a como um fator de indução axial, que é o decréscimo fracional da velocidade do vento entre a corrente livre e o rotor:

$$a = (U_1 - U_2)/U_1 \quad (8)$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (9)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (10)$$

A potência, em termos de saída, é igual ao impulso axial com a velocidade do disco:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_{r2} (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2}\rho A_{r2} (U_1 + U_4) U_2(U_1 - U_4) \quad (11)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho U^3 4a (1 - a)^2 \quad (12)$$

A área A_{r2} no volume de controle é chamada de A_r e a velocidade de corrente livre U_1 chamada de U .

As turbinas são caracterizadas pelo coeficiente de potência C_p , que cresce a zero o valor máximo que será mostrado posteriormente.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A_r} = \frac{\text{PotênciadoRotor}}{\text{PotênciadoVento}} \quad (13)$$

3.2.6. Limite de Betz

O vento possui uma determinada potência, no entanto um rotor não é capaz de extrair toda essa energia cinética contida no fluxo de ar. Tomando-se isso em consideração deve-se chegar ao limite máximo que um rotor poderia captar para sua movimentação.

Utilizando-se o coeficiente de potência $C_p = 4a(1 - a)^2$ e derivando-se essa equação e igualando-se a zero, é encontrado o valor de $a=1/3$ como valor de máximo da curva. Aplicando-se a equação esse valor, é encontrado:

$$C_{p,Max} = 16/27 = 0,5926.$$

Este valor é conhecido como limite de Betz.

3.2.7. Lambda de projeto λ

Um ponto muito importante que deve ser considerado também é a relação entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento que é conhecida como a velocidade específica, λ .

$$\lambda = \frac{U}{\omega R} \quad (14)$$

O coeficiente de potência máxima, $C_{p,Max}$, é relacionado diretamente com o valor do λ , fornecendo um valor onde eficiência é máxima e que possui valor λ_p , conhecido como razão de velocidade específica de projeto.

3.2.8. Torque de atrito

Foi desenvolvido um dispositivo para leitura no torquímetro. Para a correta leitura de torque, é necessário que haja alguma outra força que gere um torque contrário ou a favor do

movimento das pás, portanto foi criado um pistão com uma borracha de coeficiente de atrito conhecido e com constante elástica da mola também conhecida. Nas Figura 21 e 22 é mostrado o processo de construção do pistão e ele finalizado, respectivamente.

No equilíbrio de forças entre o pistão e o cilindro do motor, a força elástica é igual a força normal aplicada.

$$N = F_{elástica} \quad (15)$$

Quando as pás giram o eixo, é criada uma força contrária ao movimento, f_{atrito} . Essa força de atrito multiplicada ao raio do motor, R_{motor} , gera um torque de atrito, T_{atrito} .

Como $F_{elástica} = Kx$ e $f_{atrito} = \mu.K.x$. Em que μ é o coeficiente de atrito entre a borracha e o metal, x é a variação de comprimento causada na mola e K é a constante elástica da mola calculada em laboratório, tem-se:

$$N = Kx \quad (16)$$

$$f_{atrito} = \mu.N \quad (17)$$

$$f_{atrito} = \mu.K.x \quad (18)$$

$$T_{atrito} = \mu.K.x.R_{motor} \quad (19)$$

3.2.9. Potência de saída do motor

Para cálculo da potência de saída são necessárias duas informações: torque, T_s , e velocidade de rotação, ω . É calculado através da Equação 20.

$$P = T_s \cdot \omega \quad (20)$$

4. METODOLOGIA

O processo de fabricação de pás para aerogeradores de pequeno porte segue alguns passos. Dentre outras formas de fabricação será exposto aqui a construção através do uso de madeira balsa e vinil envoltos em uma longarina, tubo que funciona como estrutura de sustentação de toda a pá.

Um exemplo de outro tipo de construção utilizado para comparação funciona através do uso de moldes e de resina. São construídos dois moldes das duas faces de cada pá através de uma fresadora CNC em madeira balsa. Após essa construção, é utilizada uma técnica de moldagem com borracha líquida. Para criação das pás foi utilizado poliéster cristal, Carneiro (2015).

Para a construção das pás com madeira balsa são necessários alguns procedimentos. Os passos para a construção são divididos em:

- Desenho do protótipo;
- Impressão e colagem nas folhas de madeira;
- Corte, acabamento e furos;
- Acoplamento de perfis à longarina e aplicação de ângulos;
- Aplicação de madeira balsa de menor espessura;
- Aplicação de vinil;

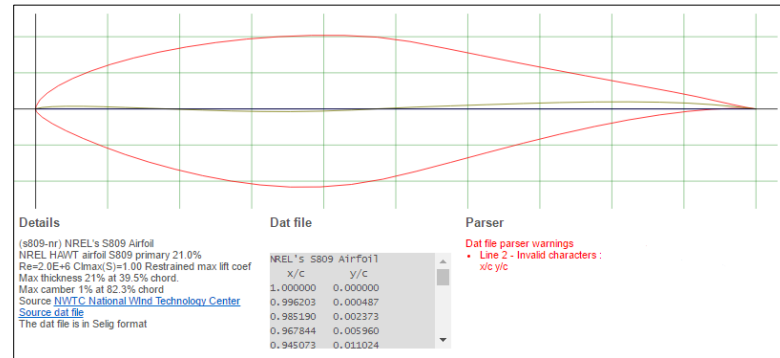
Materiais, ferramentas e modo de confecção serão demonstrados durante cada parte do processo.

4.1. Projeto Básico

Deve-se, primeiramente, levar em consideração o lambda de projeto (λ_p) e raio do rotor R. Tendo-se em mãos esses dados, procura-se o perfil adequado. No presente trabalho utilizou-se o NREL S809.

Os dados dos pontos para a construção do perfil foram obtidos no site da NASA disponível em <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s809-nr> como mostrado na Figura.

Figura 7 – Perfil escolhido



Fonte: NASA (2017)

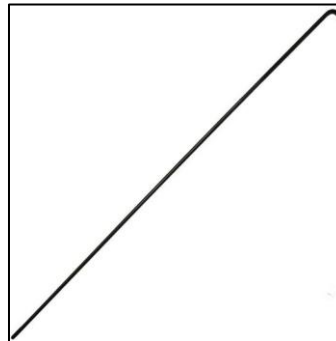
O Anexo I contém uma sugestão de construção em Excel e Solidworks para posterior impressão em folha A4 dos perfis..

4.2. Projeto Construtivo.

4.2.1. Longarinas

As longarinas usadas foram raios de bicicletas feitas de aço e com dimensões de 0,5 m de comprimento e 2,0 mm de espessura. Na Figura 9 é mostrado um dos raios usados.

Figura 8 - Raio de bicicleta



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.2. Construção e corte dos perfis.

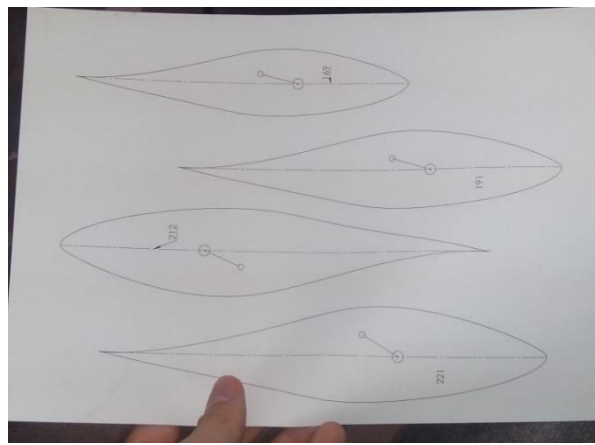
Inicialmente, deve-se ter em mãos os dados geométricos principais obtidos no programa SDPA, que são: o tamanho da corda de cada perfil e distância entre cada perfil. Somente através desses dados serão obtidos os valores corretos para ser construído o esqueleto e a pá por completo.

O SDPA é um programa que foi desenvolvido por Almeida (2013) no próprio LAERO que calcula os dados geométricos das pás fornecendo, assim, as dimensões de cada perfil e as distâncias entre eles.

4.2.3. Corte Manual

Para que seja feito o corte dos perfis na madeira balsa, é necessária a utilização de um molde como referência. Uma forma simples de obter isso é através da impressão em folhas de papel A4 dos perfis que foram desenhados no Solidworks e sua posterior aplicação sobre a madeira balsa com cola branca. A Figura 10 apresenta a impressão que foi feita para a fixação.

Figura 9 – Impressão em folha A4 dos perfis

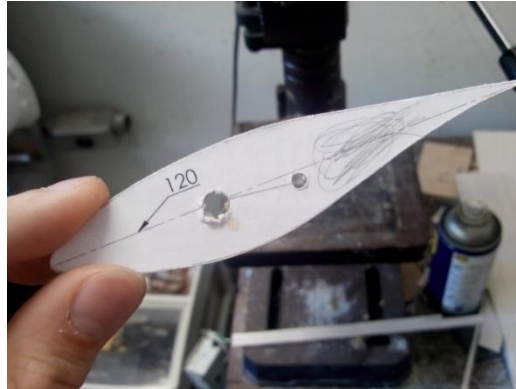


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após a fixação das folhas sobre a madeira de 5mm, é utilizada um serra tico-tico para o corte dos perfis, passando pelas linhas. Então, é feito o acabamento utilizando-se lixas 180.

Para a fixação dos perfis à longarina, são feitos furos no ponto central dos perfis com uma furadeira e broca relativa ao tamanho da longarina utilizada. A Figura 11 representa o exemplo de um perfil que passou por esse processo anterior.

Figura 10 - Furo da longarina



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.4. Acoplamento dos perfis às pás.

Após todos os perfis terem sido cortados, lixados e furados, cada perfil foi posicionado para sua posterior fixação. Foram colocados os perfis na longarina um por um. Na Figura 12 é mostrado como deverá ficar a montagem.

As distâncias entre os perfis são mostradas diretamente no SDPA. Os valores (das distâncias se encontram na parte de “Projeto Geométrico da Pá” escritos na coluna “r/R” do programa como mostrado na Figura 12.

Figura 11 - Valores das distâncias entre perfis

raio	r/R	Âng. fluxo(
0,10000	0,10000	36,67199
0,14737	0,14737	29,40631
0,19474	0,19474	24,17562
0,24211	0,24211	20,36216
0,28947	0,28947	17,51109
0,33684	0,33684	15,32143
0,38421	0,38421	13,59743
0,43158	0,43158	12,21006

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 13 é mostrado os perfis antes de serem colocadas as distâncias corretas.

Figura 12 - Esqueleto da pá



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para angulação foi utilizado um gabarito em que cada ponta do perfil fica sobre o ponto correto referente ao gabarito. Após todas as pontas dos perfis estarem corretamente sobre o gabarito, é utilizado resina EPOXI para fixação dos perfis à longarina.

4.2.5. Fixação das madeiras de cobertura.

Devem ser coladas as madeiras balsas de 1mm com as fibras na direção paralela à longarina, como na Figura 14. Uma a uma vai sendo retalhada e colada lado a lado até que os dois lados da pá estejam preenchidos. Então, deve-se posteriormente lixar toda a pá com as lixas 100 e, depois, com as lixas 180, antes de ser colocado o vinil para que assim seja retirado o máximo de imperfeições.

Figura 13 - Madeiras de 1mm coladas



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.6. Balanceamento das pás.

Foi utilizado o Spray Primer Rápido Colorgin® para que todas as pás ficassem com o mesmo peso. Para isto foi utilizado uma balança de precisão para medição do peso de cada uma. Cada uma ficou com o peso de 50g, e o resultado é mostrado na Figura 15.

Para se encontrar o centro de gravidade, segurou-se nos centros das pás até que elas tivessem equilibradas. Desta forma, calculou-se a distância da raiz até o ponto de equilíbrio. Elas apresentaram uma pequena variação com uma delas ficando em torno do de 17,1 cm, a outra com 16,7 cm e a terceira com 16,9 cm.

Figura 14 - Aplicação de Primer



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

4.2.7. Finalização com vinil.

Por último é aplicado vinil que é um material termo moldável. Após aplicação do filme sobre as pás, passou-se uma máquina de ferro de passar específico para o material. Função dessa finalização é dar o acabamento e diminuir a rugosidade. Na Figura 16 é mostrado o resultado.

Figura 15 - Pá finalizada



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.3. Instrumentação

Para uma melhor compreensão, foi realizado um teste em bancada com as pás construídas. Para isso todos os instrumentos foram detalhados a seguir.

4.3.1. Torquímetro

Instrumento capaz de medir torque produzido em um eixo. O utilizado foi o T20WN da *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* com capacidade de medição para rotação até 3000rpm com medição de torque entre 0,1Nm até 200Nm. A tolerância é de $\pm 0,2\%$. É mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Torquímetro

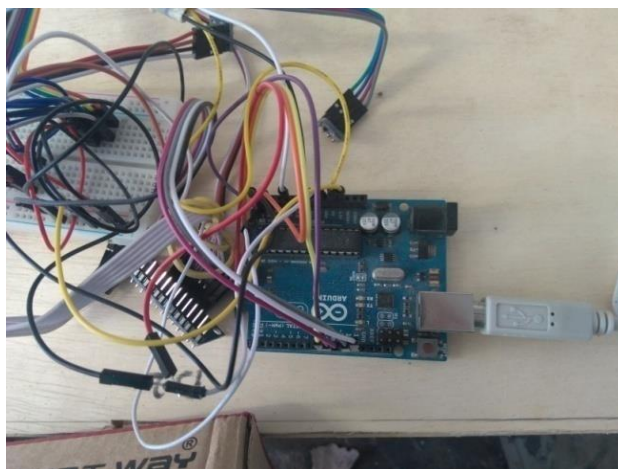


Fonte: Manual Hottinger Baldwin Messtechnik.

4.3.2. Placa e Arduíno

Responsável pela coleta e tratamento dos dados de rotação e torque. A placa e software já eram do próprio LAERO. Na Figura 17 é mostrada a configuração do sistema.

Figura 17 - Arduíno e protoboard



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.3.3. Anemômetro

Instrumento que mede a velocidade do vento. O utilizado foi o anemômetro de fio quente TAFR-180 da Instrument. Ele se baseia no aquecimento de uma resistência e posterior conversão do sinal térmico em sinal mecânico. Na Figura 18 é mostrado.

Figura 18 - Anemômetro



Fonte: Site Instruterm

4.3.4. Exaustor

Foi utilizado um exaustor construído por um aluno do laboratório que utiliza um exaustor construído com um motor WEG W22 PLUS 3Kw que movimenta seis hélices como mostrado na Figura 19 e um sistema de controle de rotação em rpm com que é possível variar a velocidade de rotação da hélice.

Figura 19 - Exaustor



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

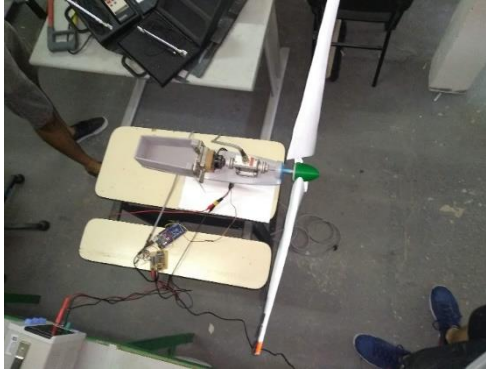
4.4. Montagem do sistema de medição

4.4.1. Acoplamento das pás

Inicialmente, para averiguação de dados, montou-se as pás a um suporte projetado para ser acoplado ao eixo da bancada de testes. Este suporte pode ser observado na Figura 20.

As pás foram parafusadas e posteriormente acopladas ao eixo da bancada.

Figura 20 – Pás Acopladas ao eixo



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

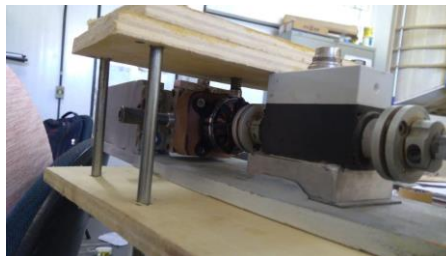
4.4.2. Ligação da placa e o arduíno com torquímetro

Um cabo de dados é ligado ao torquímetro para receber as informações pela placa e transformá-los para que sejam lidos pelo Arduíno. Este, por sua vez, transforma os dados que são mostrados no monitor do computador.

4.4.3. Pistão de freio

Para a leitura correta do torquímetro, é necessário que haja um diferencial de torques. Para tanto, foi criado um dispositivo com a finalidade de criar um torque de atrito calculado para posterior correção nas leituras feitas pelo computador. Para tanto, foi construído um pistão com uma mola com constante elástica medida em laboratório e uma borracha presa a ponta do parafuso que serviria como pistão com coeficiente de atrito tabelado e dimensões conhecidas. S figuras 21 e 22 é mostrado o sistema criado.

Figura 21 - Construção do pistão



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Figura 22 - Pistão finalizado e fixado



Fonte: elaborada pelo autor.

4.4.4. Montagem final para testes

O sistema é montado com o exaustor paralelo ao eixo do aerogerador a uma distância de 1,90 m e paralelo também ao anemômetro de medição dos ventos. Ele tem a função de criar o vento para os testes e é mostrado na figura 23.

Figura 23 - Montagem final do sistema



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

4.4.5. Calibração dos sensores

O torquímetro foi calibrado separadamente para a leitura dos torques e de velocidades. Para a velocidade de rotação foi utilizado um estroboscópio Lutron DT-2239A e para os torques foram utilizados pesos graduados.

Para o torquímetro, foi travado o eixo onde está localizado o motor utilizando-se alicates de pressão. Enquanto na parte em que se localiza o Cubo foram utilizados pesos graduados presos por fios de nylon fixados em um Hub de raio conhecido. Conforme os pesos aumentavam, era calculado um novo valor de torque. Pelas leituras relacionadas ao torque foram obtidos os seguintes dados na Tabela 1.

Para a calibração da rotação, foi deixado o eixo livre e foi ligado o motor em diversas velocidades. Para cada velocidade foi utilizado um estroboscópio e anotado a velocidade referente àquela determinada rotação.

Contudo, durante a calibração do mesmo todos os dados lidos estavam iguais no monitor e no estroboscópio. Portanto, não foi necessário calibração.

4.4.6. Coleta de dados.

Utilizou-se a sala do LAERO para os testes, com velocidade do vento variando de 2,61 m/s a 7,42 m/s sendo medido pelo anemômetro. Os dados de rotação e torque foram coletados através do torquímetro. A potência gerada é calculada pela Equação 20.

Para os testes foi alterado o valor no visor do controlador do exaustor CFW variando-se de 30 em 30 rpm partindo-se do valor de 550 rpm, que foi o valor inicial que as pás começaram se mover. Cada valor era fixado até que fossem realizadas as medições necessárias. Os dados foram colhidos no torquímetro a cada meio segundo durante aproximadamente por um minuto. Os dados do anemômetro foram colhidos olhando-se o valor no seu visor e anotando-se o máximo de pontos possível.

5. RESULTADOS

Tabela 1 - Dados da calibração de torque

Peso (g)	Real (N.m)	Monitor com resíduo	Monitor sem resíduo	Relação (Real/Monitor)	Calibrado	Erro (%)
0	0	32.26	0.00	0	0	
0.1	0.01473	43.99	11.73	0.001255754	0.01254	14.88%
0.2	0.02946	57.68	25.42	0.00115893	0.02717	7.77%
0.3	0.04419	71.36	39.10	0.001130179	0.04179	5.42%
0.4	0.05892	88.95	56.69	0.001039337	0.0606	-2.85%
0.5	0.07365	104.59	72.33	0.00101825	0.07732	-4.98%
0.6	0.08838	118.28	86.02	0.001027435	0.09195	-4.04%
0.7	0.10311	131.96	99.70	0.001034203	0.10657	-3.36%
0.8	0.11784	145.65	113.39	0.001039245	0.12121	-2.86%
0.9	0.13257	159.34	127.08	0.001043201	0.13584	-2.47%
1	0.1473	176.93	144.67	0.001018179	0.15464	-4.98%
1.1	0.16203	190.62	158.36	0.001023175	0.16928	-4.47%
1.2	0.17676	202.35	170.09	0.001039215	0.18181	-2.86%

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Através dos dados da tabela 1, fazendo-se uma média entre os valores da coluna Relação(Real/Monitor), encontramos o valor de 0.001068925 que é utilizado multiplicado aos valores retirados do torquímetro durante os testes.

A coluna “Monitor com resíduo” representa o torquímetro quando ligado com um resíduo de valores. Ou seja, quando não há nenhum peso, ele apresenta esses valores. Na coluna posterior esses valores já estão subtraídos dos valores residuais.

Tabela 2 – Exemplo de alguns dados coletados

CFW	Rotação (rpm)	Torque (Monitor)	Velocidade do Vento (m/s)
910	44	90,91	7,06
880	41	61.58	6.22
850	35	57.67	5.52
820	29	73.31	5.02
790	47	53,76	4,74
760	36	63,54	4,54
730	18	88,95	4,1
700	10	59,63	3,93
670	34	88,95	3,8
640	25	47,9	3.51
610	10	77,2	3,39
580	17	69.4	3.37
550	15	45,94	3.27

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Tabela 3 é mostrado os dados da Tabela 2 já tratados e nas mesmas unidades para posterior análise.

Tabela 3 - Exemplo de dados tratados

Velocidade do Vento (m/s)	Torque (Nm)	Rotação (rad/s)
7,06	0,1658	4,6077
6,22	0,1345	4,2935
5,52	0,1303	3,6652
5,02	0,1470	3,0369
4,74	0,1261	4,9218
4,54	0,1366	3,7699
4,1	0,1637	1,8850
3,93	0,1324	1,0472
3,8	0,1637	3,5605
3,51	0,1198	2,6180
3,39	0,1512	1,0472
3,37	0,1428	1,7802
3,27	0,1177	1,5708

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.1. Discussão dos resultados

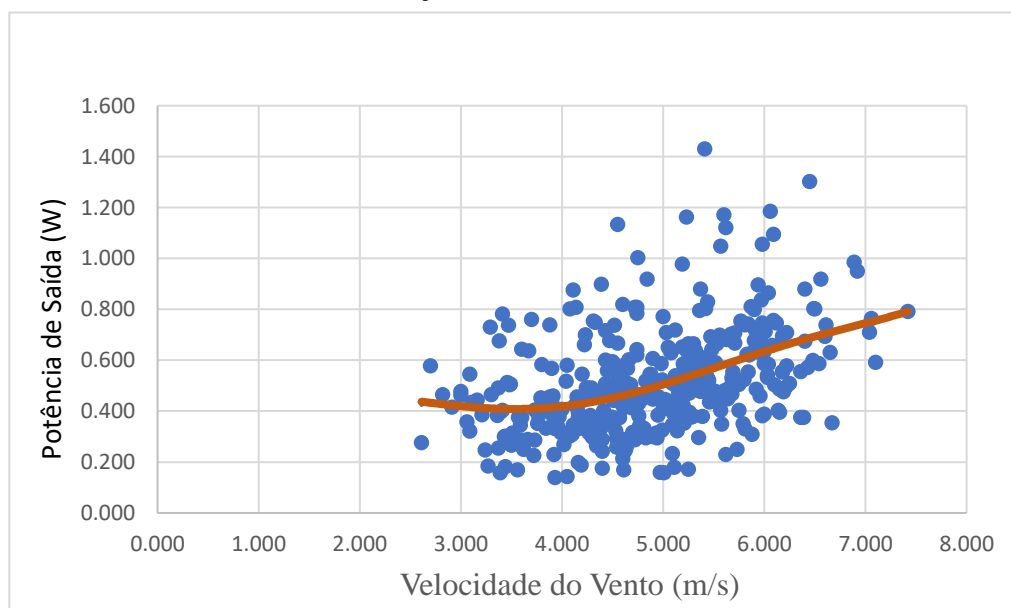
Ao final dos cinco dias de testes foram feitas inspeções visuais, e não foi observado nenhuma trinca ou fratura em nenhum ponto das pás.

Com as pás desafixadas do hub, tentou-se movimentar as longarinas de cada pá individualmente, puxando e rotacionando os raios para se ter conhecimento de que estes ainda estavam fixos aos perfis. Chegou-se à conclusão de que eles permaneceram exatamente da mesma forma como quando foram construídos.

Um problema observado diretamente durante os testes foi a questão da oscilação. Devido à longarina possuir um diâmetro pequeno e haver somente uma, as pás oscilaram durante os testes. Essas oscilações podem gerar vibrações durante a leitura dos sensores e causarem variação nos resultados durante os testes.

Com relação aos testes, no Gráfico 1 é mostrado a relação entre a velocidade do vento e a potência gerada, além de ter sido gerada uma curva através de regressão linear polinomial. O mesmo condiz com realidade visto que quanto maior a velocidade do vento, maior a potência será produzida. Logo, esses dados apresentaram-se coerentes, pois a curva tendeu a uma ascendente.

Gráfico 1 - Gráfico da relação entre Potência e velocidade do vento.



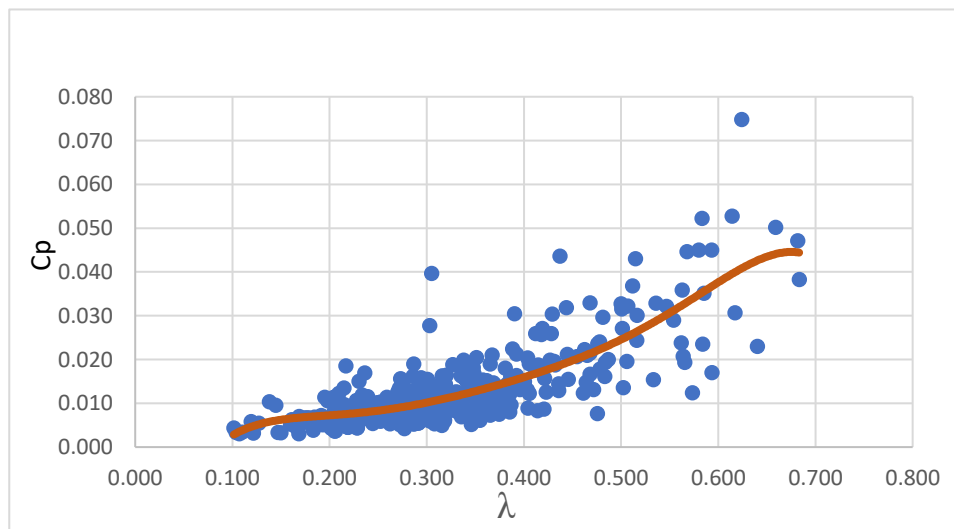
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

No Gráfico 2 pode-se verificar a relação entre C_p e λ , além também de outra regressão linear polinomial para a criação de uma curva. Os valores, principalmente, de λ ficaram muito abaixo dos valores que deveriam surgir nas medições que seriam entre 0 e 7. Esse parâmetro identifica a relação entre o coeficiente de potência e a velocidade de ponta de projeto da pá. Ou seja, para uma pá de lambda 7, ao ser atingido este valor, o C_p será o máximo, pois ela havia sido projetado para isso. O fato dos testes não terem ocorrido em um ambiente controlado, dentro de um túnel de vento geraram inadequações relacionados as medições.

O vento proveniente do exaustor sofria grande variação em seu fluxo, possivelmente devido ao formato da sala de testes. Além disso era gerado muita turbulência, o que pode ser observado na variação de torque, rotação e velocidade do vento. Isso dificulta a análise das pás construídas.

O sistema de aquisição de dados também sofreu influência com relação à vorticidade e refluxo do vento gerado pelo exaustor. Vorticidade apresenta-se quando surge movimento circulatorios dos vento e refluxo ocorre quando o vento que já passou pelas pás de alguma forma ainda influi no movimento de rotação. Esses efeitos influenciaram tanto nas próprias pás quanto na leitura do anemômetro. Este sofria uma oscilação muito alta de seus valores.

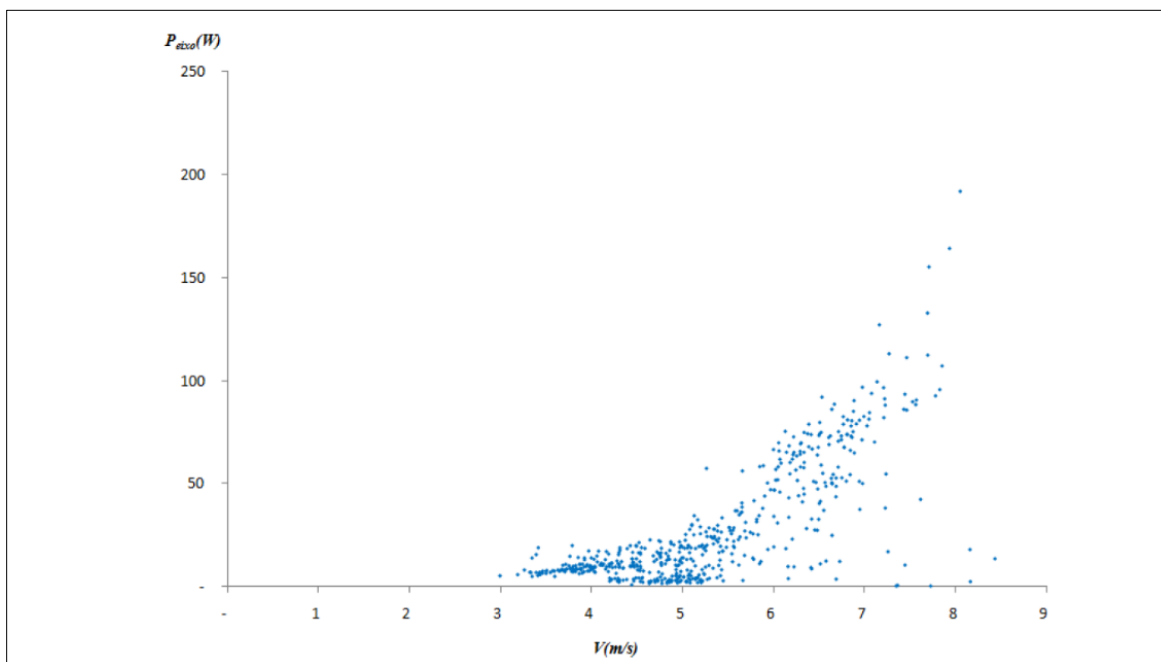
Gráfico 2 - Pontos de C_p versus λ



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

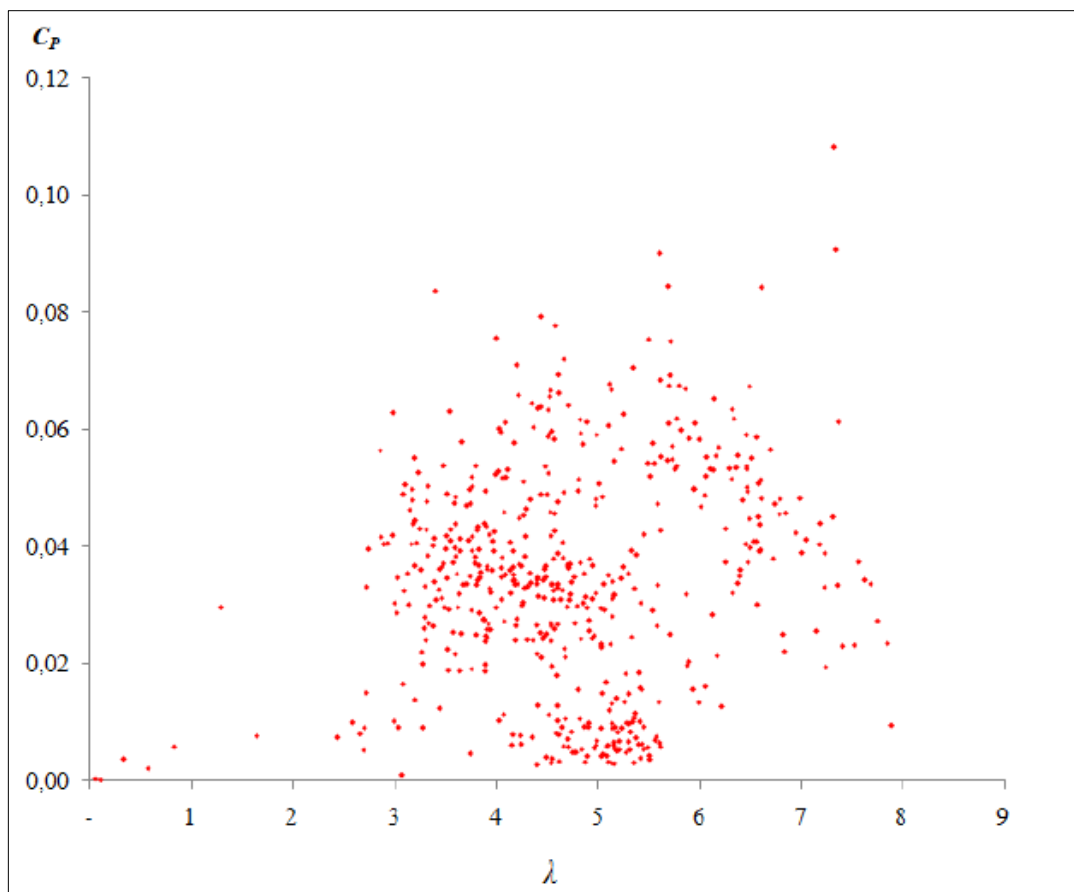
Utilizando-se dados do trabalho de (Lopes, 2011), que foi testado um conjunto de três pás com mesmas características, mudando-se apenas o tamanho das mesmas, no qual havia sido utilizadas pás de 3 metros de comprimento, observa-se que, nos dois casos, há uma tendência dos valores de potência de crescer conforme a velocidade do vento aumenta como mostrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Velocidade do vento versus potência de saída.



Fonte: Lopes (2011).

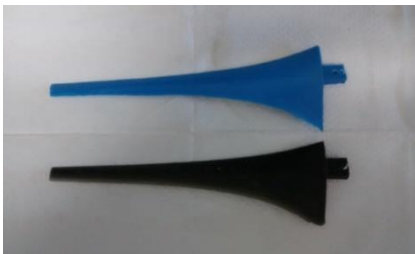
No Gráfico 4 é mostrado uma relação entre C_p e λ também do trabalho de Lopes (2011). Pelo fato de não se conseguido atingir valores muito mais altos de que $\lambda = 1$, não é possível fazer uma fazer uma análise de comparação.

Gráfico 4 - Curva de C_p por λ 

Fonte: Lopes (2011).

Carneiro (2015), apresentou uma produção de pás através do uso de moldes construídos em fresadora CNC. No entanto, este processo de confecção para pás de maiores dimensões não se torna adequado. Essas pás não são ocas por dentro, o que traria maior peso e maior necessidade estrutural. O fato de não haver uma longarina passando por dentro da pá poderia aumentar o risco de fratura, principalmente, na raiz. Na figura 24 é apresentado as pás do referido autor.

Figura 24 - pá impressa e pá moldada



Fonte: Carneiro (2015).

Durante a construção, a maior dificuldade encontrada foi em relação aos ângulos de cada perfil. No o trabalho de Carneiro (2015) em que os moldes já estão todos com os ângulos corretos alinhados na própria fresadora, portanto com uma maior precisão.

6. CONCLUSÃO

Foram projetados em madeira balsa os perfis das pás através de um *software* de CAD com todos os parâmetros necessários para uma pá de velocidade específica de projeto 7. Todos os perfis foram fixados em uma longarina e cobertos com madeira balsa de menor espessura que o dos perfis para, após os acabamentos, ser finalizado com vinil. É visivelmente observado algumas imperfeições após a fabricação devido ao processo ser manual. Então, através dos materiais sugeridos, construiu-se o conjunto de pás especificado. Esses referidos materiais são de fácil obtenção e de baixo custo, facilitando o processo de fabricação.

Pelos dados de potência obtidos, foram observadas características semelhantes entre o sistema testado neste trabalho e o apresentado para comparação. Conforme a velocidade do vento foi aumentada, o valor da velocidade e torque também cresceu, causando variação na potência de saída. No entanto, os dados de λ e C_p ficaram abaixo de esperado, provavelmente devido a problemas relacionados ao vento criado pelo exaustor e problema relacionados aos sensores.

Segundo o Gráfico 5, esperava-se que os valores obtidos de torque e rotação fornecessem pontos de C_p e λ mais próximo à curva. Como a velocidade específica de projeto era 7, esperava-se pelo menos que chegasse próximo a este valor. No entanto, problema relacionados a aquisição de dados não permitiram que fossem colhidos dados mais precisos. Uma forma de reduzir esses problemas seria a utilização de um túnel de vento.

O fato de ser utilizado o exaustor dentro de uma sala levou o sistema a gerar muita turbulência além de alguns pontos em que não havia escoamento do ar. Durante a fixação do anemômetro para os testes, foi observado que muitos pontos o aparelho apresentava uma alteração brusca nos valores com uma simples mudança do local fixado. Foram necessários vários dias de testes para que se encontrasse um ponto ideal que apresentasse uma maior estabilidade nos valores.

O sistema de medição possuía um motor que era inadequado para os testes, pois ele havia sido projetado para funcionamento com pás de dimensões menores. Para isto foi construído um pistão que gerou um torque constante e calculável contrário ao movimento, e isto permitiu que fossem feitas novamente as medições. No entanto, observou-se que presença desta peça, era gerado mais vibração ao sistema, pois ele precisou ser adaptado à bancada já existente.

Portanto não foi possível colher dados de melhor precisão para o projeto. No entanto, os valores estão condizentes quando analisado somente a curva de potência por velocidade do vento, porém dados de C_p e λ estão longe dos valores esperados.

O que pode ser melhorado com relação à construção para próximos trabalhos são a utilização de dupla longarina para que ela se torne ainda mais resistente e corte a laser dos perfis para que o trabalho se torne o mais preciso possível.

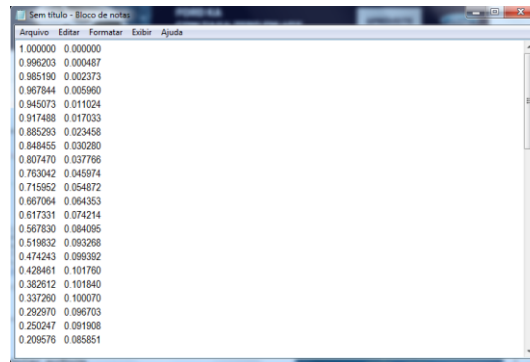
Em relação a bancada de teste, pode haver também futuras melhoras como acoplamento de transdutor de torque e rotação ao medidor de velocidade do vento. Desta forma todos os dados seriam medidos nos mesmos instantes; a utilização de outro motor que tenha capacidade de rotacionar pás com pesos e raios maiores. Desta forma, não seria necessário a utilização de um freio mecânico ao sistema, que reduziria drasticamente a vibração; e construção de túnel de vento com dimensões maiores na qual as condições de controle são mais rígidas.

APÊNDICE - FORMATAÇÃO DOS DADOS PARA EXCEL.

Este anexo tem como finalidade apresentar uma possível forma de construção dos perfis para ser impresso em folha 4, através da utilização dos dois *softwares* Excel e Solidworks

Partindo, então, dos pontos coletados no site da NASA como mostrado em 3.1 Desenho do Protótipo. Esses pontos devem ser copiados e reescritos em um bloco de notas como mostrado na figura 25.

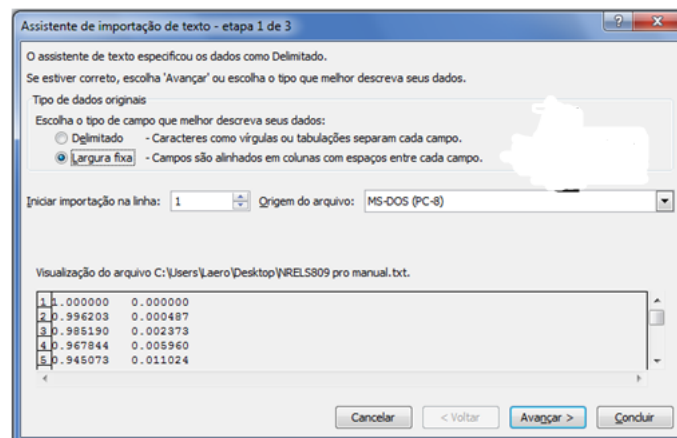
Figura 25 - Bloco de notas



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Devem-se abrir esses pontos em um arquivo do Excel selecionando-se a aba “Arquivo” do programa e clicando-se na opção “Abrir”. Será aberta, então, uma caixa como mostrado na Figura 26 em que se devem selecionar as opções “Largura Fixa”, “Avançar”, “Avançar” e “Concluir”.

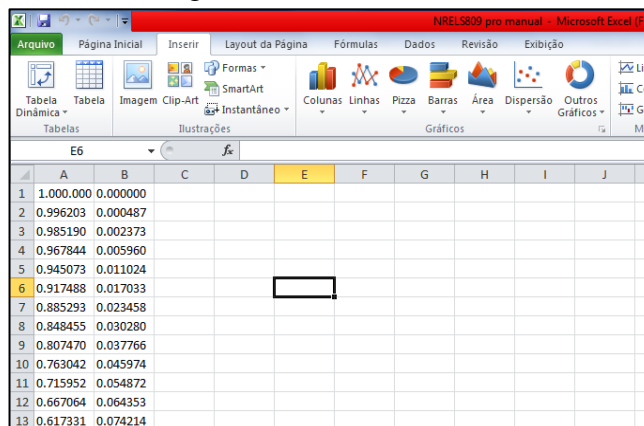
Figura 26 - Opção no excel



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A planilha torna-se como na Figura 27 com cada célula contendo apenas um valor.

Figura 27 - Dados no excel

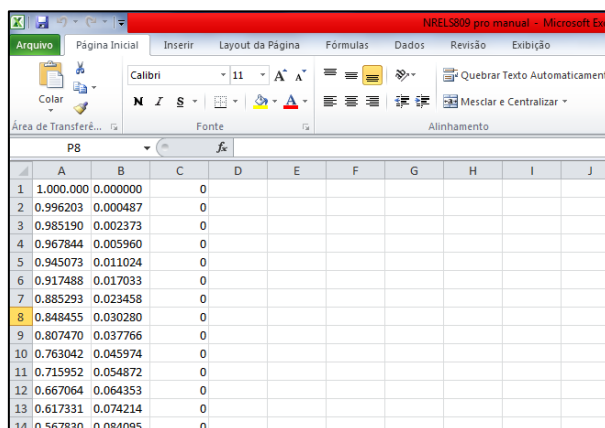


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1.000.000	0.000000								
2	0.996203	0.000487								
3	0.985190	0.002373								
4	0.967844	0.005960								
5	0.945073	0.011024								
6	0.917488	0.017033								
7	0.885293	0.023458								
8	0.848455	0.030280								
9	0.807470	0.037766								
10	0.763042	0.045974								
11	0.715952	0.054872								
12	0.667064	0.064353								
13	0.617331	0.074214								

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Cria-se uma coluna apenas com zero. Após isto, o arquivo deve ser salvo. “As alterações estarão presentes no arquivo em “.txt” como mostrado na figura 28.

Figura 28 - Coluna z no excel

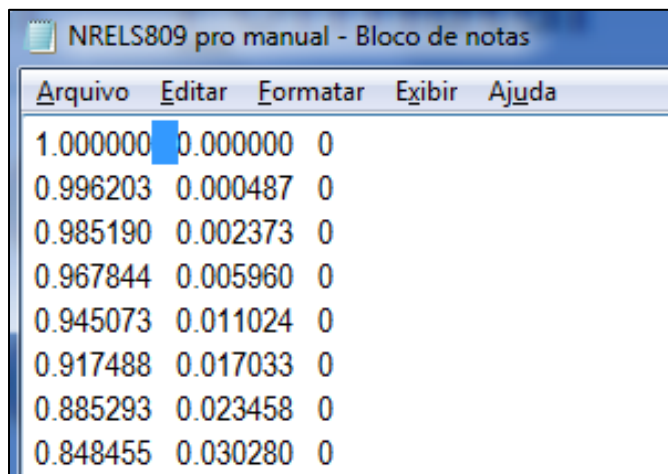


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1.000.000	0.000000	0							
2	0.996203	0.000487	0							
3	0.985190	0.002373	0							
4	0.967844	0.005960	0							
5	0.945073	0.011024	0							
6	0.917488	0.017033	0							
7	0.885293	0.023458	0							
8	0.848455	0.030280	0							
9	0.807470	0.037766	0							
10	0.763042	0.045974	0							
11	0.715952	0.054872	0							
12	0.667064	0.064353	0							
13	0.617331	0.074214	0							
14	0.567830	0.084095	0							

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

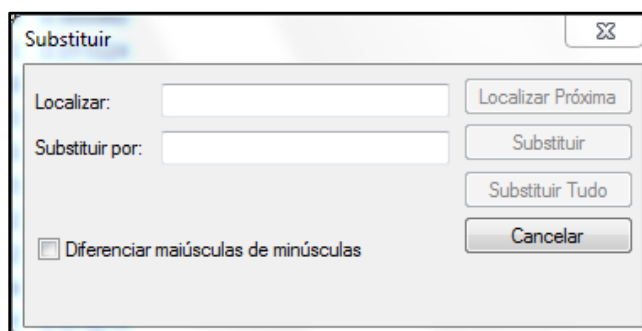
O arquivo será salvo e reaberto no bloco de notas. Automaticamente, o próprio software gerará um ponto no primeiro e no último número. Isso pode causar erros durante o processo, pois o próximo programa a ser utilizado não conseguirá fazer uma leitura correta. Portanto, esses pontos devem ser retirados. Há ainda outro erro a ser trabalhado através da retirada dos espaços entre números: na Figura 29 mostra-se parte do processo em que será selecionado o espaço para posterior substituição por vírgula e, logo após, serão utilizadas as funções “Editar” e “Substituir tudo”, substituindo-se espaços por vírgulas, como mostrado na Figura 30.

Figura 29 - Selecionando-se os espaços no bloco de notas



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 30 - Retirando-se os espaços

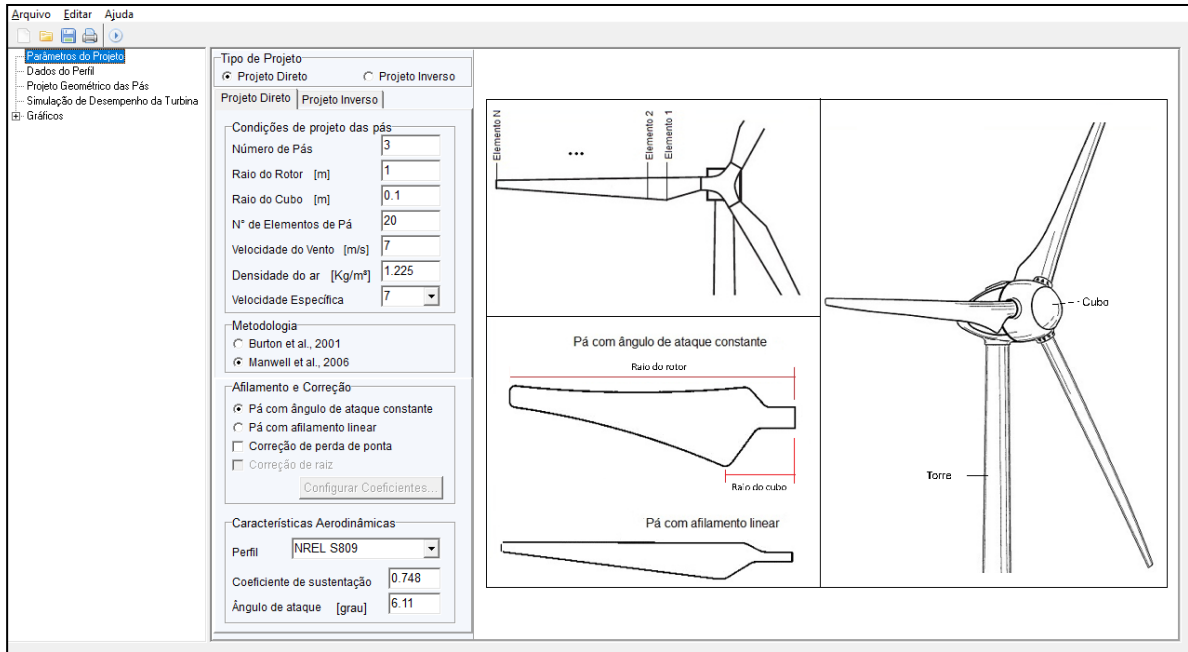


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O SDPA será utilizado para que se possa conhecer as dimensões e quantidades de perfis que serão necessários. Esse software fornece os dados geométricos de construção de pás, como curva de afilamento e torção da pá com base nos dados do aerofólio utilizado, Almeida (2013).

São colocados os dados de número de pás, raio do rotor, raio do cubo, número de elementos da pá, velocidade do vento, densidade do ar, velocidade específica ou lambda de projeto (λ_p) como mostrado na figura 31.

Figura 31 - Software SDPA



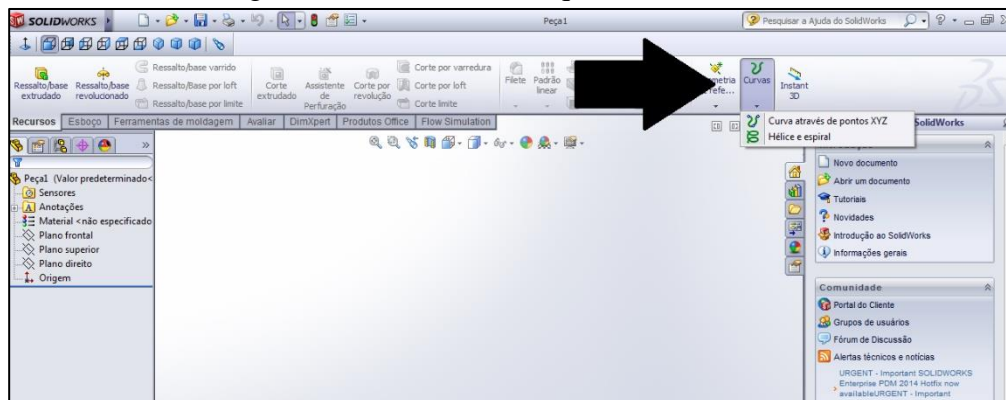
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Formatação dos desenhos no Solidworks

É necessária construção do perfil em um programa de desenho assistido por computador CAD (*computer-aided desing*). O utilizado foi o Solidworks.

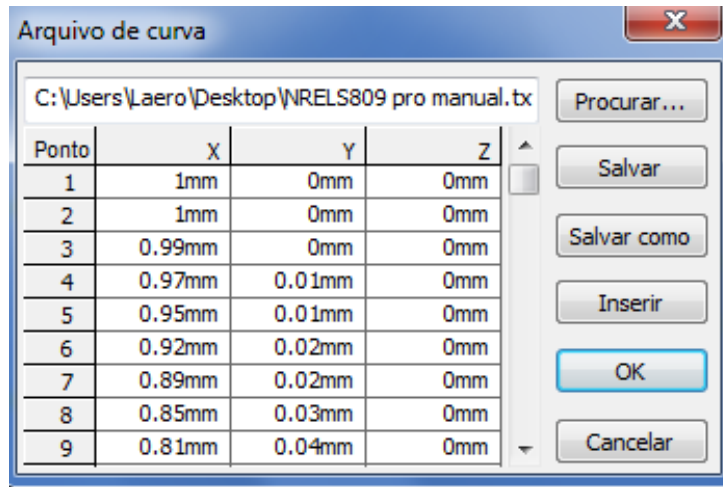
Para o início da construção, foi aberto um projeto 2D novo no SolidWorks. Então, foram selecionadas a opção “Curvas” e a a opção “Curvas através de pontos XYZ”, como mostrado na Figura 32. Em seguida, abre-se o arquivo .txt salvo anteriormente como mostrado na Figura 33.

Figura 32 – Abrindo-se arquivo no solidworks



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

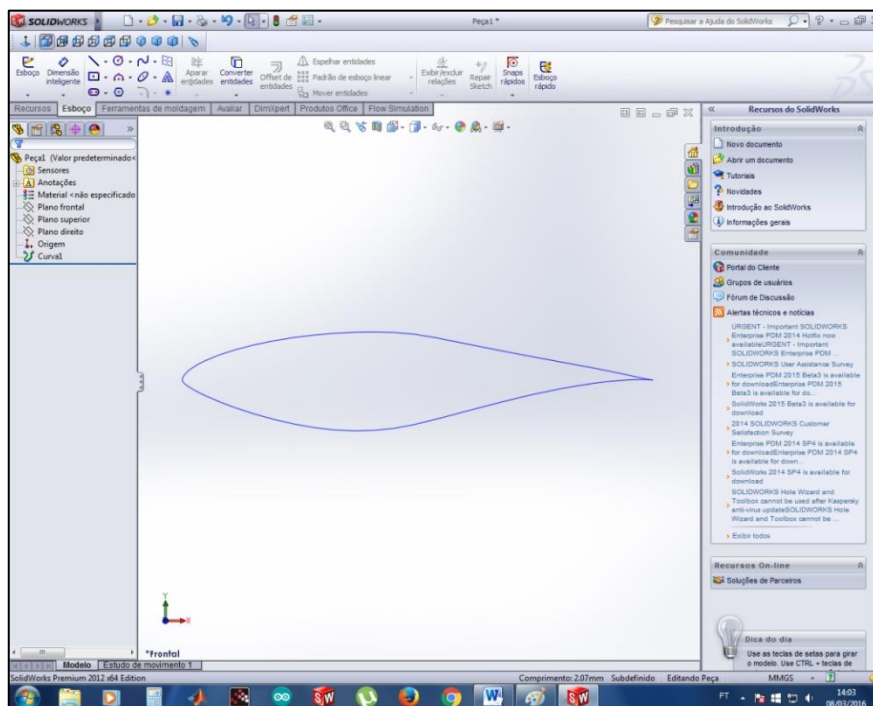
Figura 33 - Abrindo-se arquivo .txt



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

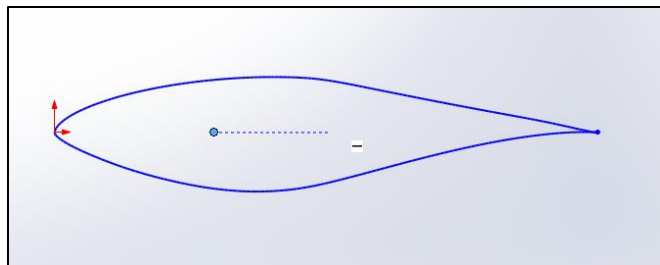
O perfil formado através dos pontos é demonstrado na Figura 34. Para sua edição, deve-se clicar em “Plano Frontal”, “Esboço” e “Converter Unidades”. É criado, então, um segundo arquivo para posterior cópia do desenho construído. Logo após, deve-se criar um arquivo novo para que o desenho seja copiado e colado. Em seguida, desenha-se um ponto na linha central onde se localiza a corda do perfil, como demonstrado na Figura 35.

Figura 34 – Pontos abertos no solidworks



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 35 – Desenho do ponto e da linha central



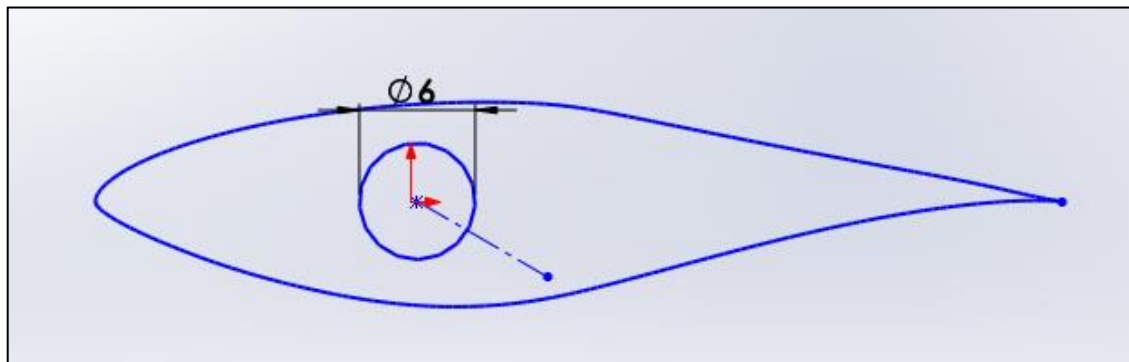
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Um ajuste de escala deverá ser aplicado para que cada perfil tenha sua dimensão específica. Isso é feito através do ajuste de escala do tamanho da corda do perfil. Deve-se utilizar a opção “Mover entidades” e a opção “Dimensionar Entidades”. Então, devem ser aplicadas as escalas corretas utilizando-se a opção “Aplicar escala em”, clicando-se no ponto criado dentro do perfil e inserindo-se o valor da escala.

Para continuação da construção, deve-se criar um círculo no ponto central do perfil para posterior dimensionamento deste círculo com valor do diâmetro da longarina.

Através de dados do SDPA, em “Projeto Geométrico das Pás”, na coluna de “Âng. Torção”, serão criados os ângulos de torção específicos para cada um dos perfis. Utilizando-se esses dados, cada perfil terá um determinado ângulo, partindo-se do maior perfil até o perfil da ponta. A Figura 36 demonstra como fica esse ângulo em um dos perfis.

Figura 36 - Criando-se linha de torção



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, M. **Implementação computacional para desenvolvimento de pás de Turbinas eólicas de eixo horizontal**. Brasil: Universidade Federal do Ceará, 2013.

ANDERSON, J. **Fundamentals of Aerodynamics**. 3. Ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2001.

ANEEL

<[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf)> Acesso em 03 de abril de 2017.

ATLAS D ENERGIA EÓLICA DO BRASIL

<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf> Acesso em 05 de abril de 2017

BEN

<<https://ben.epe.gov.br/default.aspx?anoColeta=2015>> Acesso em 03 de abril de 2017

BURTON, T.; SHAPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E., **Wind Energy Handbook**. 2. ed. Inglaterra: Wiley, 2011.

GOVERNO FEDERAL 2017

<<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/brasil-e-o-maior-gerador-de-energia-eolica-da-america-latina>> Acesso em 5 de dez. 2017.

GWEC – Global Wind Statistics 2015

Disponível em:

<https://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR.pdf> Acesso em: 15 nov. 2017.

CARNEIRO, S. M. **Construção de pás com perfil nrel s809 utilizando moldagem em borracha de silicone.** Brasil: Universidade Federal do Ceará, 2015. 47p

CTB -

Disponível em:

https://ctborracha.com/?page_id=1467 cesso em 19 jun. 2018.

INSTRUTERM

Disponível em:

<<https://www.instrutherm.net.br/seguranca-e-medicina-do-trabalho/vazao/anemometros/termo-anemometro-mod-tar-176-digital-escala-0-4-a-12-0-m-s-e-0-a-80-c-c-rs-232.html>> acesso em 5 de novembro de 2017.

LOPES. *Projeto e testes de um aerogerador de pequeno porte e de um Sistema de medição de eficiência mecânica.* Brasil: Universidade Federal Do Ceará, 2011.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.* 1ª ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons Ltd, 2009. 567 p

NASA

Disponível em:

<<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s809-nr>> Acesso em 21 de outubro de 2017.

WENZEL, G. M. *Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal*. Brasil. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.