



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

CAMPUS CARAÚBAS

CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

CLEYSON GOMES DE MOURA

**PROJETO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL
DE BAIXO CUSTO**

CARAÚBAS-RN
2015

CLEYSON GOMES DE MOURA

**PROJETO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL
DE BAIXO CUSTO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador José Ailton L. Barboza Júnior – UFERSA.

CARAÚBAS-RN
2015

© Todos os direitos estão reservados à 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 Campus Caraúbas (BCC)
Setor de Informação e Referência

M929p Moura, Cleyson Gomes de.

Projeto de turbina eólica de eixo horizontal de baixo custo/
Cleyson de Gomes de Moura -- Caraúbas, 2015.
56f.: il.

Orientador: Prof. Me. José Ailton Leão Barboza Júnior

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

1. Energia eólica. 2. Parque eólico. 3. Turbina eólica. I.
Título.

RN/UFERSA/BCC

CDD: 621.312136

Bibliotecário: Eugênio Pacelli Ferreira da Costa
CRB-15/658

CLEYSON GOMES DE MOURA

**PROJETO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL
DE BAIXO CUSTO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador José Ailton L. Barboza Júnior – UFERSA.

APROVADO EM 30 / 01 / 2015

BANCA EXAMINADORA



M. Sc. José Ailton Leão Barboza Júnior



M. Sc. Rafael Luz Espindola



M. Sc. Antônio Alisson Alencar Freitas

À minha mãe, Adriana, meu pai, Cláudio e ao meu irmão humano, Cleyton, e meus irmãos animais, Kiko, Chaves e Spike. As “pessoas” mais importantes na minha vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha querida e dedicada mãe, Adriana Gomes, meu bravo e trabalhador pai, Claudio Rogério, que estiveram sempre ao meu lado, me educando e me criando da melhor maneira que qualquer filho poderia desejar. Jamais me deixando faltar amor e apoio não importando quantos quilômetros de distância nos separassem.

Ao meu irmão mais velho, Cleyton Gomes, que não é meu irmão gêmeo, que por um tempo vivenciou um pouco dessa minha jornada árdua e é um dos que mais pode compreender como esses três anos foram difíceis, e como um bom Uchiha sempre me apoiou do seu próprio jeito.

Aos meus irmãos mais novos, Kiko, Chaves e o mais recente Spike, os cachorros mais incríveis que eu poderia desejar, que na maioria do tempo me trouxeram felicidade, cada um com sua maneira única de ser. E que por diversas vezes foram meus fiéis confidentes sempre que precisei desabafar.

Ao meus grandes amigos que são a minha outra família e quem posso me orgulhar em ter a amizade de cada um de vocês, pois nossa amizade está além de qualquer desavença que tivemos ou que venhamos a ter: Johnatas, Johny, João Vitor, Kal-el, Odair, Junior, Wallace, Terceiro, Pedro, Beto, Allan, Junior Miranda, Janderson, Rodrigo, Garibaldi, Luizinho, Pão, Luquinhas Ceará, Lukita, Cachueira entre tantos outros.

Às minhas amigas, que em todos os momentos que precisei, alguma delas estava lá por mim, sempre me enchendo de carinho e felicidade, independentemente das besteiras que eu fizesse ou falasse, a amizade de cada uma de vocês é extremamente importante para mim: Bárbara, Adriana, Alice, Natália Gurgel, Yasmin, Fâmela.

Aos meus colegas que juntos entraram comigo nesse túnel longo e demorado e que estão, assim como eu, saindo de cabeça erguida para essa nova fase.

Ao titxio, Ailton Júnior, que como meu orientador, confiou em mim para a produção desse trabalho e que além de professor é um novo amigo que tenho prazer de feito.

Aos professores da UFERSA Caraúbas que estiveram presentes na minha formação, principalmente aqueles que hoje são amigos.

À todos os professores de Engenharia Mecânica, que são muito mais que inestimáveis professores e amigos preciosos.

A todas as bandas, brasileiras, americanas, inglesas, japonesas que sempre me animaram minhas *playlists* durante todos os momentos de elaboração desse TCC.

Ao Sr. Zé Maria e seu filho, Wagner, que deram uma grande ajuda na produção física do projeto.

Por último, não menos importante, ao meu Deus por ter me agraciado com tantas experiências incríveis durante esse tempo e, se ele permitir, que se estendam por muitos anos seguintes.

“Não é possível convencer um crente de coisa alguma, pois suas crenças não se baseiam em evidências; baseiam-se numa profunda necessidade de acreditar.”

Carl Sagan

“Não somos melhores do que o universo, somos parte dele.”

Neil deGrasse Tyson

“Nada pode ser obtido sem uma espécie de sacrifício. Para se obter algo é preciso oferecer algo em troca de valor equivalente. Esse é o princípio básico da alquimia, a Lei da Troca Equivalente.”

Hiromu Arakawa

RESUMO

Esse trabalho descreve os princípios de funcionamento dos geradores eólicos, seja de eixo vertical ou horizontal, na conversão da energia que as massas de ar que circulam sobre a superfície do nosso planeta carregam até a conversão em energia elétrica. Com o principal objetivo de produzir uma turbina eólica de baixo custo que opere em um sistema isolado gerando aproximadamente cinquenta watts de potência. Será realizado uma abordagem geral sobre o assunto para que o entendimento do sistema proposto fique mais claro. Uma análise teórica sobre todos os pontos que e fará presente neste trabalho. O sistema proposto será estudado mais a fundo antes que sua produção tenha início. Na última parte será apresentado como foi a produção do sistema e os resultados obtidos. Pode-se perceber que a energia eólica, se bem estudada, pode ser implementada mesmo em locais com ventos fracos.

Palavras-Chave: Gerador Eólico. Ar. Potência.

ABSTRACT

This paper describes the principles of operation of wind turbines, either vertical or horizontal axis, in the conversion of energy that air masses moving over the surface of our planet carry up to conversion into electricity. With the main goal of producing a wind generator low cost operating in an isolated system generating approximately fifty watts of power. Will be held a general approach on the subject so that the understanding of the proposed system becomes clearer. A theoretical analysis of all points and will present this work. The proposed system will be further studied before production begins. In the last part will be presented as the production system and the results obtained. One can see that wind power, if well studied, can be implemented even in places with light winds.

Keywords: *Wind Generator. Air. Power.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 – Mapa velocidade média anual do vento no RN.	18
Figura 2.2.1 – Anomalia da temperatura global.	20
Figura 2.2.2 – <i>World Energy Council (2010) Survey of Energy Resources</i>	21
Figura 2.3.1 – Fluxo do ar em uma seção transversal A.	23
Figura 2.4.1 – Dois principais tipos de turbinas eólicas: eixo horizontal e eixo vertical, respectivamente.	25
Figura 2.5.1 – Principais tipos de turbinas de eixo vertical.	26
Figura 2.5.2 – Componentes de uma TEEH.	27
Figura 2.6.1 – Engrenagem de dentes retos.	29
Figura 2.6.2 – Polia lisa e polia dentada, respectivamente.	29
Figura 2.6.3 – Sistema de polias com mesmo diâmetro.	30
Figura 2.6.4 – Sistema de polias A e B.	30
Figura 3.3.1 – Comparação entre a altura normal de uma casa e altura de aproximadamente 7-10 m.	34
Figura 3.3.2 – Representação do sistema adotado.	35
Figura 4.1.1 – Análise de blocos do sistema proposto.	36
Figura 4.4.1 – Velocidade angular do rotor em função da velocidade do vento.	39
Figura 4.5.1 – Esquematização do sistema de transmissão de potência.	40
Figura 5.1.1 – Peça de aço utilizada como o cubo.	42
Figura 5.1.2 – Representação em perspectiva do cano PVC.	42
Figura 5.1.3 – Vista superior do cano PVC.	43
Figura 5.1.4 – Cano PVC devidamente marcado para os cortes.	43
Figura 5.1.5 – Último corte para terminar a produção das pás.	44
Figura 5.1.6 – Pás após processos de fabricação.	44
Figura 5.1.7 – Representação da perfuração do cubo.	45
Figura 5.1.8 – Parafusos adotados para a fixação das pás.	45
Figura 5.1.9 – Pás após a fixação.	45
Figura 5.1.10 – Aro de bicicleta de tamanho 26.	46
Figura 5.1.11 – Polia de 5 cm de diâmetro utilizada no sistema mecânico de transmissão de potência.	46
Figura 5.1.12 – Correia A 90 adotada para o sistema mecânico.	47
Figura 5.1.13 – Cubo de bicicleta.	47

Figura 5.1.14 – Suporte de ferro utilizado como torre.	48
Figura 5.1.15 – Dimensões do suporte de ferro galvanizado.	49
Figura 5.2.1 – Suporte das pás finalizado.....	49
Figura 5.2.2 – Cubos soldados, criando um eixo.....	50
Figura 5.2.3 – Sistema multiplicador de velocidade pronto.	50
Figura 5.2.4 – Turbina finalizada 1.	51
Figura 5.2.5 – Turbina finalizada 2.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Turbinas eólicas históricas.....	20
Tabela 2 – Potência eólica instalada.....	22
Tabela 3 – Velocidade do vento durante o ano (50 m).....	37
Tabela 4 – Comparação entre potências com diferentes tamanhos de pás para um gerador eólico com coeficiente de potência de 35%.....	38
Tabela 5 – Especificações da correia adotada.	47
Tabela 6 – Especificações técnicas do modelo 9130.081.032 Bosch.....	48
Tabela 7 – Custos envolvidos na produção.	52

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – Massa específica do ar

P_a – Pressão atmosférica

R – Constante dos gases

T – Temperatura ambiente

ω – Velocidade angular

η – Eficiência

C_p – Coeficiente de potência

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL – Associação Nacional de Energia Elétrica

TEEH – Turbina eólica de eixo horizontal

TEEV – Turbina eólica de eixo vertical

RPM – Rotação por minuto

RN – Rio Grande do Norte

CRESEB – Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito

BIG – Banco de Informações de Geração

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PAC – Programa de Aceleração de Crescimento

IEA – *International Energy Agency*

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UFP – Universidade Federal de Pelotas

WEC – *World Energy Council*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	18
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivo Específico	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	HISTÓRIA	19
2.2	CENÁRIO ATUAL	20
2.3	POTÊNCIA DO VENTO	22
2.4	TIPOS DE GERADORES EÓLICOS E SEUS FUNCIONAMENTOS	24
2.5	VERTICAIS X HORIZONTAIS	26
2.5.1	Rotores Verticais.....	26
2.5.2	Rotores Horizontais.....	26
2.5.2.1	Nacele.....	27
2.5.2.2	Pás, eixo e cubo	27
2.5.2.3	Caixa multiplicadora	28
2.5.2.4	Geradores	28
2.6	ENGRENAGEM X POLIA	28
2.6.1	Engrenagem	29
2.6.2	Polia	29
2.6.3	Transmissão de potência	30
2.7	SISTEMAS ISOLADOS	31
3	ANÁLISE TEÓRICA DO PROJETO.....	32
3.1	FATORES PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL	32
3.1.1	Potencial do gerador eólico.....	32
3.2	DIMENSIONAMENTO	33

3.2.1	Comprimento das Pás	33
3.2.2	Altura da torre, relação de polias e tamanho do gerador	33
3.2.3	Sistema proposto.....	34
4	PROJETO DO GERADOR EÓLICO.....	36
4.1	ANÁLISE DE BLOCOS	36
4.2	VELOCIDADE DO VENTO	37
4.3	ENERGIA CONTIDA NO VENTO.....	37
4.4	ENERGIA CONVERTIDA PELO ROTOR	38
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE TAMANHO DAS PÁS.....	38
4.6	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO ROTOR.....	39
4.7	RELAÇÃO DAS POLIAS.....	39
4.8	GERADOR	41
4.9	POTÊNCIA EXTRAÍDA	41
5	MONTAGEM E RESULTADOS	42
5.1	MATERIAIS DO GERADOR EÓLICO	42
5.1.1	Cubo.....	42
5.1.2	Pás	42
5.1.3	Suporte para as pás	44
5.1.4	Sistema de transmissão de potência	46
5.1.5	Gerador	47
5.1.6	Torre	48
5.2	MONTAGEM.....	49
5.3	CUSTOS	51
5.4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	52
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Energia segundo a física é a capacidade de realizar trabalho. Ela é o que faz as coisas acontecerem. A energia desempenha um papel fundamental na vida e no desenvolvimento de qualquer forma de vida na terra. Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma. De acordo com a primeira e segunda lei da termodinâmica.

Com o crescimento intelectual do ser humano, o mesmo foi capaz de entender como a energia está presente em diversos fenômenos naturais. Dessa forma conseguiu enxergar novas fontes de energia derivadas das quatro fontes primárias da natureza, são elas segundo Boyle: a energia cinética (associada aos corpos em movimento), a energia potencial (vinculada à gravidade), a energia eletromagnética (associada à união atômica das partículas) e a energia nuclear (armazenada no núcleo dos átomos).

A energia eólica é uma destas fontes derivadas das quatro primárias, neste caso, a energia cinética associada ao movimento do vento. Esta energia é obtida a partir do deslocamento de massas de ar. Segundo LOPEZ (2012) apesar da energia eólica ter como combustível base os ventos, o movimento do ar no planeta depende diretamente do aquecimento das regiões próximas à linha do equador e ao resfriamento das regiões próximas dos polos.

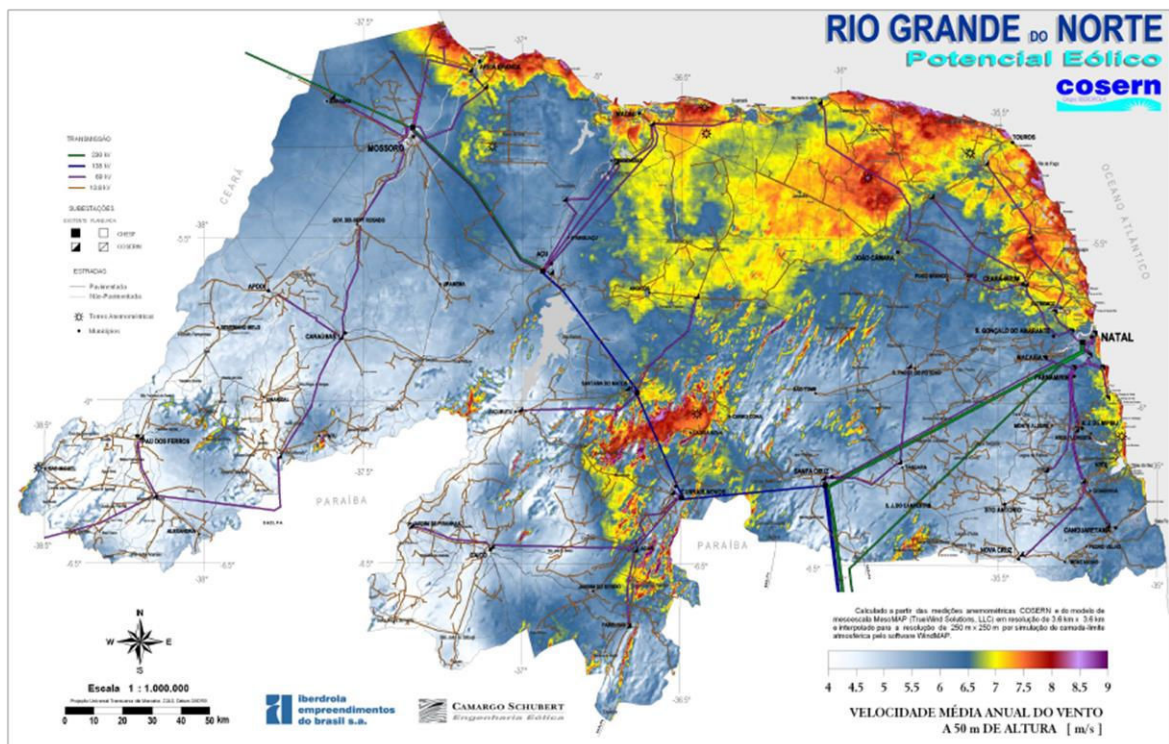
Em qualquer forma de geração de energia, parte dessa energia é perdida nos processos de conversão e a energia eólica não é uma exceção. Para um entendimento básico, a energia dos ventos passa por duas conversões antes de se tornar energia elétrica propriamente dita. Inicialmente ela está em forma de energia cinética, associada ao movimento das massas de ar, em seguida escoa sobre as pás do gerador eólico (conversão para energia mecânica de rotação) gerando uma rotação que aciona um gerador (conversão para energia elétrica) e assim termina o processo de conversão desta energia. Por esse motivo ainda existe um grande caminho a ser percorrido para que se possa alcançar uma eficiência ainda maior.

Este trabalho abordará em seu segundo capítulo, um estudo teórico referente à eficiência e ao funcionamento do gerador eólico. Como se dá e o que se deve ser obedecido antes da implantação de uma máquina dessas. Seu terceiro capítulo será composto por um aprofundamento do real funcionamento dessa máquina. E no quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio de simulações em campo.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A partir da Figura 1.1.1, vê-se que o estado do Rio Grande do Norte (RN) tem um grande potencial com os ventos a uma altura de 50 metros e esses dados só melhoram para alturas de 75 e 100 metro. Mudanças na temperatura do ar podem criar turbulências, devido ao fenômeno da convecção, e reduzir a velocidade do vento. Fatores como esses só reforçam ainda mais a capacidade eólica do nordeste.

Figura 1.1.1 – Mapa velocidade média anual do vento no RN.



Fonte: Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESEB).

1.2 OBJETIVOS

Para esse tópico serão abordados os objetivos base para esse trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver o protótipo de um gerador eólico de eixo horizontal de baixo custo.

1.2.2 Objetivo Específico

Verificar através de testes, qual a melhor relação entre as polias que faz com que o gerador eólico produza boa parte da potência nominal.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRIA

Desde os tempos antigos, com o avanço da agricultura o ser humano começou a utilizar a força dos ventos para suas necessidades. “Os moinhos movidos por vento têm origem remota e incerta” (LOPEZ, 2012). No século VII, na Pérsia, os moinhos de vento já eram usados para atividade agrícolas, apesar de utilizarem um sistema que não era eficaz.

Conforme a sociedade foi evoluindo a capacitação sobre tal tecnologia ficava cada vez maior. Os cata-ventos foram se tornando uma peça importante para agricultores. A cada ano suas aplicações cresciam e se tornavam cada vez mais importantes para o cultivo das terras. Cata-ventos já eram usados para moer grãos desde tempos remotos e com o aperfeiçoamento eles também começaram a ser usados para o bombeamento de água. Essas aplicações cresceram cada vez mais: serrarias, fábricas de papel e prensa de grãos para produção de azeites, são apenas algumas dessas aplicações.

O uso dessas máquinas ficava cada vez maior e assim, melhoramentos eram necessários para aumentarem a sua eficiência e dessa forma as mudanças foram gerando melhoramentos (freios hidráulicos, maior aerodinâmica e etc). Segundo LOPEZ (2012), foi no final do século XX, na Dinamarca, que as turbinas eólicas começaram a ser utilizadas na geração de eletricidade, mas nada em uma escala comercial.

Apenas no ano de 1888, com Charles Bruch (1849 - 1929), na cidade de Cleveland, Ohio, foi erguido o primeiro cata-vento destinado a geração de energia elétrica. Cata-vento esse que fornecia 12 kW em corrente contínua para o carregamento de baterias. Essa máquina tinha 144 pás, um rotor de 17 metros em uma torre de 18 metros de altura. Mas a Turbina Eólica de Bruch não ficou conhecida apenas por ser a primeira a gerar energia elétrica, mas também por ser uma das primeiras máquinas a utilizar um fator multiplicador de rotação, relação essa de 50:1. Essa turbina passou cerca de 20 anos funcionando normalmente na geração de energia elétrica.

Com o passar dos anos novos estudos foram feitos e as máquinas melhoraram cada vez mais. Problemas contra a resistência do vento em grandes alturas foram resolvidos, outros melhoramentos foram aplicados, dessa forma se deu a evolução dos geradores eólicos ao redor do mundo. A Tabela 1 mostra algumas dessas máquinas, suas devidas capacitações e o

ano em que cada uma entrou em operação, de maneira a mostrar como alguns países investiram nesta tecnologia em épocas passadas.

Tabela 1 – Turbinas eólicas históricas.

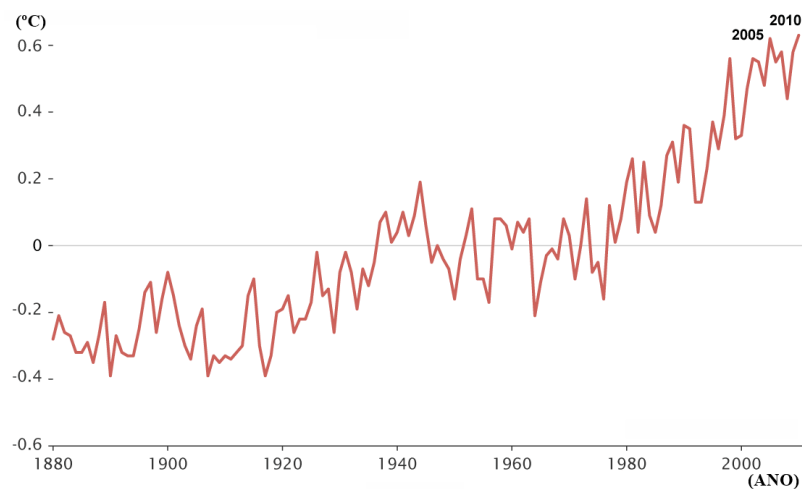
Turbinas eólicas históricas	Diâmetro [m]	Potência [kW]	Potência específica [kW/m²]	Número de pás	Altura do rotor [m]	Entrada em operação
Poul LaCour, Dinamarca	23	18	0,04	4	-	1891
Smith-Putnam, EUA	53	1.250	0,56	2	34	1941
F. L. Smidth, Dinamarca	17	50	0,21	3	24	1941
F. L. Smidth, Dinamarca	24	70	0,15	3	24	1942
Gedser, Dinamarca	24	200	0,44	3	25	1957
Hutter, Alemanha	34	100	0,11	2	22	1958

Fonte: Lopez, 2012.

2.2 CENÁRIO ATUAL

Nos últimos anos a preocupação global devido as mudanças climáticas vêm afetando cada vez mais a visão do que deve ser feito para que em no futuro o ser humano ainda possa desfrutar de uma vida com qualidade.

Figura 2.2.1 – Anomalia da temperatura global.

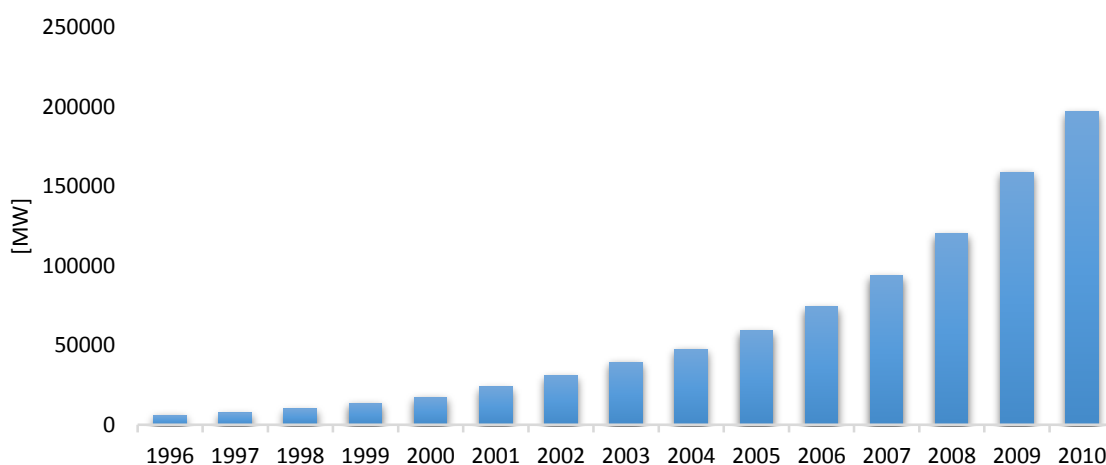


Fonte: Nasa/GIS (Goddard Institute for Space Studies).

Dados contidos na Figura 2.2.1 mostram o impacto ambiental que o próprio ser humano vem causando sobre seu ambiente. Essas mudanças drásticas que estão ocorrendo fazem com que as energias renováveis, apesar de seus ainda elevados custos, se tornem cada vez mais importantes para a matriz energética mundial.

O avanço da energia eólica instalada no mundo entre os anos de 1996-2010 pode ser observado na Figura 2.2.2. Os dados da mesma mostram os saltos que houveram nos últimos anos, de modo que em 2010 houve um aumento de aproximadamente 24% em relação ao ano anterior, alcançando 1,97 GW de capacidade instalada.

Figura 2.2.2 – *World Energy Council (2010) Survey of Energy Resources.*



Fonte: WEC.

No final de 2012, o setor eólico representava cerca de 2% de toda a capacidade instalada no Brasil. Até o final de 2023, essa fatia deverá chegar a 11%.¹ Essa é a visão futura para energia eólica no Brasil. Apesar de parecer algo pequeno são grandes previsões para um país que começou tarde nesse segmento de geração de energia, “a primeira turbina eólica instalada no país – em 1992, no Arquipélago de Fernando de Noronha [...]” (ANEEL, 2008, p.82). A partir da Tabela 2 fica ainda mais claro como o Brasil ainda está bastante defasado em relação a outras potências mundiais.

¹ Informação obtida através do site <<http://www.pac.gov.br/noticia/22d0c0bd>> Acesso em 21 de Novembro de 2014.

Tabela 2 – Potência eólica instalada.

País	Potência Instalada (MW)	% Mundial
China	44.773,0	22,33
Estados Unidos	40.267,0	20,08
Alemanha	27.204,0	13,57
Espanha	20.676,0	10,31
Índia	13.065,0	6,51
França	5.660,0	2,82
Canadá	4.124,0	2,05
Portugal	3.802,0	1,89
Brasil	931,0	0,46
Total Mundial	200.457 MW	

Fonte: ALMEIDA (2012).

Porém apesar dos dados mostrados na Tabela 2, mesmo com a grande diferença entre os outros países e o Brasil, os investimentos na área estão em alta. De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro², estimaram um potencial eólico de 143 MW, sendo 75 MW, cerca de 52% deste potencial, localizado no Nordeste. E segundo o Banco de Informações de Geração (BIG), da ANEEL, no final de 2008, o Brasil tinha um potencial instalado de 273 MW, produzidos por 17 usinas eólicas instaladas³.

2.3 POTÊNCIA DO VENTO

Para calcular a potência que o vento gera, deve-se primeiramente saber o quanto de energia o ar carrega consigo. Dessa forma sabe-se que a energia cinética, ligada ao movimento, de uma massa de ar, m , que se desloca à uma velocidade v é:

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1.1)$$

Onde:

$E \rightarrow$ energia cinética [J];

$m \rightarrow$ massa do ar [kg];

$v \rightarrow$ velocidade do vento (massa de ar) [m/s].

² Após um importante estudo de âmbito nacional, publicado em 2001 pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB/CEPEL resultou nesses resultados. Acesso em 22 de Novembro de 2014. <<http://www.parqueeeolicoalegria.com.br/energia-eolica>>

³ Fonte: Atlas de Energia Eólica do Brasil, 3ª Edição, p. 81 e 82.

A partir da equação (1.1), afim de se encontrar a potência do vento, aplica-se a derivada em relação ao tempo:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right) = \frac{\mu \cdot v^2}{2} \quad (1.2)$$

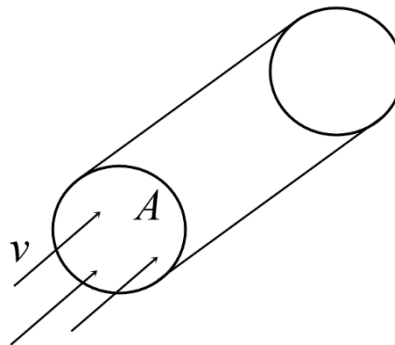
Onde:

$P \rightarrow$ potência do ar [W];

$\mu \rightarrow$ fluxo do ar [kg/s];

$v \rightarrow$ velocidade do vento (massa de ar) [m/s].

Figura 2.3.1 – Fluxo do ar em uma seção transversal A.



A partir da

Figura 2.3.1 pode-se definir μ . Sabendo que o fluxo escalar é dado por:

$$Q = v \cdot A \quad (1.3)$$

Onde:

$Q \rightarrow$ fluxo [m³/s];

$A \rightarrow$ área transversal da seção por onde corre o fluido [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do fluido [m/s].

O fluxo de qualquer fluido pode ser definido utilizando a equação (1.3), sendo necessário multiplicar pela quantidade em massa desse fluido. Como se trata de ar, deve ser utilizado a massa específica ρ :

$$\mu = \rho \cdot v \cdot A \quad (1.4)$$

Onde:

$\mu \rightarrow$ fluxo de ar [kg/s];

$A \rightarrow$ área da seção transversal [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do fluido [m/s].

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³].

Substituindo (1.4) em (1.2), têm-se:

$$P = \frac{(\rho \cdot v \cdot A) \cdot v^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1.5)$$

Onde:

$P \rightarrow$ potência do vento [kg/s];

$A \rightarrow$ área da seção transversal [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do vento [m/s];

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³].

A equação (1.5) mostra uma ligação direta entre a massa específica do ar e a potência por ela gerada, porém a massa específica do ar não é constante e varia com a pressão atmosférica como também com a temperatura, desta forma:

$$\rho = \frac{P_a}{R \cdot T} \quad (1.6)$$

Onde:

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³];

$P_a \rightarrow$ pressão atmosférica [Pa];

$R \rightarrow$ constante dos gases [287 J/kgK];

$T \rightarrow$ temperatura ambiente [K].

2.4 TIPOS DE GERADORES EÓLICOS E SEUS FUNCIONAMENTOS

Para entender o que são geradores eólicos, deve-se primeiramente saber o princípio de funcionamento destas máquinas, que segundo Almeida (2012, p.42):

Geradores eólicos utilizam energia cinética do vento para girar suas pás que estão ligadas a um rotor de uma máquina elétrica que produz energia. Essa máquina, ou gerador elétrico, pode ser assíncrono (conhecido também como motor de indução), síncrono ou síncrono com ímãs permanentes que dispensam a caixa multiplicadora e trabalham com baixa rotação.

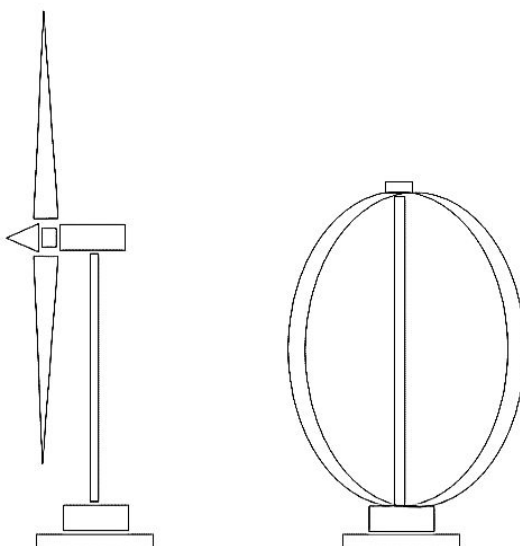
Outro fato importante sobre essas máquinas é saber que elas se dividem em dois grandes grupos: Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbinas Eólicas de Eixo

Vertical (TEEV). A Figura 2.4.1 apresenta os dois tipos de turbinas, sabe-se que as TEEH tem o eixo de rotação paralelo ao fluxo do vento, já as TEEV tem o eixo de rotação perpendicular, ou seja, fazendo um ângulo de 90° com o fluxo do vento. Existem muitos tipos de turbinas, variando desde o tamanho, potência e suas aplicações.

As necessidades são um ponto crucial para determinar qual gerador eólico utilizar, porém o local onde será instalado e o comportamento do vento podem mudar um projeto por completo. Dessa forma a instalação de uma TEEH de grande porte em um meio urbano não é muito aconselhável, mesmo com a grande utilização desses modelos em pequeno porte. Apesar de terem uma potência maior é necessário um maior espaço para a alocação e ainda assim é necessário uma direção constante do fluxo de vento.

Dessa forma as TEEV ganharam cada vez mais seu espaço. Pois, diferente das TEEH, elas não precisam de uma direção constante no fluxo dos ventos, não dependem de uma grande fundação para instalação e assim diminuem os custos finais do projeto. As TEEV ainda assim apresentam desvantagens, baixas rotações, consequentemente menor potência gerada, menor eficiência em relação às de TEEH.

Figura 2.4.1 – Dois principais tipos de turbinas eólicas: eixo horizontal e eixo vertical, respectivamente.



2.5 VERTICAIS X HORIZONTAIS

2.5.1 Rotores Verticais

As TEEV apesar de não terem a mesma potência das TEEH estão cada vez mais presentes em ambientes urbanos. Esses sistemas de eixo vertical apresentam algumas vantagens sobre os de eixo horizontal: não necessitam de um sistema de alinhamento com o vento, dessa forma têm-se uma diminuição nos custos de produção, porém também existe diminuição nos custos no transporte, montagens e manutenção. Outra vantagem é ter o gerador instalado em alturas não muito elevadas e/ou muitas vezes no próprio solo.

Savonius⁴, Darrieus⁵, H-Darrieus (Figura 2.5.1) são os tipos de turbinas verticais mais comuns. O rotor Darrieus é um dos mais eficientes entre os três principais, conseguindo alcançar até 40% de eficiência com ventos fortes, bem acima do Savonius que consegue apenas 20% em ventos fracos como visto em XIN JIN *et al.*(2014).

Figura 2.5.1 – Principais tipos de turbinas de eixo vertical.



Fonte: ALMEIDA (2012).

2.5.2 Rotores Horizontais

Diferente das TEEV, às TEEH tem um funcionamento, processo de montagem e manutenção mais complexos. Dessa forma suas potências e custos são mais elevados em comparação aos rotores verticais. Atualmente os rotores horizontais são a massa dominante na geração de energia elétrica para fins comerciais. Assim como mais tecnologia é aplicada

⁴ “A Wind turbine, of the savonius Wind turbine type, comprises a rotatable member extending along a longitudinal axis and a plurality of blades extending radially outwards from the rotatable member and spaced apart around the circumference thereof.” MURPHY (2014, p.1).

O Rotor de Savonius baseia-se no princípio do acionamento diferencial. Como as forças que o vento exercer sobre as pás é não é igual nas duas direções, essa variação gera uma rotação no sistema.

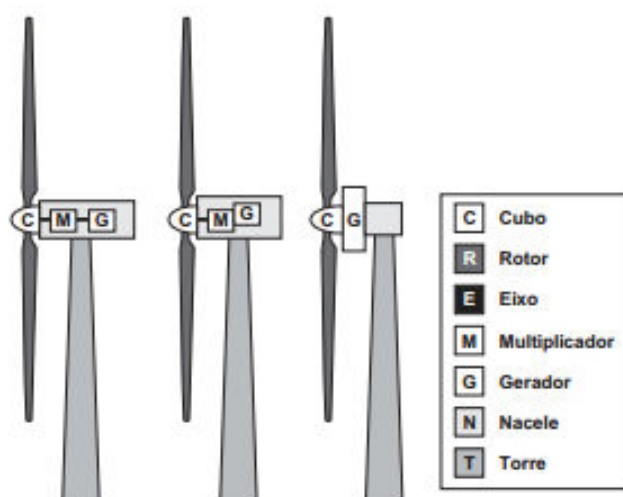
⁵ “Darrieus vertical axis wind turbines (VAWTs) have more technological advantages, providing an alternative for the wind power technology; hence Darrieus VAWTs are catching more eyes.” XIN JIN *et al.*(2014, p.1).

O Rotor de Darrieus tem o princípio da variação cíclica de incidência. Como ambos os perfis estão sofrendo uma incidência de diferentes ângulos, a força resultante sobre o sistema tende a gerar uma rotação.

nestas máquinas, variações nas turbinas também são possíveis, o que abrange uma gama maior aplicações.

A Figura 2.5.2 mostra três tipos de geradores eólicos de eixo horizontal com diferentes componentes internos.

Figura 2.5.2 – Componentes de uma TEEH.



Fonte: ALMEIDA (2012).

2.5.2.1 Nacele

A nacela é a estrutura que armazena quase todas as componentes de um gerador eólico. Montada no topo da torre, é na sua parte interna onde ocorre a transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica. O tamanho das nacelas está diretamente ligado com as componentes internas do gerador eólico.

2.5.2.2 Pás, eixo e cubo

As pás são as responsáveis por converterem parte da energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. O número de pás adotados mudou bastante com o tempo assim como sua aerodinâmica. Apesar de cada empresa que fabrica essas peças ter seu próprio molde, cada uma destas tenta aproveitar ao máximo a energia que o vento carrega.

As pás são ligadas ao cubo, parte que fica mais à frente no gerador eólico. O cubo normalmente é feito de um material de alta resistência para poder suportar toda a massa de ar que escorre sobre sua superfície e também fixar as pás de maneira segura. Em geradores eólicos com sistemas de freios aerodinâmicos, um sistema de rotação das pás fica dentro do

cubo, para quando for necessário parar o funcionamento da máquina. O que acopla o cubo ao gerador é o eixo, fazendo assim a transferência, em parte, da energia mecânica.

2.5.2.3 Caixa multiplicadora

A caixa multiplicadora consiste em transformar as baixas rotações do rotor em altas rotações para que sejam compatíveis às rotações necessárias para o funcionamento do gerador. Devido ao avanço tecnológico já são produzidos geradores eólicos sem essas caixas multiplicadoras que ao invés de adotarem sistemas para aumentar o número de rotações são utilizados geradores multipolos de baixa rotação.

A sua utilização ou não, não são motivos claros para classificar um projeto de um gerador eólico melhor que outro, cada um possui suas vantagens e desvantagens, a adoção de cada um é apenas questão de escolha do fabricante.

2.5.2.4 Geradores

Os geradores são os responsáveis pela conversão de energia mecânica em elétrica. Estas máquinas ficam no fundo na nacela trabalhando nessa conversão. Atualmente os geradores mais conhecidos nos projetos de geradores eólicos são:

- Gerador assíncrono – “Em uma máquina de indução, um campo elétrico é induzido pelo movimento relativo entre o motor e o campo girante do estator, que produz uma tensão no enrolamento do rotor. Assim, cada condutor do rotor percebe esse campo variável no tempo, permitindo a circulação de correntes, surgidas por indução quando os condutores estão curto-circuitados. Daí a denominação de máquina de indução” (PINTO, 2013).
- Gerador síncrono – “A máquina síncrona leva esse nome pois sua velocidade de rotação é fixa e sincronizada com a frequência da tensão de alimentação da rede, independentemente assim da carga” (PINTO, 2013).

2.6 ENGRENAGEM X POLIA

Neste tópico, serão abordadas as principais características de cada um dos elementos mecânicos que podem ser empregados em um gerador eólico. Também abordará o fenômeno da transmissão de potência que é a razão da utilização dessas peças durante os processos de conversão de energia.

2.6.1 Engrenagem

Engrenagens são elementos rígidos com utilização na transmissão de movimentos rotativos através de eixos. Essa transmissão se dá pelo contato entre os dentes. Devido à rigidez desses elementos algumas características devem ser atendidas. A principal é que não haja nenhuma diferença de velocidade no ponto de contato dos dentes, pois qualquer variação pode causar travamento ou perda de contato. Dessa forma não é possível fazer a transmissão comprometendo o sistema. A Figura 2.6.1 mostra o tipo mais comum de engrenagem encontrada, engrenagem cilíndrica com dentes retos.

Figura 2.6.1 – Engrenagem de dentes retos.



2.6.2 Polia

Polias são elementos mecânicos de forma circular, com ou sem canais periféricos, Figura 2.6.2. Diferente das engrenagens, as polias não entram em contato umas com as outras. Para funcionarem necessitam de um segundo elemento, conhecido como correia. A correia é o elemento de ligação entre polias e em alguns casos, como em carros, as polias podem ter um sistema de dentes parecido com os das engrenagens, dessa forma a correia também tem dentes internos o que aumenta o contato, melhorando a fixação.

Figura 2.6.2 – Polia lisa e polia dentada, respectivamente.

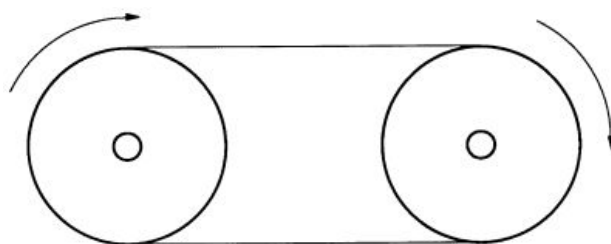


2.6.3 Transmissão de potência

Conjuntos formados por polias e correias, assim como os formados por engrenagens, são os grandes responsáveis pela transmissão de velocidade⁶ entre máquinas. Algumas máquinas elétricas, como geradores internos dos geradores eólicos, necessitam de altas rotações para que possam gerar energia, porém o número de Rotações Por Minuto (RPM) do rotor de um gerador eólico não é, e nem pode ser, muito rápido, por simples motivos de segurança.

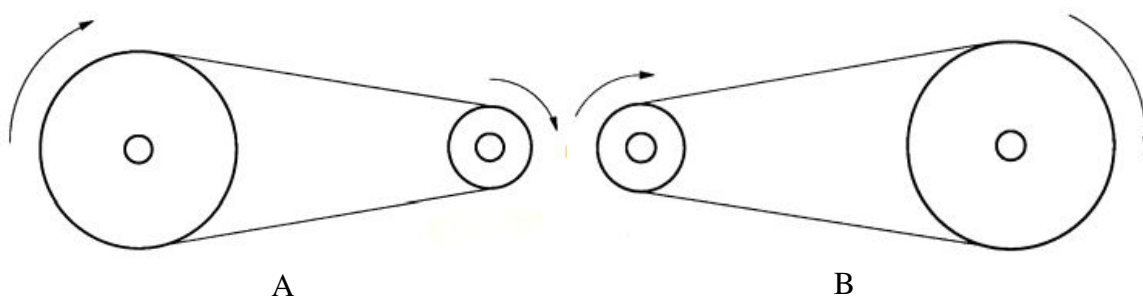
Quando se trabalha com polias e/ou engrenagens é necessário fazer com que a máquina elétrica receba as rotações necessárias para que funcione corretamente. A velocidade fornecida por um conjunto de transmissão de polias depende da relação entre os diâmetros. Desta forma, na Figura 2.6.3, o resultado dessa interação é que ambas as polias terão o mesmo RPM, independente de quem esteja recebendo a rotação inicial.

Figura 2.6.3 – Sistema de polias com mesmo diâmetro.



A Figura 2.6.4 mostra dois sistemas de polias, ambos sendo alimentados por um motor nas polias do lado esquerdo, porém cada um dos casos gera um resultado diferente na polia oposta. No sistema A o resultado vai ser uma maior RPM no lado direito, já no sistema B será uma menor RPM.

Figura 2.6.4 – Sistema de polias A e B.



⁶ O termo correto para medir o número de rotações por minuto seria frequência, porém a palavra velocidade é comumente usada por profissionais da área da mecânica.

O fenômeno que ocorre em ambos os casos pode ser expresso pela relação matemática:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (1.7)$$

Onde:

$n_{1,2} \rightarrow$ rpm das polias motora e movida, respectivamente;

$D_{2,1} \rightarrow$ diâmetro das polias movida e motora.

O mesmo acontece em engrenagens. Uma pequena diferença é em relação à orientação da rotação, já que elas sempre irão gerar uma rotação no sentido contrário da motora a cada vez que houver uma transmissão. Mas a relação de transmissão é quase a mesma, trocando apenas os valores dos diâmetros na equação (1.7) pelo número de dentes das engrenagens, assim:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (1.8)$$

Onde:

$n_{1,2} \rightarrow$ rpm das engrenagens motora e movida, respectivamente;

$Z_{2,1} \rightarrow$ número de dentes das engrenagens.

2.7 SISTEMAS ISOLADOS

Com o grande crescimento da produção de energia eólica o uso desses geradores eólicos vem se tornando algo cada vez mais do nosso cotidiano. A geração própria de energia vem crescendo junto com o fortalecimento das energias renováveis no mercado em geral. Os consumidores já conseguem ver esses sistemas isolados de geração de energia como um investimento e não mais como um gasto desnecessário. Esses sistemas não são exclusivamente elétricos e sim de energia, de qualquer forma, de acordo com Dutra (p.42):

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia gravitacional, com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

3 ANÁLISE TEÓRICA DO PROJETO

3.1 FATORES PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL

Sabendo que em qualquer projeto o objetivo é alcançar o resultados será utilizado uma turbina em escala micro, com um rotor de diâmetro menor que três metros que tem a capacidade de produzir a partir de 50 W a 2 kW de energia como objetivo base a ser alcançado.

3.1.1 Potencial do gerador eólico

Como abordado no item 2.3 deste trabalho, pela equação (1.5), viu-se que a potência que uma massa de ar carrega é:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1.9)$$

Porém o que um gerador eólico consegue gerar de energia é um valor menor que a energia carregada pelo ar, devido ao próprio funcionamento das turbinas eólicas. Segundo o físico Albert Betz em 1919, a máxima quantidade de energia cinética que pode ser convertida por uma turbina eólica em energia mecânica no rotor é 59.3 %. Esse é o limite de Betz. Além disso é necessário considerar a eficiência mecânica do sistema multiplicador de rotações e a eficiência elétrica do gerador.

Dessa forma, pode-se definir a equação real para a conversão de energia como:

$$P_{ex} = P \cdot C_p \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (1.10)$$

Onde:

$C_p \rightarrow$ coeficiente de potência;

$A \rightarrow$ área da seção transversal [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do vento [m/s];

$\eta_{1,2} \rightarrow$ eficiência mecânica e elétrica, respectivamente;

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³].

O coeficiente de potência pode ser escrito a partir das equações (1.9) e (1.10) como:

$$C_p = \frac{P_{ex}}{P} \quad (1.11)$$

Apesar o valor teórico de Betz ser aproximadamente 60%, nos problemas reais de engenharia, quando outros fatores que inserem perdas são adicionados, o valor do coeficiente

de potência do geradores eólicos varia em torno de 35~45%, a partir dos catálogos comerciais. Quando adiciona-se as perdas na conversão elétrica, aproveita-se apenas 10 a 30% de energia convertida.

3.2 DIMENSIONAMENTO

A proposta é obter um gerador eólico que forneça 50 W de potência. A partir daí, realiza-se o dimensionamento.

3.2.1 Comprimento das Pás

Para definir o comprimento da pá é necessário considerar que o diâmetro máximo do rotor não deve ultrapassar 3 m, assim:

$$C_{pá} = \frac{D}{2} - R_c + L \quad (1.12)$$

Onde:

$C_{pá} \rightarrow$ comprimento da pá [m];

$D \rightarrow$ diâmetro total do rotor [m];

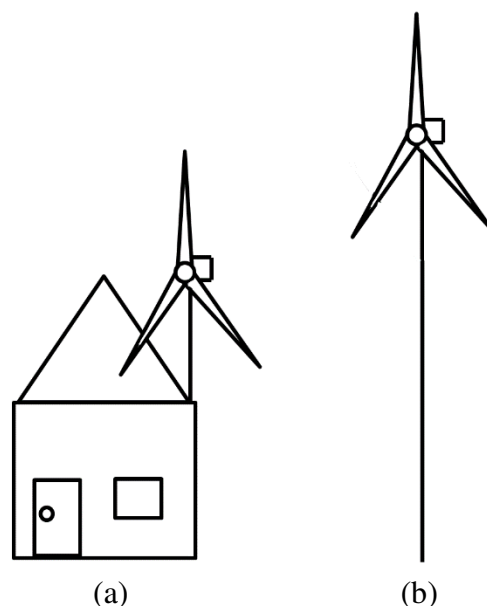
$R_c \rightarrow$ raio do cubo [m];

$L \rightarrow$ distância para os ajustes [m].

3.2.2 Altura da torre, relação de polias e tamanho do gerador

A altura adequada para a torre seria o quão mais alto fosse possível, para assim se afastar ainda mais da turbulência dos ventos próximos ao solo. O presente trabalho tem o objetivo de produzir um gerador eólico de baixo custo. Assim a altura a ser adotada é em média um pouco acima da altura normal de uma casa, para dessa forma não ficar algo muito longe do padrão e mesmo assim ser possível um bom aproveitamento. A Figura 3.2.1 mostra como seria, na prática essa diferença de altura.

Figura 3.2.1 – Comparação entre a altura normal de uma casa e altura de aproximadamente 7-10 m.



Para poder dimensionar corretamente o tamanho das polias é preciso avaliar a quantidade de energia desejada e em paralelo dimensionar o gerador para que ele seja capaz de converter o máximo de energia e também funcionar corretamente sem problemas subsequentes que possam vir a ocorrer por falta ou excesso de rotações.

3.2.3 Sistema proposto

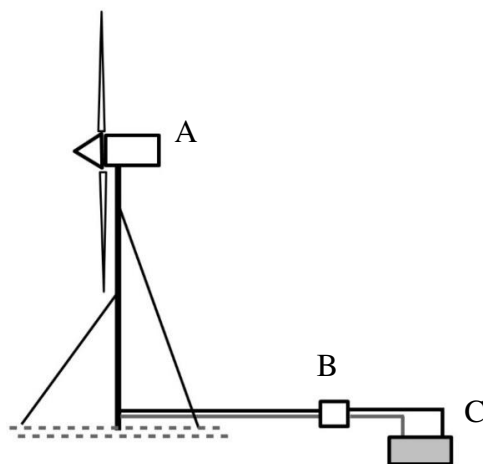
O sistema que foi desenvolvido ficou definido em três partes, que estão ligadas a cada processo de conversão de energia. A primeira parte, como em todo gerador eólico, consiste em receber em suas pás a energia que o vento carrega. Então ocorre a conversão da energia cinética para energia de rotação do rotor. Mesmo com o limite de Betz mostrando que o máximo que pode ser convertido está em torno de 60 %, as máquinas atualmente produzidas só conseguem alcançar até 45 % no extremo máximo e essa talvez seja uma das maiores barreiras para o desenvolvimento da energia eólica.

O rotor faz com que seu eixo entre em movimento, criando assim uma rotação no sistema multiplicador. A polia grande entra em movimento e através de uma correia que a liga a uma polia de tamanho inferior e por meio do fenômeno apresentado no item 2.6 deste trabalho, as rotações crescem para que assim o gerador possa funcionar corretamente e gerar a energia que é esperada.

O que foi apresentado anteriormente acontece na nacela do gerador eólico, o item A da Figura 3.2.2. Então, através de cabos a energia elétrica produzida pelo gerador é transportada

até o chão, passando por um controlador de carga, item B da Figura 3.2.2, antes de chegar até a bateria que será carregada, item C.

Figura 3.2.2 – Representação do sistema adotado.



4 PROJETO DO GERADOR EÓLICO.

4.1 ANÁLISE DE BLOCOS

Para a compreensão do sistema isolado proposto, será desenvolvida uma análise por blocos, dividindo as três principais partes do projeto e assim abordar como cada parte deve ser dimensionada, seguindo-se uma linha de raciocínio. Conforme a Figura 4.1.1, observa-se esta divisão como: Vento → Relação de Transmissão → Gerador. A primeira parte do sistema é responsável por converter a energia cinética que o vento carrega, esse estágio ainda hoje, mesmo com tantos avanços tecnológicos na área é o ponto com menor eficiência, variando entre trinta e quarenta por cento. Mesmo com a baixa conversão de energia, o que é convertido passa para a segunda etapa, a relação de transmissão ou fator multiplicador de rotações, que tem como principal função preparar essa energia para que ela possa ter uma conexão direta com o gerador, sem ser necessário mais conversões ou processos que geram ainda mais ineficiências. Esse projeto utiliza uma relação de transmissão através do uso de polias. O que difere um pouco a sua eficiência em relação as engrenagens, eficiência essa que varia entre noventa e cinco e noventa e oito por cento, uma diferença baixa em relação as engrenagens, em torno de dois por cento. As polias tem um custo em média de trinta e sete por cento menor que as engrenagens e uma eficiência ainda mais elevada quando trabalhando em altas rotações. Na terceira parte se encontra o gerador, máquina essa responsável pela transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica e logo em seguida enviar essa energia através de cabos até uma bateria de armazenamento.

Figura 4.1.1 – Análise de blocos do sistema proposto.

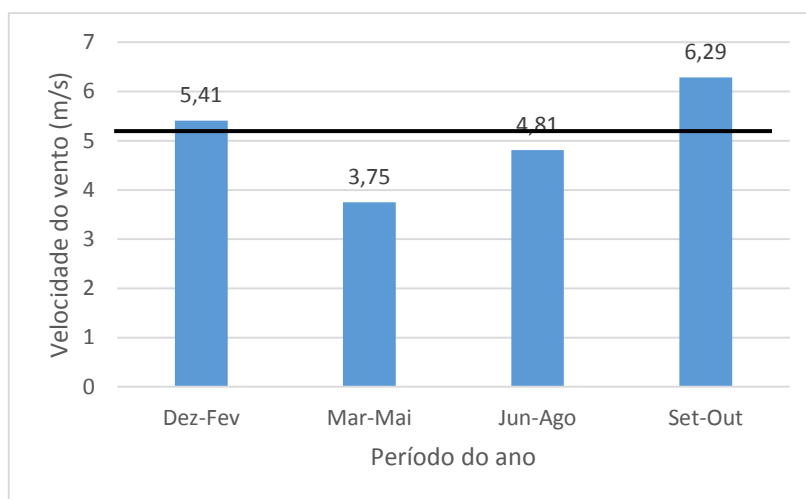


Todos os três estágios, Vento → Relação de Transmissão → Gerador, foram definidos anteriormente no presente trabalho, assim como suas respectivas equações. De posse desses dados e definindo as metas a serem alcançadas, é possível estimar os valores e resultados finais do projeto.

4.2 VELOCIDADE DO VENTO

Um dos desafios no cálculo de quanta energia aproximadamente vai ser gerada é determinar com exatidão a velocidade do vento. O vento costuma variar diariamente e quando ligado a baixas altitudes o seu escoamento pode ficar ainda menos laminar, o que se torna um problema, já que quanto maior a turbulência do ar, menos energia vai ser convertida e a incidência de problemas técnicos e mecânicos nas máquinas tende a aumentar, trazendo um mau retorno. A Tabela 3 apresenta valores para a velocidade do vento numa altura de cinquenta metros, com uma média anual de 5,07 m/s, para a região próxima a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) na cidade de Caraúbas – RN.

Tabela 3 – Velocidade do vento durante o ano (50 m).



Fonte: CRESEB.

4.3 ENERGIA CONTIDA NO VENTO

Como visto na equação (1.9), a potência do vento depende da massa específica do ar, ρ , da velocidade do vento, v , e do tamanho da seção transversal por onde o túnel de vento será medido, A^7 , que é a área de um círculo, como pode ser observado na Figura 2.3.1. Sabe-se que $\rho=1,255 \text{ kg/m}^3$, $v=5,07 \text{ m/s}$ (média anual), $R=1,10 \text{ m}$, $\pi=3,1415$, logo:

$$P = \frac{1}{2} \cdot (1,255) \cdot (3,1415) \cdot (1,10^2) \cdot (5,07^3) = 310,87 \text{ W} \quad (1.13)$$

⁷ A área de um círculo é definida como: $A = \pi R^2$

A partir do resultado da equação (1.13), é possível ter um valor bem definido para a potência disponível no ar, sob certas circunstâncias específicas. Além da necessidade dos ventos, a potência disponível cresce ainda mais quando aumentando o tamanho do rotor, criando assim possibilidades de geração de energia para qualquer necessidade.

4.4 ENERGIA CONVERTIDA PELO ROTOR

A equação (1.13) mostra a potência disponível numa certa massa de vento. Para calcular quando dessa energia será convertida pelo rotor, é necessário multiplicar pelo coeficiente de potência, C_p , que será adotado como 32 %, como previsto para pequenos geradores eólicos segundo Hirahara *et al*(2005). Assim:

$$P = 310,87.0,32 = 99,48 \text{ W} \quad (1.14)$$

Comparando os resultados obtidos das equações (1.13) e (1.14) é possível notar a grande quantidade de energia que deixa de ser convertida, em torno de 211,4 W, essa energia é suficiente para suprir 3,5 lâmpadas fluorescentes de 60 W.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE TAMANHO DAS PÁS

A Tabela 4 mostra os dados sobre o dimensionamento das pás que ajudam a decidir qual a melhor opção para escolha de um gerador.

Tabela 4 – Comparação entre potências com diferentes tamanhos de pás para um gerador eólico com coeficiente de potência de 35%.

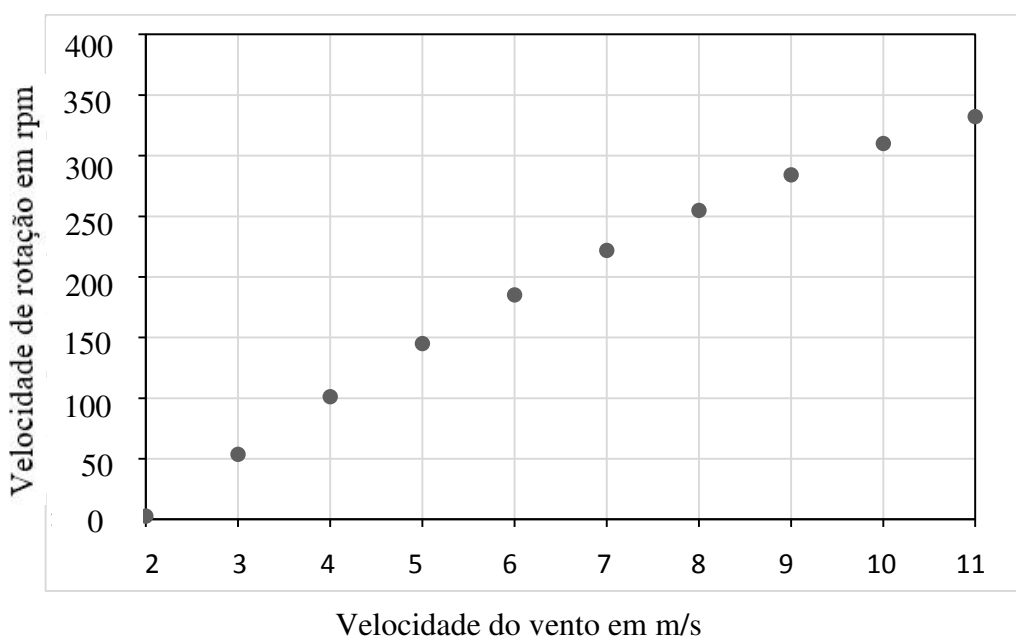
Tamanho das pás (m)	Potência disponível (W)	Potência Convertida (W)
1	305,24	106,83
1,2	427,53	149,64
1,5	649,50	227,33

Os dados apresentados na tabela acima mostram que pequenas variações no tamanho das pás alteram significativamente os valores das potências, isso se dá ao fato de que quando varia-se o raio influencia diretamente na potência como apresentado na equação (1.9), através da área varrida pelo rotor. O que faz essa variação ser tão grande é o fato de que o dobro do raio varia ao quadrado, dessa forma qualquer mínima alteração causa uma mudança considerável.

4.6 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO ROTOR

Adotando como base os estudos de Moori (2010), é possível aproximar a velocidade de rotação do rotor usando os dados da Figura 4.6.1. Dados estes obtidos por teste com um gerador eólico em túnel de vento, analisando a velocidade do vento em toda a extensão das suas pás.

Figura 4.6.1 – Velocidade angular do rotor em função da velocidade do vento.



Fonte: MOORI (2010).

Considerando o vento na sua média anual, 5,07 m/s, têm-se:

$$\omega_{ro} \cong 150 \text{ rpm} \quad (1.15)$$

Devido às baixas velocidades do vento o rotor só alcança cento e cinquenta rotações por minuto, um valor relativamente baixo quando comparado às rotações necessárias para fazer com que o gerador trabalhe corretamente e gere energia elétrica.

4.7 RELAÇÃO DAS POLIAS

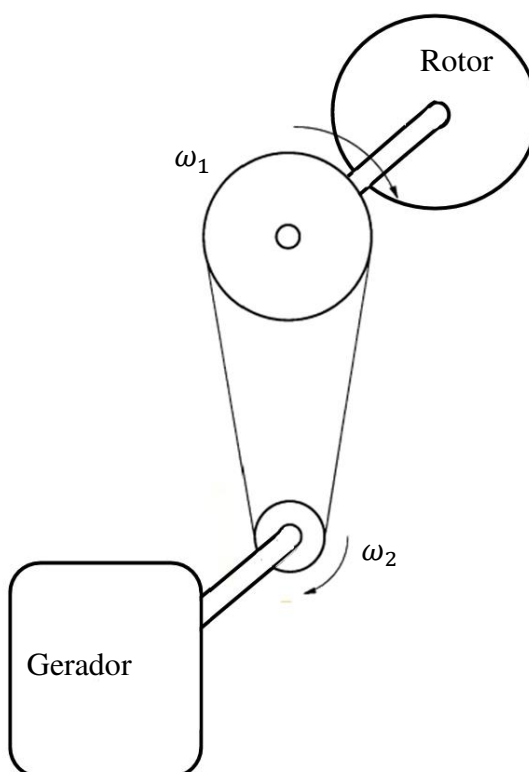
Um valor bom de rotações para geradores de baixas potências fica em torno de mil rotações por minuto. Para que a máquina possa funcionar corretamente deve trabalhar em um regime próximo a essa, assim, pela equação (1.7) e pelo resultado da equação (1.15), por cálculos básicos é possível constatar que será necessário uma relação final de transmissão de 1:8 para que o sistema trabalhe corretamente.

Para a primeira polia, a que estará ligada diretamente ao rotor, será uma com o diâmetro de 0,50 m. Como encontrado na equação (1.15), rodando a cento de cinquenta rotações por minuto, para a segunda será utilizada uma com 0,05 m, então:

$$\omega_2 = 1500 \text{ rpm} \quad (1.16)$$

O resultado obtido na equação (1.16) é o número de rotações finais, após o sistema multiplicador agir sobre velocidade angular inicial do rotor. Esse é o número de rotações que vai chegar até o gerador. A Figura 4.7.1 mostra como essa transmissão ocorre através das polias.

Figura 4.7.1 – Esquemática do sistema de transmissão de potência.



Avaliando a Figura 4.7.1 a compreensão do processo mecânico fica mais clara. O rotor gira com o arraste do vento, causando uma rotação na polia um de velocidade angular, ω_1 . Através do fenômeno de transmissão de potência a polia um gera uma rotação, ω_2 na polia dois. A que está ligada ao mesmo eixo que o gerador. A polia dois alcança uma velocidade mais próxima da recomendada para geração de energia.

4.8 GERADOR

Com base nos valores obtidos nas equações anteriores o gerador adequado deve ficar entre um intervalo razoável de variação em torno dos resultados. De uma maneira geral pode-se constatar que a máquina que se encaixa nas necessidades do projeto deve ter uma eficiência elétrica de 80 %, quando trabalhando acima de 1500 rpm. Esse é o regime esperado para um gerador desse porte, porém o gerador só poderá ser definido após o valor de potência final ser conhecido, para que não exista um superdimensionamento nem um subdimensionamento.

4.9 POTÊNCIA EXTRAÍDA

Utilizando a equação (1.14) e com base no que foi mostrado na equação (1.10), é necessário saber as eficiências mecânica e elétrica do sistema para ser possível obter o valor real da potência do aerogerador. Para a eficiência mecânica devido as falhas de instalação, deslizamento, entre outros fatores, será adotado uma eficiência de noventa por cento, que é um valor regular para pequenos sistemas mecânicos, conforme Juvinal *et al*(1991). Da mesma forma para a eficiência elétrica do gerador, será adotado oitenta por cento, que é considerado um valor comum para pequenos motores de corrente contínua segundo Fitzgerald *et al*(2003). Assim, ao utilizar $\eta_1 = 0,90$ e $\eta_2 = 0,80$, pelo resultado da equação (1.14), será obtido:

$$P = 99,48 \cdot 0,90 \cdot 0,80 = 71,63 \text{ W} \quad (1.17)$$

Como definido inicialmente, a proposta seria conseguir produzir um gerador eólico que fosse capaz de produzir cinquenta watts de potência, de maneira teórica foi possível conseguir tal condição.

5 MONTAGEM E RESULTADOS

5.1 MATERIAIS DO GERADOR EÓLICO

5.1.1 Cubo

Para o cubo foi utilizado uma chapa de aço 16, cortada em formato circular como mostrado na Figura 5.1.1.

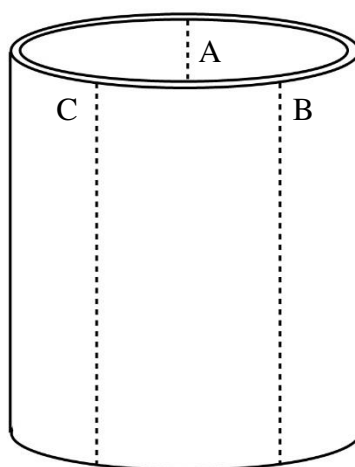
Figura 5.1.1 – Peça de aço utilizada como o cubo.



5.1.2 Pás

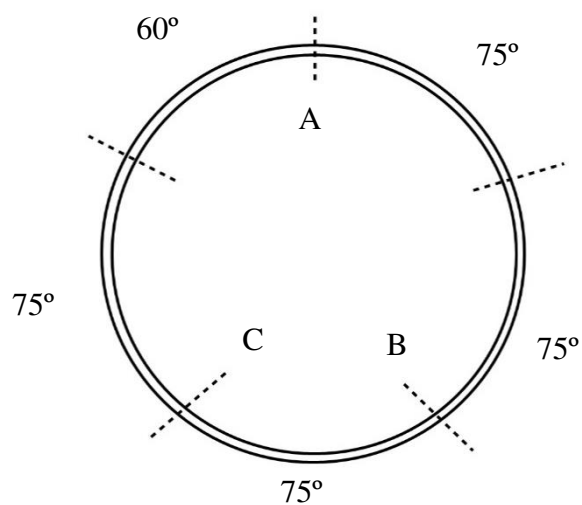
As pás foram confeccionadas a partir de um cano PVC de quatro 4"x110 mm como na Figura 5.1.2.

Figura 5.1.2 – Representação em perspectiva do cano PVC.



Observando a Figura 5.1.3 pode-se identificar as linhas pontinhas onde o cano deve ser cortado para prosseguir ao próximo passo.

Figura 5.1.3 – Vista superior do cano PVC.



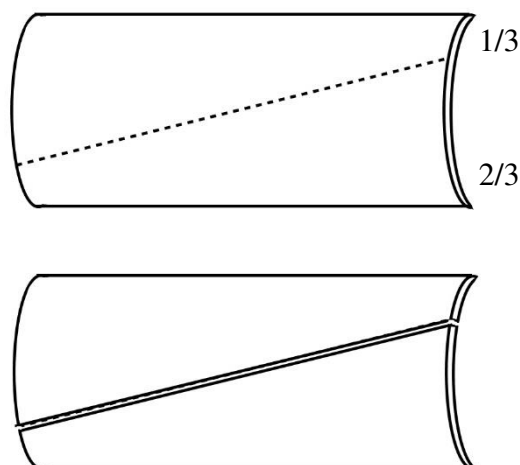
Com o cano devidamente cortado, seguindo o que foi mostrado nas Figura 5.1.2 e Figura 5.1.3, o cano deve ficar como na Figura 5.1.4

Figura 5.1.4 – Cano PVC devidamente marcado para os cortes.



Quando o cano for cortado em toda sua extensão, resta fazer o último corte, seguindo as medidas descritas como apresenta a Figura 5.1.5.

Figura 5.1.5 – Último corte para terminar a produção das pás.



Ao finalizar como apresentado na Figura 5.1.5, duas pás terão sido finalizadas. Após esse processo as pás devem ficar como a Figura 5.1.6. As pás devem ser furadas na sua extremidade de maior tamanho para que possam ser fixadas ao cubo por meio dessas.

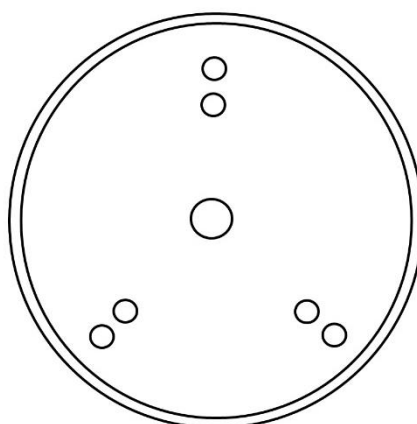
Figura 5.1.6 – Pás após processos de fabricação.



5.1.3 Suporte para as pás

Para a montagem suporte, o cubo será furado em formato triangular como na Figura 5.1.7.

Figura 5.1.7 – Representação da perfuração do cubo.



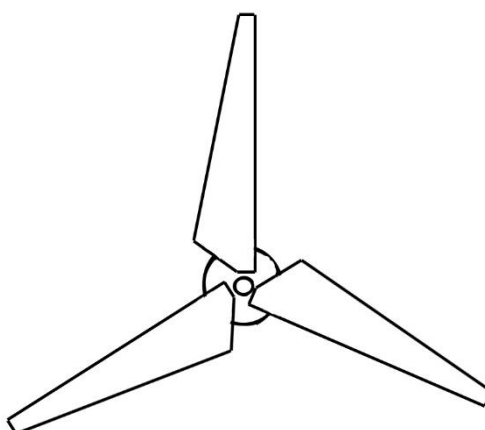
Para a fixação das pás será utilizado parafusos de tamanho de bucha 10, como os da Figura 5.1.8.

Figura 5.1.8 – Parafusos adotados para a fixação das pás.



As pás devem ser fixadas com a parte exterior do cano para baixo, e um pequeno pedaço da base pode ser cortado. O resultado deve ser como na Figura 5.1.9.

Figura 5.1.9 – Pás após a fixação.



5.1.4 Sistema de transmissão de potência

As polias são a parte crítica do projeto e que gera dificuldades pelos tamanhos limitados disponíveis para uso. A princípio seriam utilizadas polias de 310 mm, porém devido a indisponibilidade da primeira polia, que deve ser a maior possível, foi alterada e foi necessário adotar o aro de uma bicicleta (Figura 5.1.10) pela sua semelhança e capacidade de adaptar uma correia para trabalhar no sistema. Para completar o sistema de polias, será utilizada duas polias de 5cm de diâmetro, como na Figura 5.1.11.

Figura 5.1.10 – Aro de bicicleta de tamanho 26.



Figura 5.1.11 – Polia de 5 cm de diâmetro utilizada no sistema mecânico de transmissão de potência.



Para que sistema funcione é necessário uma correia. A correia escolhida está especificada na Tabela 5 – Especificações da correia adotada. Essa correia, foi a que melhor se encaixou nas necessidades do projeto e ainda teve um bom custo.

Tabela 5 – Especificações da correia adotada.

Marca	Modelo	Tamanho [m]
<i>Transpower XT</i>	A 90	2

Figura 5.1.12 – Correia A 90 adotada para o sistema mecânico.



Para completar o funcionamento do sistema mecânico de rotação foi necessário adquirir um cubo de bicicleta, como o da Figura 5.1.13, para que os eixos pudessem funcionar corretamente.

Figura 5.1.13 – Cubo de bicicleta.



5.1.5 Gerador

O gerador adotado será colocado ao fim do sistema de polias, conectado pelo mesmo eixo que está conectado com a última polia. Devido aos resultados obtidos anteriormente o

motor que mais se adequou ao projeto foi o modelo 9130.081.032 da Bosch. É possível avaliar as especificações da máquina a partir da Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações técnicas do modelo 9130.081.032 Bosch.

Tensão [V]	Potência [W]	Velocidade [RPM]
12	86	2700

5.1.6 Torre

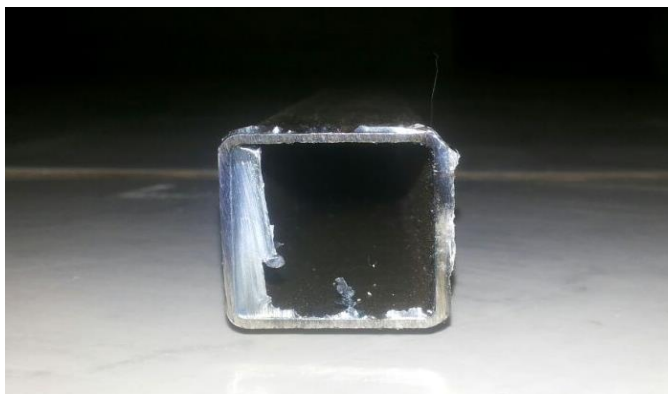
A torre tem como função elevar o gerador eólico até onde os ventos melhor incidirem sobre ele. Para esse projeto foi adotado um cano de 2,85 metros de comprimento, feita de ferro galvanizado, como mostra a Figura 5.1.14.

Figura 5.1.14 – Suporte de ferro utilizado como torre.



O suporte tem formato quadrado com dimensões 25x25 mm, como apresenta a Figura 5.1.15.

Figura 5.1.15 – Dimensões do suporte de ferro galvanizado.



O tamanho de apenas 2,70 metros foi escolhido porque o aerogerador será instalado no topo de uma edificação de com uma altura em torno de 2,50 à 4 metros de altura, que quando somados ao tamanho da torre com os devidos ajustes de instalação, alcançam em torno de 6 metros, o que já é uma altura boa para fugir da turbulência dos ventos próximo ao solo.

5.2 MONTAGEM

A primeira parte a ser produzida foi o suporte das pás. Como mostrado nos passos anteriores a chapa de aço 16 foi furada nos locais das pás e no centro, para que o cubo de bicicleta fosse soldado, como na Figura 5.2.1.

Figura 5.2.1 – Suporte das pás finalizado.



Logo em seguida o aro 26 de bicicleta, teve seu cubo soldado ao cubo do suporte das pás, criando um eixo em comum entre as duas peças, como mostra a Figura 5.2.2.

Figura 5.2.2 – Cubos soldados, criando um eixo.



Foi feito um suporte lateral para que a segunda polia, fosse posicionada no seu lugar, para em seguida ser soldada. Após terminado esse processo, e com a adição da correia, a turbina ficou como mostra a Figura 5.2.3.

Figura 5.2.3 – Sistema multiplicador de velocidade pronto.



A pás foram parafusadas em seguida e com isso a turbina ficou terminada. As Figura 5.2.4, Figura 5.2.5 apresentam os resultados obtidos.

Figura 5.2.4 – Turbina finalizada 1.



Figura 5.2.5 – Turbina finalizada 2.



5.3 CUSTOS

Para a produção da parte mecânica do projeto, foi necessário adquirir quase todas as peças, além de custos extras por mão de obra. Para melhor entendimento a Tabela 7 apresenta todos os gastos com o projeto.

Tabela 7 – Custos envolvidos na produção.

Item	Quantidade	Preço [R\$]
Cano galvanizado 3mx25cmx25cm	1	10,00
Cubo de bicicleta	1	4,00
Aro 26	1	6,00
Parafuso e porca 10	7	3,50
Cano PVC	1	10,00
Correia A 90	1	22,00
Mão de obra	-	31,00
Polia de 50mm	2	26,00
TOTAL		112,50

5.4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Vale enfatizar que, apesar de existir todo o projeto preparado, o objetivo era a produção de uma turbina de baixo custo que usasse um sistema de multiplicação de rotações para assim, se desejado, inserir um gerador. Apesar de todos os problemas o conhecimento gerado é imensurável para vida acadêmica e profissional.

Infelizmente problemas surgiram e a turbina eólica não pôde funcionar como o esperado. A principal barreira que surgiu foi na transmissão de potência. Quando a correia foi inserida o sistema ficou pesado e resistente as rotações. Sendo necessário uma força maior que o esperado para fazer as pás girarem. Muitos problemas surgiram além desse apareceram durante a produção do projeto, desde necessidades financeiras, falta de espaço físico pra produção das peças do projeto e montagem como também a necessidade de escolhas entre superdimensionamento e subdimensionamento por indisponibilidade de mercado local.

As sugestões de mudanças que deixo para serem aplicadas ao projeto para que assim o sistema funcione corretamente são a utilização de polias adequadas. É esperado que dessa forma possa evitar o principal problema, o travamento. Produzir pás com uma área maior e

com melhor sustentação própria pode ajudar no problema de ventos fracos. Uma possível troca de correia por algo mais leve e menos rígido.

Como propostas para trabalhos futuros fica a adaptação desse mesmo projeto com a troca parcial do sistema de transmissão de potência, a parte que gerou o problema, com a adição de um motor com redutor de engrenagens internas na tentativa de solucionar o problema de baixas rotações devida a falta de ventos.

Para ideia final fica a instalação do sistema para carregar baterias sempre que tenha vento disponível, e assim usar essas baterias para ajudar na iluminação da UFERSA Caraúbas. E com uma futura ampliação sugerindo a criação de pontos com carregadores universais alimentados pelo gerador dentro do campus.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Bruno. **Sistema de Controle Digital para WECS de Eixo Vertical**. 2012. 154. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

AMARANTE, Odilon; SILVA, Fabiano; FILHO, Luiz. **Potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte**. Rio Grande do Norte. Cosern, 2003.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Ed.3. Brasília. Aneel, 2008. p.79-82.

APOLLO 11. Aquecimento global. Disponível em: <<http://goo.gl/V4KYq4>> Acesso em: 20 nov. 2014.

DUTRA, Ricardo. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. CRESESB. 2008.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen. **Electric Machinery**. ed. 6. EUA: McGraw Hill, 2003.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.. **Introduction to Fluid Mechanics**. ed. 5. John Wiley & SonsCanada - Ltd, 1998.

GROSSI, Jairo. Energia Eólica. Disponível em: <<http://goo.gl/zno48m>> Acesso em: 22 nov. 2014.

HALLIDAY, David; RESNIK, Roberto; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Mecânica**. Traduzido por Ronaldo Sérgio de Biasi. vol. 1. ed. 8. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

HIRAHARAA, H. et al. **Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purpose**. Renewable Energy 30, 2005. p. 1279 - 1297.

IEA. **International Energy Agency Wind Implementing Agreement - 2010 Annual Report**. 2011. p. 180.

JÚNIOR, Auteliano. **Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos**. Campinas. UNICAMP, 2002. p. 2-3. Apostila.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M.,1991. **Fundamentals of machine component design**. ed. 2. John Wiley & Sons Canada - Ltd, 1991.

KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas elétricas e transformadores**. Tradução por Felipe Luís Daiello e Percy Antônio Soares. vol. 1. ed. 4. Porto Alegre - Rio de Janeiro: Globo, 1982.

LINO, Paulo. Polias, Correias e Transmissão de Potência. 2013, 15 f. Apostila.

LOPEZ, Ricardo Aldabo. **Energia Eólica**. ed. 2. Artliber, 2012.

MMA. Energia Eólica. Disponível em: <<http://goo.gl/Atx8J6>> Acesso em: 22 nov. 2014.

MOORI, Daniel; FORTES, João; MOLON, Leandro. **Micro Turbinas Eólicas de Baixo Custo**. Trabalho apresentado ao VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, 2010.

NEVES, Eurico *et al.* Introdução ao Estudo da Energia Eólica. Pelotas. Universidade Federal de Pelotas, 2009. p.34-37. Apostila.

NOGUEIRA, Larissa. **Estado Atual e Perspectivas Futuras para a Indústria Eólica no Brasil**. 2011. 137. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético, 2011.

PAC. Brasil ultrapassa Alemanha em expansão de energia eólica em 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/b7DnbT>> Acesso em: 21 nov. 2014.

PIGGOTT, Hugh. How to build a Wind Turbine. 2013, 48 f. Não publicado.

SCARAMBONI, Antonio; NOAVES, Regina. **Curso Profissionalizante: Cálculo Técnico**. ESSEL. Não publicado.

SILVA, Guilherme. **Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical**. 2011. 98. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, 2011.

TERRA. Nasa: dados climáticos de 2013 confirmam o aquecimento global. Disponível em: <<http://goo.gl/PkQTGT>> Acesso em: 20 nov. 2014.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência**. 2009. 285. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

WEBER, Abilio et al. **Curso Profissionalizante: Manutenção**. ESSEL. Não publicado.

WEC. **2010 Survey of Energy Resources**. Officers of the World Energy Council. 618. 2010.

WIKIPEDIA. Máquina Síncrona. Disponível em: <<http://goo.gl/GzbHKX>> Acesso em: 27 nov. 2014.

WOOFENDEN, Ian. **Wind Power for Dummies**. Canadá: Wiley Publishing, Inc., 2009.

X, Jin *et al.* Darrieus vertical axis Wind turbine: Basic research methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, EUA, 5 out. 2014. p. 212-225.