



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

**CENTRO DE ENGENHARIAS BACHARELADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

PEDRO CELESTINO NETO

**ADEQUAÇÃO NO PERFIL DAS PÁS DE UMA TURBINA PARA A CONDIÇÃO
REGIONAL DOS VENTOS NECESSÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA:
SIMULAÇÃO E TESTE**

MOSSORÓ/RN

2019

PEDRO CELESTINO NETO

**ADEQUAÇÃO NO PERFIL DAS PÁS DE UMA TURBINA PARA A CONDIÇÃO
REGIONAL DOS VENTOS NECESSÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA:
SIMULAÇÃO E TESTE**

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

Orientador: Romulo Batista Pierre dos Reis,
Prof. Dr.

MOSSORÓ/RN

2019

© 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 tornar-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.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

C392a Celestino, Pedro.
ADEQUAÇÃO NO PERFIL DAS PÁS DE UMA
TURBINA PARA A CONDIÇÃO REGIONAL DOS VENTOS
NECESSÁRIOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA:
SIMULAÇÃO E TESTE / Pedro Celestino. - 2019. 36 f. : il.
Orientador: Rômulo Pierre Batista dos Reis
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Mecânica,
2019.
1. Aerogerador. 2. Pás. 3. Perfil Aerodinâmico.
4. Energia eólica. I. Batista,
Romulo, 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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA
CENTRO DE ENGENHARIAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Às 17:00 horas do dia 13 de agosto do ano de dois mil e dezenove, (na sala 17) do Bloco de Professores do Centro de Engenharia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, sob a presidência do Prof. Dr. Rômulo Pierre Batista dos Reis, reuniu-se a banca examinadora de defesa de monografia de autoria do aluno **Pedro Celestino Neto**, do curso de Engenharia Mecânica desta Universidade com o título, "**Adequação no perfil das pás de uma turbina eólica para a condição regional dos ventos necessários para a geração de energia: simulação e teste**". A Banca Examinadora ficou assim constituída: Prof. Dr. Rômulo Pierre Batista dos Reis, presidente da banca; Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante e o Prof. Filipe Lima dos Santos, como membros. Foram registradas as seguintes ocorrências: após a apresentação do aluno pelo Presidente da banca, ocorreu a apresentação da monografia, seguido de questionamentos pelos membros da banca; finalizando, foram sugeridas algumas modificações e correções. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada, tendo o aluno obtido as seguintes notas: 30; 90 e 90. Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi aprovado com média geral 90, fazendo jus, portanto, ao título de Engenheiro Mecânico. E para constar, eu, **Prof. Dr. Rômulo Pierre Batista dos Reis**, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos. Mossoró, 13 de agosto de 2019.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. Rômulo Pierre Batista dos Reis
Presidente

Prof. Dr. Fabrício J. Nóbrega Cavalcante
Membro

Prof. Filipe Lima dos Santos
Membro

*Agradeço a toda a minha família e a todos
aqueles que estiveram ao meu lado durante
a minha caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Elizabeth Souza Morais e minha tia Maria do Socorro por estarem estado ao meu lado durante toda a minha vida e me criado e ao meu pai Francisco Celestino Cavalcante por ter me dado apoio e me ajudado durante minha vida acadêmica.

Agradeço a minha tia Maria do Carmo, seu marido Eduardo Filgueira e ao meu primo Jose Eduardo que me acolheram em sua casa durante todo o início do curso.

Agradeço a minha madrinha Ana Karina, por ter dado tantos conselhos e ter sido paciente em me ensinar e me guiar.

Agradeço a minha noiva Stefany Kariny, por ter me dado tanto suporte, apoio e não ter me deixado desistir diante de tanto momentos que passei durante todo o curso.

Agradeço ao meu orientador Romulo Batista dos Reis, orientador de pesquisa Idalmir de Souza Queiroz Junior, professor Alex Sandro de Araújo e o professor Isac Barbosa do IFRN – campus Mossoró, por tudo que me ajudaram a alcançar, desenvolver e me ensinaram durante as etapas do projeto em que cada um me ajudou.

“Nossos caminhos são pacíficos, nossos métodos democráticos, mas se nos tentam impedir só Deus sabe nossa obstinação.”

Leonel Brizola

RESUMO

Este trabalho consistiu inicialmente na pesquisa e levantamento de dados sobre turbinas eólicas CC de baixa potência. Posteriormente, foi vista a necessidade da aplicação dos conceitos estudados em um aerogerador que a UFERSA – campus Mossoró dispõe, este é o BERGEY XL 1.0. Neste caso, foi buscada a possibilidade de um acréscimo em sua eficiência através da mudança no perfil da pá. Para isso, foram buscados perfis aerodinâmicos que permitam implementar a eficiência de equipamentos de pequeno porte. Como metodologia, foi selecionado entre 21 perfis o que obteve menor velocidade de vento necessária para a geração de energia, em um software chamado Qbalde, específico para simulação das mesmas. Esta também foi comparada com o perfil da pá original. Em seguida, foram fabricadas um conjunto de pás com o perfil selecionado, utilizando o método de fabricação Resin Moulding Transfer (RTM). Apesar de não ter sido possível realizar os ensaios quantitativos por limitações de tempo, ainda foi possível a verificação qualitativa da eficiência do aerogerador com as pás fabricadas em relação as pás originais para as mesmas condições de vento no teste experimental, que foi o objetivo geral do trabalho.

Palavras-chave: Aerogerador. Pás. Perfil Aerodinâmico. Energia Eólica.

ABSTRACT

This work consists of a research and data collection on low power DC wind turbines. The application of the aerogener of the UFERSA - campus Mossoró features, this is the BERGEY XL 1.0. In this case, it was sought a possibility of an increase in its capacity without profile. For this, aerodynamic profiles that implement the efficiency of small equipment were sought. As a methodology, it was selected from 21 profiles that require lower wind speed for power generation, in a software called Qbalde, specific for their simulation. This was also compared to the original blade profile. Then a set of parts with the selected profile was fabricated using the resin molding transfer method (RTM). Although it was not possible to carry out the quantitative tests per test time, it was still possible to qualitatively verify the efficiency of the wind turbine with the blades manufactured in relation to the original wind conditions, work.

Keywords: Wind turbine. Shovels. Profile Aerodynamic. Wind Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	a) altura do perfil; b) largura do perfil; c) pá dimensionada com o perfil.	23
Figura 2	Modelo de madeira.....	23
Figura 3	Pá após fabricação.....	23
Figura 4	a) resina poliéster; b) fibra de vidro sem direcionamento nas fibras; c) fibra de vidro com direcionamento nas fibras; d) massa de poliéster.....	24
Figura 5	cantoneiras e sucata.....	24
Figura 6	Partes do molde.....	26
Figura 7	Pás não acopladas.....	26
Figura 8	Pá finalizada.....	27
Figura 9	Tubo utilizado como torre.....	27
Figura 10	Esqueleto da base.....	28
Figura 11	Base para a torre do aerogerador.....	28
Figura 12	Relação entre coeficiente de sustentação e arrasto com o ângulo de ataque extrapolado em 360° para o perfil SH4038.....	29
Figura 13	Relação entre coeficiente de sustentação e arrasto com o ângulo de ataque extrapolado em 360° para o perfil NACA 63(2)-615.....	29
Figura 14	Potência x velocidade do vento na pá com perfil SH4038.....	30
Figura 15	Potência x velocidade do vento na pá com perfil NACA 63(2)-615.....	30
Figura 16	Turbina eólica acoplada a base amortecedora.....	31
Figura 17	Pá acoplada à turbina sem nenhuma angulação.....	32
Figura 18	Pá acoplada à turbina com modificação na angulação.....	32
Figura 19	Perfil SH4038 utilizado na pá do fabricante.....	33
Figura 20	Dimensões perfil NACA 63(2)-615, a) altura; b) largura;	33
Figura 21	Pá fabricada utilizando uma angulação maior do que a disponibilizada no equipamento	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela 1. Perfis simulados no software.....	25
----------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

J	Joule
K	Kelvin
Re	Número de reynolds
μ	Viscosidade dinâmica
c	Corda média
v	Velocidade linear
v^*	velocidade do escoamento
c	Velocidade do som
PNE	Plano nacional de energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivos Gerais.....	16
2.2	Objetivos Específicos.....	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1	Uso da Energia Eólica	17
3.2	Princípios da Aerodinâmica	17
3.3	Variáveis Analisadas na Fabricação da Pá.....	18
3.3.1	Número de Reynolds	18
3.3.2	Número de Mach.....	19
3.4	Materiais utilizados para fabricação de pás de aero geradores de pequeno porte.....	20
3.4.1	Compósitos.....	20
3.4.2	Madeira.....	20
3.4.3	Metais.....	20
3.5	Métodos Para Fabricação das Pás.....	21
3.6	Utilização de Software para Modelagem e Simulação das Pás....	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Materiais.....	22
4.1.1	Seleção do Modelo....	23
4.1.2	Modelo.....	23
4.1.3	Modelo Laminado.....	23
4.1.4	Cantoneiras e sucata.....	24
4.2	Métodos.....	25
4.2.1	Simulação dos perfis.....	25
4.2.2	Fabricação das pás.....	25
4.2.3	Testes das pás.....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
5.1	Seleção do perfil.....	29
5.2	Montagem da turbina na base.....	30
5.3	Ensaio das pás.....	31

6	CONCLUSÕES.....	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica, vem agindo no Brasil como um sistema de geração de energia elétrica complementar para as ocasiões do ano de baixa intensidade pluviométrica, fazendo com que em todos os períodos do ano a energia elétrica se mantenha constante em todo o país. Segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil publicado pela ANEEL e o Plano Nacional de Energia (PNE), o Sistema Elétrico Nacional, na geração da energia elétrica, o potencial de geração de energia eólica no país varia de 20 a 145GW, sendo que o Brasil tem uma necessidade de complementação de energia elétrica de cerca de 143GW.

É estimado que cerca de 20% do custo de uma turbina eólica são investidos nas pás. Dessa forma, é necessário cada vez um progresso na eficiência na captação de vento pelas pás, como também otimização de custos na sua fabricação. E o Brasil ainda não domina de forma adequada a tecnologia de produção de pás. Os locais onde mais se concentram as maiores velocidades de ventos do país são no litoral brasileiro.

Sendo assim, é proposto o estudo em pás de aerogeradores CC de baixa potência, a utilização deste para a fabricação de pás mais eficientes para a turbina Bergey XL 1.0, encontrada na UFERSA, como também a adequação destas para os ventos encontrados na região. Pois, equipamentos deste porte, são prioritariamente utilizados em zonas urbanas para residências, reduzindo assim a necessidade do uso de energia elétrica vindas de hidrelétricas. Além disso, existem sistemas mundiais, utilizados também no Brasil, de redução na conta de energia, através da quantidade de energia absorvida pelas turbinas, que permitem a esse excesso ser distribuído na rede.

OBJETIVOS GERAIS

- Realizar um estudo acerca da aerodinâmica das pás de aerogeradores cc de baixa potência;
- Selecionar um perfil, definir as dimensões e fabricar o perfil para o aerogerador Bergey XL 1.0.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar um aerogerador cc de baixa potência;
- Compreender o funcionamento do aerogerador;
- Estudar o comportamento dos ventos da região;
- Determinar o diâmetro teórico da hélice do aerogerador e definir o perfil aerodinâmico das pás através do software Qblade;
- Definir as dimensões das pás e sua modelagem para simulação;
- Definir o material das pás;
- Selecionar o método de fabricação.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Uso da energia eólica

Com o crescimento populacional e avanço tecnológico da humanidade, cada vez mais se tem buscado novas fontes de energias que possam suprir a necessidade energética de forma cada vez mais ecologicamente limpa. Segundo Pires e Oliveira (2010), somente por volta do século XX que se iniciou a produção de energia elétrica através de fontes eólicas.

Para que a energia do vento ou energia eólica seja convertida em energia elétrica e distribuída para o consumo é necessário o uso de um aparelho chamado aerogerador. Este aparelho irá transformar a energia do vento em energia mecânica através da rotação das hélices, em seguida irá transferir esta energia para um gerador elétrico e irá enviá-la para uma central de comando onde a energia será “limpa” para ser inserida na rede.

De acordo com Song (2012), os aerogeradores de eixo horizontal são os mais comumente utilizados na produção de energia eólica. Estes aerogeradores são compostos principalmente por um conjunto de rotor, pás e o cubo. Quando maior for a quantidade de vento (seguindo os limites do aerogerador) e com maior eficiência for convertida o vento em energia mecânica, mais será possível adquirir energia elétrica, ou seja, a fabricação de energia elétrica a partir do vento dependerá principalmente das pás. Desta forma, cada vez mais se busca a eficiência e eficácia das pás fabricadas para os aerogeradores quanto a energia convertida e menor gasto na fabricação.

3.2 Princípios da aerodinâmica

Dentro da engenharia mecânica a área que se dedica a estudar o comportamento dos fluídos é a aerodinâmica, desta forma estudando também o comportamento dos ventos. Para a fabricação das pás utilizadas em um aerogerador e para o seu melhoramento é necessário possuir alguns conhecimentos desta área, alguns conceitos importantes, São esses: pressão, densidade, temperatura e velocidade.

- Velocidade – é a variação que terá corpo em um espaço para um dado intervalo de tempo. Esta é uma grandeza vetorial. Por existir muita variação em sua

análise, a velocidade é analisada de forma pontual, analisando assim o movimento de uma partícula através de análises laboratorial ou analítica.

- Temperatura – A energia cinética gerada a partir do movimento das partículas é o que explica a constante de Boltzmann, $1,30 \times 10^{23} \text{J/K}$, a qual é diretamente proporcional ao quociente. Desta forma, é possível explicar o movimento do vento após submetido a altas e baixas temperaturas, as quais poderão aumentar ou diminuir a velocidade do vento, respectivamente.
- Densidade – É dada basicamente pela razão entre a massa e o volume de um corpo. Esta também pode ser definida de forma pontual, neste haverá a necessidade de cálculos diferenciais.
- Pressão - É a força normal exercida em uma dada superfície durante um intervalo de tempo. Sendo está uma das variáveis mais importantes a ser analisada na aerodinâmica.

3.3 Variáveis analisadas para fabricação da pá

3.3.1 Número de Reynolds

Para a análise de um regime de escoamento é necessário ter um conhecimento sobre algumas variáveis, principalmente em um perfil de pá de aero gerador, dentre elas está o número de Reynolds. Este é capaz de definir se o escoamento é laminar, no qual as partículas se movem de forma linear, regime transitório, que seria o intermediário onde parte do escoamento é linear e a outra turbulenta e o regime turbulento, que é geralmente onde está localizada a maior parte do escoamento analisado.

Para que seja feita a classificação do tipo de escoamento o número de Reynolds possui uma variação, na qual se este foi maior que 500 o escoamento é classificado como turbulento, entre 250 e 500 é chamado transitório e menor que 250 é escoamento laminar. De acordo com Anderson Jr. (1991, apud. NASCIMENTO, 2015), a equação 1 a seguir demonstra como calcular o número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho v \bar{c}}{\mu} \quad [1]$$

$\bar{c}$ = comprimento médio da corda;

v = velocidade do escoamento;

ρ = massa específica;

μ = viscosidade do fluido.

3.3.2 Número de Mach

O número de mach é utilizado para descrever a velocidade de um corpo em relação a velocidade do som, de modo que este é dado pela razão entre os dois, como mostra a equação a seguir,

$$M \equiv \frac{v^*}{c} [2]$$

Neste o v^* representa a velocidade do escoamento e c representa a velocidade do som, ambos em m/s. Segundo Fox, Pritchard e McDonald (2011, apud. NASCIMENTO, 2015), para valores de Mach menores que 0,3 a variação de massa específica muito pequena, podendo-se considerar o escoamento incompressível; no entanto para valores de Mach iguais a 0,3, o ar estando em condições padrões, é possível obter uma velocidade de até 100 m/s.

A análise do número de Mach é necessário para analisar o quanto a velocidade está influenciando na variação das propriedades do escoamento. Dessa forma, tem-se escoamento subsônico (Mach de 0,8), em que as propriedades não são tão afetadas, transitório (0,8 a 1,2) no qual o escoamento apresenta características de um subsônico e supersônico, supersônico no qual o escoamento apresentará algumas mudanças descontínuas e por último o hipersônico, que torna o escoamento muito complexo de ser analisado.

Com a variação das propriedades do escoamento, haverá mudanças no coeficiente de arrasto do perfil, dificultando a análise devido a sua complexidade e podendo causar danos ao aerofólio. (ANDERSON JR, 1991, apud NASCIMENTO, 2015)

3.4 Materiais utilizados para fabricação de pás de aero geradores de pequeno porte

3.4.1 Compósitos

As pás de aero geradores são submetidas principalmente a esforços de cargas cíclicas. Desta forma, os compósitos de fibra de carbono e fibra de vidro são os mais comumente indicados, tanto para aerogeradores de pequeno quanto de grande porte. Segundo Veers et. al. (2003, apud SONG, 2012), fibra de vidro é predominantemente aplicada na fabricação de pás. Isto devido a combinação de baixo custo e altos índices em suas propriedades mecânicas quando comparada a outros materiais.

Apesar da fibra de vidro ser mais usada, a fibra de carbono se destaca em relação a ela por possuir melhor relação entre seus índices de propriedades mecânicas, no entanto é mais complexo e também mais caro trabalhar com esta.

Nos últimos anos tem-se buscado combinações híbridas nas pás de fibra de carbono e fibra de vidro, para reduzir os custos e buscando relações entre as propriedades mecânicas melhores (BRØNDSTED et al., 2005, apud SONG, 2012).

3.4.2 Madeira

A madeira é possuí boas propriedades mecânicas para fabricação de pás de aero geradores de pequeno porte, no entanto é difícil encontrar madeira com propriedade homogênea e sem nós. (PETERSON AND CLAUSEN, 2004, apud SONG, 2012)

O bambu além de também possuir índices adequados de propriedades mecânicas, por possuir maior tenacidade a fratura, maiores índices de resistência mecânica e também ser mais rígido do que as madeiras em geral (Holmes *et al.*, 2009, apud SONG, 2012). Apesar destas qualidades, há problemas quanto ao tamanho para aplicação na fabricação das laminas, tornando necessário o uso de compósitos, sendo assim está uma área ainda a ser estudada.

3.4.3 Metais

O aço já foi um metal comumente utilizado na fabricação de pás nos anos 50, no entanto por possuir baixa resistência a fadiga e de difícil manufatura quando

comparado a fibra de vidro, este veio a ser substituído. (Manwell et al., 2002, apud SONG, 2012)

O alumínio também tem sido considerado como metal a ser utilizado na fabricação de pás, no entanto este precisa ser soldado. Segundo Burton et al.(2001 apud SONG, 2012), este possui um baixo índice de resistência a fadiga quando comparado a fibra de vidro e fibra de carbono. Por estas condições, o alumínio é empregado ainda em baixa escala na fabricação de pás.

3.5 Métodos para fabricação de pás

Resin transfer moulding (RTM), este é um processo de fabricação no qual um molde já feito da pá terá dentro dele colocado a fibra (carbono, vidro ou aramida) com a resina (poliéster ou epoxy) e o catalisador e estes serão colocados a vácuo para a cura da resina. De acordo com Tangler (2000, apud. SONG, 2012), este método começou a ser mais utilizado para fabricação de pás de aerogeradores de pequeno porte nos últimos 20 anos. No entanto, tem se adequado bem a esta aplicação, pois de acordo com Song (2012) e Almeida e Silva (2011), estes utilizaram o RTM e os dois protótipos de pás conseguiram atender aos requisitos na aplicação da pá de um aero gerador fabricada de fibras.

Wet hand-lay-up é um processo de fabricação que exige mais habilidade na hora de ser aplicado e depende mais das habilidades do operador. De acordo com Brøndsted, Lilholt e Lystrup (2005), vinha sendo muito utilizado na fabricação de pás de aerogeradores de pequeno e grande porte nos anos 50 e 70. No entanto, com a evolução e desenvolvimento de métodos mais automatizados veio sendo substituído.

Filamento contínuo, é uma técnica utilizada para pás de grande porte. Está técnica é usada em grandes pás, o enrolamento da pá é feito em grandes tornos e esta técnica pode até ser aplicada na fabricação de pás no setor aeroespacial (BRØNDSTED, LILHOLT E LYSTRUP, 2005). Esta não é comumente utilizada na fabricação de pás para aerogeradores de pequeno porte.

Pultrusão, é um processo utilizado em nível industrial para fabricação de pás de aerogeradores. De acordo com Bergey (2011, apud SONG, 2012), especificamente pelos fabricantes do Bergley XL 1.0. Desta forma, este evita o custo com mão de obra, permite uma grande variedade de perfis, como também as propriedades mecânicas

dos mesmos (LIMA, 2013). Portanto, para aplicações laboratoriais em fabricação de pequenas quantidades, torna-se inviável.

3.6 Utilização de software para modelagem e simulação das pás

Nas aplicações para modelagem e simulação diversos softwares podem ser utilizados. Dentre eles o *solidworks*®, *NX*®, *ANSYS*®, *Qblade*®, *XFLR 5*®, dentre outros, no entanto a maioria deles é voltada para a modelagem e simulação de projetos em geral. De modo que torna-se mais complexa a sua utilização tanto para o desenho do perfil quanto para a simulação.

O *Qblade*® é um software criado especificamente para o design e simulação de perfis aerodinâmicos para pás de aerogeradores. Desta forma suas ferramentas já são direcionadas para facilitar a modelagem e a simulação. Através do BEM (blade element momentum theory), o programa consegue fazer a simulação das pás. Este método utiliza o fator de indução axial, que de acordo com Mendes (2015) é dada pela relação entre a velocidade induzida e a velocidade não perturbada é de suma importância para o desempenho da turbina e o ângulo de ataque, que é obtido após a determinação dos coeficientes de sustentação e arrasto. Após isto utiliza-se o fator de correção de Prandtl's, este mostra que para fatores de indução axial acima de 0,4, a teoria do BEM não é aplicável. Segundo Hansen (2008, apud NASCIMENTO, 2015), este determina algumas considerações para formular novas equações para um fator de indução axial adequado.

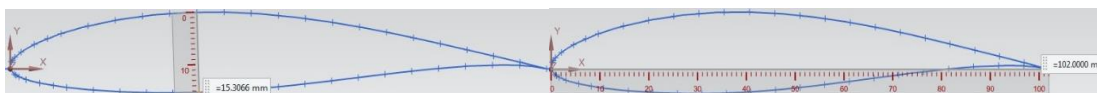
4 Materiais e Métodos

4.1 Materiais

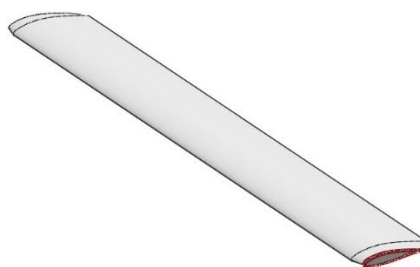
Neste trabalho, foi utilizado um software para dimensionamento e análise dos parâmetros das pás, para seleção do perfil. Posteriormente, foi utilizado madeira para a fabricação do modelo, fibra de vidro e resina poliéster para fabricação das pás a partir do modelo. Posteriormente, foram utilizadas cantoneiras, alguns vergalhões para amarração e concreto para fabricação da base onde foi fixada a torre para os testes das pás. Foram utilizados também alguns componentes eletrônicos e circuitos para a análise dos resultados obtidos através dos ensaios.

4.1.1 Seleção do perfil

Foram analisados alguns perfis, através dos parâmetros de sustentação, arrasto, velocidade de vento absorvida e potência gerada. A asa gerada com o perfil selecionado é mostrada na figura 1.



1. a) altura do perfil; b) largura do perfil;



c) pá dimensionada com o perfil

4.1.2 Modelo

O modelo fabricado em madeira é apresentado na figura 2.



Figura 2. Modelo de madeira

4.1.3 Modelo Laminado

Este foi fabricado em madeira, para que fosse possível a laminação. A figura 3 mostra o modelo após fabricação.



Figura 3. Pá após fabricação

Na fabricação deste, foram utilizados resina poliéster, fibra de vidro e uma massa para dar uma aparência melhor a superfície da pá. Seguem os componentes utilizados na figura 4.



Figura 4. a) resina poliéster; b) fibra de vidro sem direcionamento nas fibras;
c) fibra de vidro com direcionamento nas fibras; d) massa de poliéster

4.1.3 Cantoneiras e sucata

As cantoneiras foram utilizadas para construir a armação da base e amarradas com as sucatas obtidas na oficina de solda da UFERSA, campus Mossoró. Estes componentes são mostrados na figura 5.



Figura 5. Cantoneiras e sucata

4.2 Métodos

Os procedimentos executados para este projeto resumem-se à simulação de perfis, afim de selecionar o mais adequado para a situação, escolha de procedimento para fabricação da pá, construção da pá e por fim estudo de método para ensaios e testes para corroboração dos parâmetros encontrados no software. Estes testes foram realizados, para além de comparação de parâmetros, comprovar que o perfil aerodinâmico escolhido é mais eficiente do que o originalmente utilizado no aerogerador.

4.2.1 Simulação dos perfis

Na simulação foram confrontados diversos perfis retirados do site *airfoil data base* e *airfoiltools*, estes são exibidos na tabela 1.

Perfis aerodinâmicos			
E 387	NACA 63-418	NACA 2410	S 834
FX 63-137	NACA 63-615	NACA 2412	SD 2030
NACA 1412	NACA 65-415	NACA 4415	SD 7037
NACA 23012	NACA 66-418	NACA 4418	SD 7062
NACA 2408	NACA 4412	NACA 63-209	SG 6043

Tabela 1. Perfis simulados no software

O software utilizado para a comparações de parâmetros entre estes perfis foi o Qblade. Após as simulações, foi possível perceber que o perfil que melhor se destacou dentro das propriedades aerodinâmicas foi o NACA 63-615, que no site foi possível encontrar como 63(2)-615.

4.2.2 Fabricação das pás

O método escolhido para a fabricação das pás foi o RTM (*Resin Transfer Moulding*). Primeiramente foi passado sobre o modelo de madeira um Gel para que este adquirisse uma consistência pastosa e tomasse forma. Após cerca de 15 minutos, foi laminado sobre o gel (este já com uma certa consistência), 4 camadas de fibra de vidro (utilizadas na fabricação de piscinas) com a resina misturada com o catalisador. Após algumas horas de cura um lado do molde estava pronto e este foi retirado do contato direto com o modelo. Foi feito o mesmo processo no outro lado do modelo e com este processo de laminação sobre o gel o molde pôde adquirir a resistência necessária para que as peças fossem laminadas nele. Após isto, foi dado um

acabamento com uma retifica no molde, para que este adquirisse uma melhor forma e aparência. Segue a figura 6 com as duas partes do molde.



Figura 6. Partes do molde

Após a fabricação dos dois lados do molde, iniciou-se o processo de fabricação das pás propriamente ditas. Sobre cada lado do molde seguiu-se o mesmo processo que foi fabricado o molde, foram laminadas as camadas de fibra de vidro junto com a resina misturada com o catalisador. Foi esperado algumas horas para o processo de cura das partes de cada pá e após a cura foi passada sobre cada pá uma lixa d'água para que fosse melhorada a superfície de cada uma delas. Depois de todas as partes terem sido laminadas, iniciou-se o processo de junção ou acoplamento das duas partes de cada pá, como também o processo de acabamento final nas pás completas. A figura 7 mostra as partes das pás sem ainda estarem acopladas.



Figura 7. Pás não acopladas

Para a finalização das pás, foi colocado entre as partes de cada pá pedaços de fibra de vidro com tramas bidirecionais, 12k de filamentos e estilo plain weave, junta com a mesma resina, misturada com o mesmo catalisador utilizado anteriormente na fabricação do molde e das pás, para que fosse feita a união de cada duas partes de cada pá. Após as partes serem unidas, foi passada massa dos lados da pá para das

um melhor aspecto das mesmas. Após isto, a pá passou por um processo de retificação nas laterais, para que tivesse um melhor acabamento. As pás prontas são mostradas na figura 8.



Figura 8. Pá finalizada

4.2.3 Testes das pás

Para a corroboração dos dados obtidos através do software, as pás foram acopladas a turbina e ao tubo, estes foram fixados a uma base de concreto. Este procedimento foi realizado para que ao ser submetido a velocidade de vento necessária para dar início a geração de energia, a torre não viesse a tombar.

O tubo utilizado no acoplamento da turbina tinha 113mm de diâmetro e 3mm de espessura, mostrado na figura 9. O esqueleto da base foi feito utilizando cantoneiras de 3/4" por 1/8" e amarração do concreto foi feita com vergalhões de aço, o esqueleto é mostrado na figura 10.



Figura 9. Tubo utilizado como torre



Figura 10. Esqueleto da base

Após o esqueleto estar pronto, foi feita a concretagem da base. Foi colocado também molas acopladas a pequenos cilindros de Nylon 6.6, para que a base tivesse um amortecimento, para neutralizar as vibrações causadas pela turbina durante os testes. Foi deixado também os locais onde seriam colocados os parafusos para que fosse acoplada a torre a base. Esta após finalizada é mostrada na figura 11.



Figura 11. Base para a torre do aerogerador

Por fim, a base foi acoplada ao aerogerador utilizando parafusos de meia polegada e para fixação das molas foram usados parafusos M10 e assim foi finalizada a fixação para os testes. Foram utilizados também ventiladores de 400W para que fosse simulado o vento necessário para iniciar a geração de potência pela turbina.

5 Resultados e Discussões

5.1 Seleção do perfil

Através das análises feitas no software, foi possível detectar que a pá utilizada no aerogerador, sob baixos regimes de ventos, não conseguia atingir uma potência gerada tão satisfatória quanto a encontrada na pesquisa. A seguir são mostrados os dados confrontados para a escolha do perfil. Na figura 12, perfil SH4038 utilizado pelo fabricante, e 13, perfil NACA 63(2)-615 selecionado na pesquisa, são confrontadas as extrapolações em 360 graus no ângulo de ataque para variação do Cl/Cd do perfil do fabricante e o escolhido.

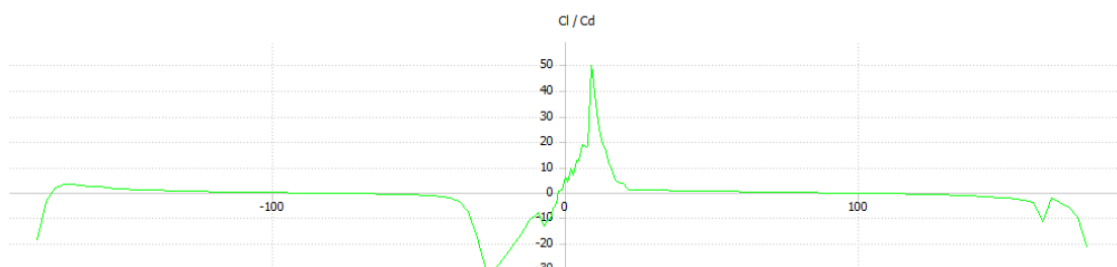


Figura 12. Relação entre coeficiente de sustentação e arrasto com o ângulo de ataque extrapolado em 360° para o perfil SH4038

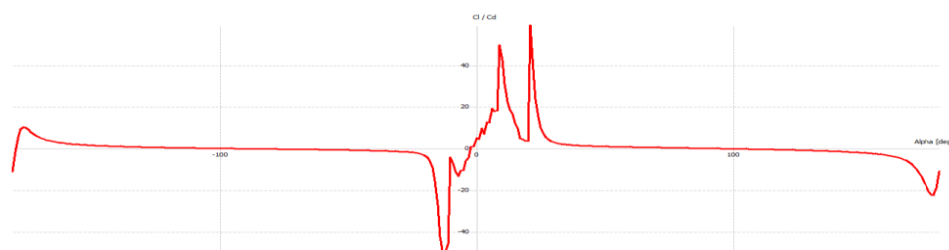


Figura 13. Relação entre coeficiente de sustentação e arrasto com o ângulo de ataque extrapolado em 360° para o perfil NACA 63(2)-615

Nos dois perfis é possível observar que, para pequenos ângulos e pequenas variações no ângulo de ataque é onde se obtém as melhores relações de Cl/Cd , que darão a melhor resistência a pá para os regimes de vento a qual esta será submetida e foram os parâmetros utilizados para as simulações. Variações no ângulo de ataque entre 0 e 20 graus.

Na figura 14 e 15, são confrontadas as potências geradas para diferentes velocidades de vento.

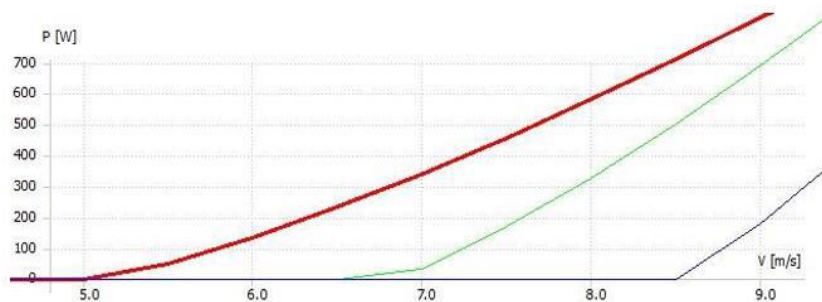


Figura 14. Potência x velocidade do vento na pá com perfil SH4038

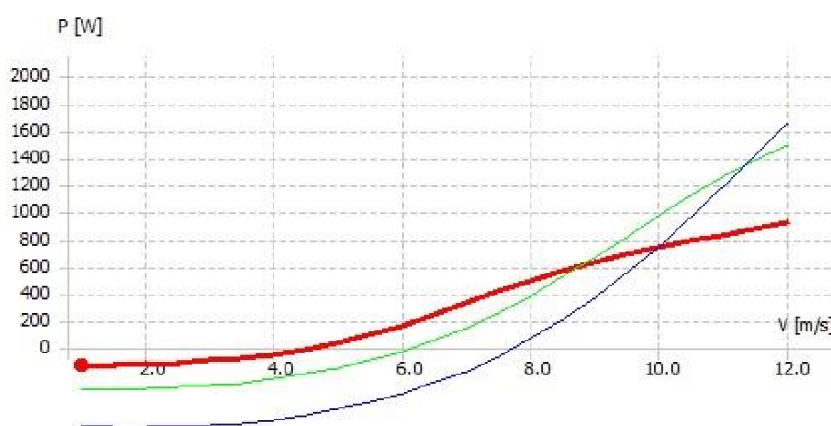


Figura 15. Potência x velocidade do vento na pá com perfil NACA 63(2)-615

Nestas figuras as linhas vermelhas representam o rotor a uma rotação de 300 rpm (linha vermelha), 400 rpm (linha verde) e 500 rpm (linha azul). Sendo que com perfil SH4038 o aerogerador começa a gerar potência em cerca de 5,5 m/s, com 400rpm inicia-se a 7 m/s e com 500rpm começa a gerar a partir de 8,5 m/s. Para estas rotações o aerogerador apresenta uma potência de 400W a 7,2m/s, 8,4m/s e a mais de 10m/s, respectivamente. Já no perfil NACA 63(2)-615 em 300rpm a potência começa a ser gerada a cerca de 4,2 m/s, em 400rpm 8 m/s e 500rpm 9m/s. Fazendo a mesma comparação feita para o outro perfil este consegue gerar 400W a 7m/s, 8m/s e 9m/s, respectivamente.

5.2 Montagem da turbina na base

Para obtenção de resultados mais verídicos em um local mais estável, o aerogerador foi instalado em uma base amortecedora de vibrações, construída na UFRSA. Esta base teve a intenção de inibir as vibrações que poderiam ser causadas

por outros equipamentos na oficina de usinagem. Desta forma, garantindo as medições mais reais e precisas possíveis. A turbina acoplada a base é mostrada na figura 16.



Figura 16. Turbina eólica acoplada a base amortecedora

5.3 Ensaios das pás

Nos experimentos realizados foi percebido que a inclinação fabricada na turbina, que se resume a torção própria do perfil da pá, não atinge o ângulo de ataque simulado no software. Desta forma, mesmo com uma velocidade de vento máxima atingida pelo ventilador de 9m/s o aerogerador não conseguiu atingir uma rotação satisfatória para geração de energia e nem medições de rotação para comparações, isto com as pás do fabricante. Sendo assim, foi feita uma análise de aumento na angulação da pá em relação ao que ali estava, colocando uma arruela e foi percebido o aumento da rotação do rotor com o aumento do ângulo, que já era esperado. Estas modificações são possíveis de serem observadas na figura 17 e 18.



Figura 17. Pá acoplada à turbina sem nenhuma angulação



Figura 18. Pá acoplada à turbina com modificação na angulação

Nas simulações com esta velocidade de vento incidindo sobre o aerogerador, ele deveria atingir pelo menos cerca de $1/3$ de sua capacidade de geração. Entretanto, além do fato da pá do aerogerador precisar de uma velocidade de vento um pouco elevada para atingir uma potência considerável, a própria turbina tem um projeto que não propícia ao equipamento uma boa eficiência. Mostrando assim, que para os ensaios realizados não foi possível corroborar de forma efetiva o que foi feito nas simulações.

Mesmo com esses problemas apresentados pelo projeto, foi possível verificar que o aumento do ângulo de ataque da pá melhorou consideravelmente a eficiência, mostrando assim que as próprias dimensões da pá fabricada propiciam uma maior eficiência ao aerogerador. Estas dimensões são possíveis de serem verificadas nas figuras 19 e 20.

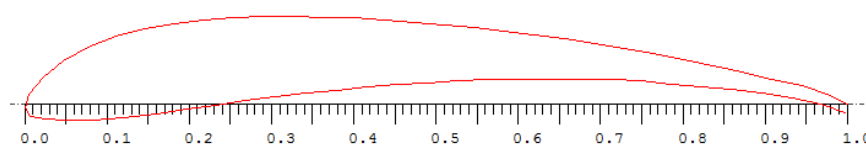
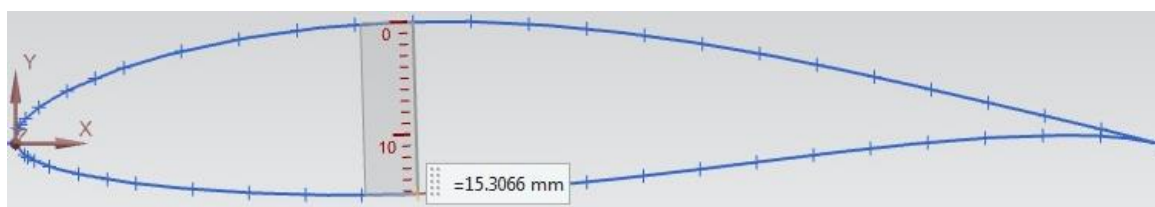
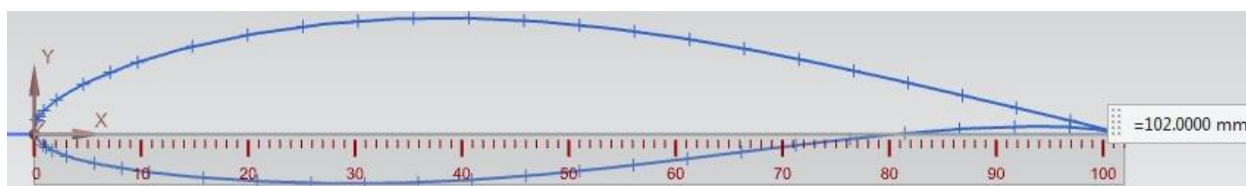


Figura 19. Perfil SH4038 utilizado na pá do fabricante



a)



b)

Figura 20. Dimensões perfil NACA 63(2)-615, a) altura; b) largura;

Apesar dos problemas encontrados no projeto da turbina, foi possível verificar que o aumento no ângulo de ataque, de fato, contribui para o aumento na eficiência. Desta forma, podendo ainda além de aumentar potência gerada utilizando um outro perfil, poderia ainda ser fabricado um acoplamento diferente para a turbina, podendo ser verificado na figura 21.



Figura 21. Pá fabricada utilizando uma angulação maior do que a disponibilizada no equipamento

6 Conclusões

Como observado no resultados da simulações, o perfil selecionado foi o perfil NACA 63(2)-615 que se mostrou 25% mais eficiente que o perfil original do fabricante. O processo de fabricação para a pá o RTM (resin transfer moulding), esta foi fabricada em fibra de vidro, utilizando um modelo de madeira.

Com a fabricação das pás utilizando o perfil selecionado, foi construída a estrutura para os experimentos, utilizando um tubo de aço galvanizado como torre e uma base amortecedora de vibrações para acoplar a torre e obter resultados, filtrados, das análises.

Entretanto, pelo fato do projeto da pá e da turbina não conseguirem trabalhar em condições que se pudesse fazer medições, não foi possível realizar o experimento de comparação de eficiência das pás. Apesar disso, verificou-se que o aumento no ângulo de ataque da pá em relação a turbina deu ao equipamento um melhor aproveitamento do vento, provando que a mudança no perfil, para um aerofólio que dá a pá uma maior angulação, permite ao aerogerador ter uma eficiência maior.

Referências

ALMEIDA, Antenor Timo Pinheiro de; SILVA, Micael Martins da. **Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas**. 2011. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Cap. 7.

BRØNDSTED, Povl; LILHOLT, Hans; LYSTRUP, Aage. COMPOSITE MATERIALS FOR WIND POWER TURBINE BLADES. **Annual Review Of Materials Research**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.505-538, 4 ago. 2005. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641>.

LIMA, Taylane Caldas. **ANÁLISE DE VIABILIDADE TECNOLÓGICA DE FABRICAÇÃO DE PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE NO RIO GRANDE DO NORTE**. 2013. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciências Exatas, Tecnológicas e Humana, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2013. Cap. 6.

MENDES, Rafael Castilho Faria. **ESTUDO DO FATOR DE INDUÇÃO AXIAL EM TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL**. 2015. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Cap. 6.

PIRES, J. C.; OLIVEIRA, B. F.. Modelagem e Simulação Virtual de Pá para Aerogerador de Pequeno Porte. **Design & Tecnologia**, Rio Grand do Sul, v. 02, p.69-76, 2010. Semestral.

SONG, Qiyue. **Design, Fabrication, and Testing of a New Small Wind Turbine Blade**. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Applied Science In Engineering, University Of Guelph, Guelph, 2012. Cap. 9.

SOUZA, Kátia Nascimento de. **SIMULAÇÃO DE UM MODELO AERODINÂMICO DE UMA PÁ UTILIZADA EM UM AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE**. 2015. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015. Cap. 5.

ANEEL. Cadernos Temáticos ANEEL Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica. <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>. Acessado dia 21/07/2019.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acessado dia 21/07/2019.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 517, DE 11 DE DEZEMBRO DE 2012. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>. Acessado dia 21/07/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEOLICA. <http://www.portalabeeolica.org.br/>. Acessado dia 21/07/2019.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. <http://www2.aneel.gov.br/>. Acessado dia 21/07/2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA EÓLICA E SOLAR SÉRGIO BRITO - CRESESB. <http://www.cresesb.cepel.br/>. Acessado dia 21/07/2019.