



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ HEIJI NISHIOKA

**ESTUDO E PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DO  
TIPO LENZ**

Uberlândia -MG

2017

ANDRÉ HEIJI NISHIOKA

**ESTUDO E PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DO  
TIPO LENZ**

Orientador

**Prof. Dr. Odenir de Almeida**

**Projeto de Conclusão de Curso**  
apresentado ao Curso de Graduação  
em Engenharia Aeronáutica da  
Universidade Federal de Uberlândia,  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de **BACHAREL em**  
**ENGENHARIA AERONÁUTICA.**

UBERLÂNDIA – MG

2017

# **ESTUDO E PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DO TIPO LENZ**

**ANDRÉ HEIJI NISHIOKA**

Projeto de conclusão de curso  
**APROVADO** pelo Colegiado do Curso de  
Graduação em Engenharia Aeronáutica  
da Faculdade de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2017.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Odenir de Almeida- Orientador  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Msc. Giuliano Gardolinski Venson  
Universidade Federal de Uberlândia

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à pessoa que eu dedicaria toda a minha vida, minha mãe Miriam (*in memoriam*) por ter me dado todo o apoio durante todos os anos abdicando muitas das vezes seus sonhos em função dos meus e que apesar de não estar presente neste momento ficará muito feliz e orgulhosa aonde quer que ela esteja.

Agradeço também à minha família, meu pai Walter por ter me dado todo o suporte durante todos estes anos e meus irmãos Ricardo e Tatiana por serem os melhores irmãos que a vida poderia ter me dado.

Agradeço à minha namorada Thaís por sempre ter me ajudado a levantar diante das dificuldade e principalmente diante das várias desistências em me formar.

Gostaria de agradecer também ao meu professor orientador Odenir de Almeida por sua orientação e atenção durante este projeto e os anos em que foi meu professor.

Agradeço também a todos os professores e técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica, principalmente ao professor Finzi pela ajuda durante este trabalho e aos técnicos Reinaldo, Jonas e Diego. Com certeza irei levar mais do que professores para a vida.

Agradeço ainda à todos os meus amigos por sempre me incentivarem e torcerem por mim.

Por fim agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos auxílios financeiros e a empresa Honda® que me concedeu um estágio e me receberam de braços abertos.

Nishioka, Andre Heiji. **Estudo e Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Lenz.** 2017. 56p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil

## RESUMO

Com a atual preocupação na diminuição da dependência por combustíveis fósseis e a questão ambiental, a busca por energias renováveis têm se tornado cada vez maior. Neste contexto, o presente trabalho têm por objetivo o estudo e projeto de uma turbina eólica do tipo Lenz escolhida devido à algumas de suas características como possibilidade de operação em ventos turbulentos e o baixo custo de confecção.

O estudo se deu na descrição dos recursos eólicos, aerogeradores existentes e equacionamentos bem como nos trabalhos feitos sobre o tema até então. Após o estudo a turbina Lenz foi projetada, desenhada no software de CAD Catia®, construída e posteriormente testada em túnel de vento. Por fim os resultados apresentaram um rendimento mecânico de aproximadamente 28%, alcançando 72 watts de potência mecânica e 14 Watts de Potência Elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Turbina Lenz, Estudo, Projeto, Experimento.*

Nishioka, Andre Heiji. **Study and design of a Lenz vertical axis wind turbine.**  
2017. 56p. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

## ABSTRACT

With the current concern about reducing dependence on fossil fuels and the environmental issue, the search for renewable energies has become increasingly larger. In this context, the present work has the objective of the study and design of a Lenz wind turbine chosen due to some of its characteristics such as possibility of operation in turbulent winds and the low cost of production. The study was carried out in the description of the wind resources, existing wind turbines and equations as well as in the works done on the subject until then. After the study the Lenz turbine was drawn, designed in CAD software Catia®, built and later tested in wind tunnel. Finally, the results presented a mechanical efficiency of approximately 28%, reaching 72 watts of mechanical power and 14 Watts of electric Power.

**KEYWORDS:**      *Lenz      Turbine,      Study,      Design,      Experiment.*

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	Recursos eólicos e aerogeradores .....	16
2.1	Formação dos Ventos .....	16
2.2	Variação de Intensidade Dos Ventos .....	17
2.3	Princípio de Funcionamento das Turbinas Eólicas .....	18
2.4	Tipos de Turbinas Eólicas .....	19
2.4.1	Turbinas de Eixo Horizontal .....	20
2.4.2	Turbinas de Eixo Vertical .....	20
2.5	Aplicação de Sistemas Eólicos .....	23
3	Revisão Bibliográfica .....	24
4	Modelagem Matemática.....	26
5	Desenvolvimento técnico .....	31
5.1	Equipamentos Utilizados e Posicionamentos.....	31
5.2	Procedimento Experimental .....	33
5.3	Cálculos Utilizados no Experimento.....	34
5.4	Resultados Experimentais.....	36
6	Conclusões .....	41
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
	Anexo 1 - Fabricação Do Aerogerador (Sistema Mecânico) .....	45
	Anexo 2 – Equipamentos utilizados .....	52
	Anexo 3 – Código MATLAB®.....	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Oferta Interna de Energia Elétrica.....	12
Figura 1-2 – Capacidade total instalada da energia eólica brasileira.....	13
Figura 1-3 – Mapa da média da magnitude dos ventos no Brasil.....	14
Figura 1-4 – Capacidade de Energia Eólica Instalada por Estado em Megawatts (MW) no ano de 2015.....	14
Figura 2-1 – Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.....	16
Figura 2-2 – Formação das Brisas Marítimas(Esq.) e Terrestres(Dir.).....	17
Figura 2-3 – Formação das Brisas de Vale(Esq.) e Brisas de Montanha(Dir.).....	17
Figura 2-4 – Esquema de constituintes de uma Turbina Eólica.....	19
Figura 2-5 – Exemplo de Turbina de Eixo Horizontal (Esq.) e Turbina de Eixo Vertical (Dir.).....	19
Figura 2-6 – Tipos de Turbinas de Eixo Horizontal em relação à orientação de recebimento dos ventos:Upwind(Esq.) e Downwind (Dir.).....	20
Figura 2-7 – Turbina Eólica de Eixo Vertical de Darrieus.....	21
Figura 2-8 – Turbina Eólica de Savonius.....	22
Figura 2-9 – Exemplo de Turbina Lenz.....	22
Figura 3-1 – Coeficiente de potência em função da velocidade específica da Turbina Eólica tipo Lenz testada.....	24
Figura 4-1 – Condição de um fluxo de ar passando através de uma Turbina para extração de energia mecânica.....	26
Figura 4-2 – Coeficiente de Potência em função da razão de velocidade depois e antes do conversor de energia mecânica.....	27
Figura 4-3 – Relação entre o coeficiente de potência e a razão de velocidades de diferentes tipos de aerogeradores.....	29
Figura 4-4 - Decomposição das Forças Atuantes na Turbina Lenz.....	30
Figura 5-1 – Modelo em CAD do Túnel de Vento utilizado nos ensaios.....	31
Figura 5-2 – Foto do protótipo final.....	32
Figura 5-3 – Foto da Bancada Experimental.....	33
Figura 5-4 – Esquema elétrico do gerador utilizado.....	34

Figura 5-5 – Esquema dos possíveis caminhos percorrido pela energia durante a transformação eólica.....	34
Figura 5-6 – Gráfico em 3 dimensões da potência mecânica obtida em função da resistência e rotação do protótipo.....	37
Figura 5-7 – Gráfico da potência mecânica de entrada no gerador em função da rotação do aerogerador ensaiado para diferentes valores de cargas resistivas.....	38
Figura 5-8 – Gráfico da potência mecânica de entrada no gerador em função da rotação do eixo do aerogerador para diferentes velocidades de vento.....	38
Figura 5-9 – Gráfico da Potência mecânica do eixo, elétrica de saída do gerador e eólica máxima em função da velocidade do vento testado.....	39
Figura 5-10 – Gráfico do Coeficiente de Potência Mecânica em função da velocidade do vento na saída do túnel de vento para diferentes valores de carga resistiva.....	40
Figura A-1 – Desenho em 3 dimensões do protótipo em software de CAD.....	46
Figura A-2 – Desenho 2D do aerogerador com as principais dimensões em mm.....	47
Figura A-3 – Desenho geométrico do perfil do aerofólio utilizado e suas dimensões em mm.....	48
Figura A-4 – Estrutura das pás da turbina.....	48
Figura A-5 – Disco de sustentação das pás.....	49
Figura A-6 – Montagem do eixo sobre os rolamentos e mancais. ....	49
Figura A-7 – Torre de sustentação do aerogerador.....	50
Figura A-8 – Seção de saída do túnel de vento utilizado durante o experimento.....	52
Figura A-9– Gerador de CC (Esq.) e energizador da armadura do gerador (Dir).....	53
Figura A-10 – Reostatos utilizados durante os testes.....	53
Figura A-11 – Multímetro utilizado.....	54
Figura A-12 – Tacômetro utilizado durante o experimento.....	54
Figura A-13 – Código em Matlab® utilizado nos cálculos e confecção dos gráficos.....	55

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2-1 – Fator n para diferentes tipos de superfícies.....	18
Tabela 5-1 – Resultado obtido através dos testes e de cálculos.....	36
Tabela A-1 – Descrição dos materiais utilizados e os respectivos preços.....	51
Tabela A-2- Especificações técnicas do túnel de vento utilizado.....	52
Tabela A-3- Especificações técnicas do gerador utilizado.....	53
Tabela A-4- Especificações técnicas do reostato utilizado.....	53
Tabela A-5- Especificações técnicas do multímetro utilizado.....	54
Tabela A-6- Especificações técnicas do tacômetro utilizado.....	54

## **LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS**

HAWT – Turbina Eólica de Eixo Horizontal

VAWT – Turbina Eólica de Eixo Vertical

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

LEA - Laboratório de Ensino em Engenharia Aeronáutica

## SIMBOLOGIA

$V$	Velocidade do vento estimado
$V_r$	Velocidade do vento de referência
$H$	Altura para velocidade do vento estimado
$H_r$	Altura de referência
$m$	Massa de ar
$v_w$	Velocidade da massa de ar
$A$	Área da seção perpendicular a turbina
$E_w$	Energia cinética do fluxo de ar passando pela turbina
$P_w$	Potência eólica gerada pela massa de ar atravessando a turbina
$\rho$	Densidade do ar
$v_1$	Velocidade do ar anterior a turbina
$v_2$	Velocidade do ar posterior a turbina
$P_e$	Potência mecânica do aerogerador
$c_p$	Coeficiente de potência do aerogerador
$c_{p,máx}$	Coeficiente de potência máximo
$\lambda$	Velocidade específica na ponta da pá
$u$	Velocidade da ponta de pá
$\omega$	Velocidade angular
$R$	Raio da ponta de pá
$F_N$	Força normal sobre o aerofólio
$F_T$	Força tangencial sobre o aerofólio
$T_\theta$	Torque total sobre a turbina
$C$	Distância da circunferência do eixo de rotação ao centro da pá
$P_g$	Potência elétrica de saída do gerador
$R_c$	Valor da carga resistiva
$P_d$	Potência elétrica dissipada pelo gerador
$U_g$	Voltagem de saída do gerador
$R_g$	Resistência elétrica da armadura do gerador
$P_m$	Potência mecânica do protótipo
$P_e$	Potência elétrica de entrada do gerador
$\eta_m$	Rendimento mecânico da turbina eólica

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia eólica têm seu primeiro registro por volta de 200 a.c. para o bombeamento de água e moagem de grãos. Acredita-se também que a China por volta de 2000 a.c. e o Império Babilônico por volta de 1700 a.c. também utilizavam esta energia através de cata-ventos rústicos com a finalidade de irrigação.

Durante os anos que se passaram os cata-ventos se espalharam por toda a Europa tendo como função também drenagem de terras cobertas por água, fabricação de óleo vegetal e papel. O crescimento das máquinas eólicas tiveram seu declínio com a Revolução Industrial no final do século XIX, onde as máquinas a vapor se mostraram vantajosas naquele momento.

Após o declínio dos aerogeradores em função da Revolução Industrial as turbinas eólicas voltaram a crescer pelos países a partir de 1973 na tentativa de se obter uma fonte diversificada de energia, diminuindo a dependência do petróleo.

Outro fator importante que vêm contribuindo para o desenvolvimento da energia eólica é a preocupação com o meio ambiente principalmente devido ao uso de energia gerada através de combustíveis fósseis, sendo essa fonte de energia emissora de gases poluentes e também o principal causador do aquecimento global.

No Brasil, devido a abundância em recursos hídricos e o custo menor para produção de energia em comparação com outras fontes renováveis como solar e eólica, o país possui as Hidroelétricas como principal fonte na matriz energética para produção de energia elétrica (Fig.1-1).

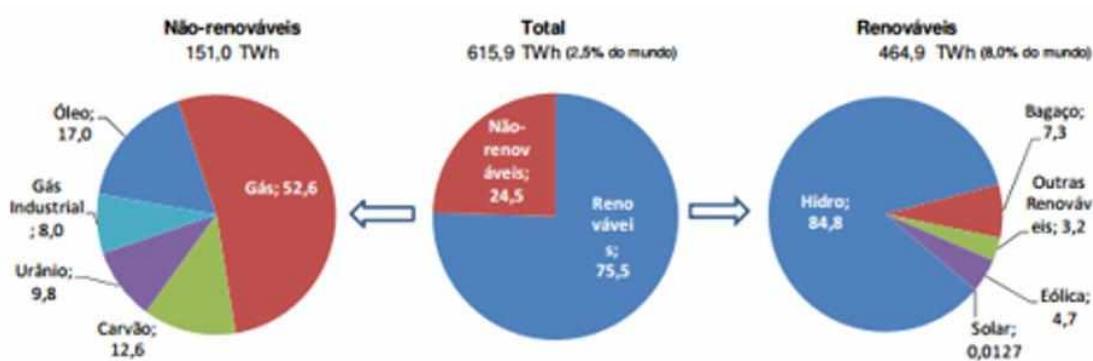


Figura 1-1 – Oferta Interna de Energia Elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

A crise hídrica que o Brasil enfrentou nos últimos anos (2014/2015) ligou o alerta para a necessidade de diversificação da matriz energética elétrica, o país

possui grande potencial para a produção energética através de usinas solares e eólicas. Se comparadas, a energia solar possui custo mais elevado em relação à implantação e distribuição em relação à energia eólica. Além disso, as termoelétricas que foram a solução para a falta de energia são poluentes e possuem um custo maior se comparado com os outros métodos.

O Brasil possui um dos melhores recursos eólicos do mundo segundo a Global Wind Energy Council (2016), em uma pesquisa realizada em 2015. Ainda segundo a fonte pesquisada nos últimos anos houve um expressivo aumento na produção de energia eólica (Fig. 1-2) , colocando o Brasil entre os 10 países que mais geram energia eólica.

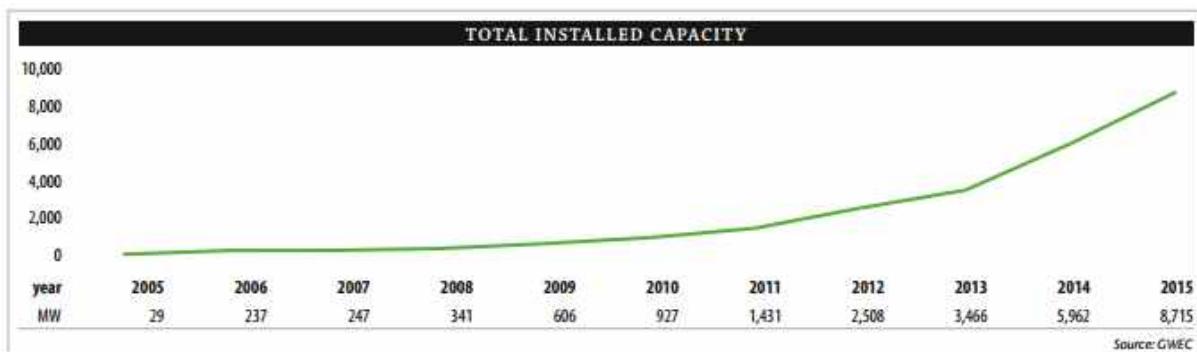
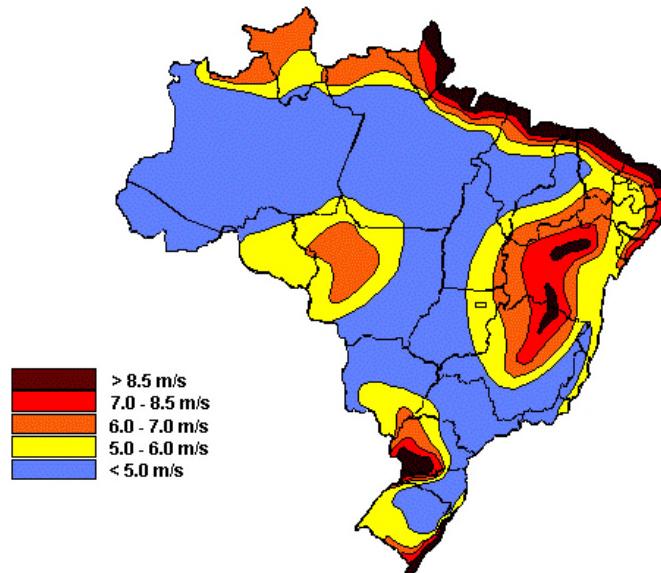


Figura 1-2 – Capacidade total instalada da energia eólica brasileira (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2016).

A região Nordeste é onde se concentra o maior potencial eólico do país e o maior número de turbinas instaladas devido principalmente a latitude que condiciona os ventos alísios, soma-se a a grande cobertura oceânica (livre de obstáculos) e as brisas marítimas como mostra a Figura 1-3.



*Figura 1-3 – Mapa da média da magnitude dos ventos no Brasil (CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA, 2008)*

Alguns outros estados também se destacam no cenário nacional como é o caso de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Na Figura 1-4, pode-se observar a capacidade instalada em Megawatts (MW) e o número de parques eólicos de acordo com cada Estado no ano de 2015.

Installed capacity by state at the end of 2015 (MW)		
State	Installed capacity	Number of wind farms
Bahia	1,618.9	62
Ceará	1,304.3	47
Paraíba	69.0	13
Pernambuco	377.3	19
Piauí	705.1	25
Paraná	2.5	1
Rio de Janeiro	28.1	1
Rio Grande do Norte	2,779.6	100
Rio Grande do Sul	1,557.7	66
Santa Catarina	2,385	14
Sergipe	34.5	1
<b>Total</b>	<b>8,715.4</b>	<b>349</b>

*Figura 1-4 - Capacidade de Energia Eólica Instalada por Estado em Megawatts (MW) no ano de 2015 (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2016).*

Dado o contexto atual pela busca por fontes renováveis de energia e o alto potencial eólico brasileiro o presente trabalho propõe o estudo de uma turbina de eixo vertical do tipo Lenz. A escolha do modelo de aerogerador deu-se em função de algumas de suas características como por exemplo a possibilidade de operação em áreas urbanas, que é um mercado ainda pouco explorado.

A partir da escolha do tipo de turbina eólica, foram definidos alguns objetivos para o presente trabalho:

- Dimensionamento do protótipo.
- Desenho do modelo em 3 dimensões em um software de CAD.
- Construção do aerogerador.
- Experimento em túnel de vento afim de extrair dados como potência mecânica e comportamento da turbina eólica estudada.
- Análise dos dados com o objetivo de encontrar erros e possíveis melhorias.

## 2 RECURSOS EÓLICOS E AEROGERADORES

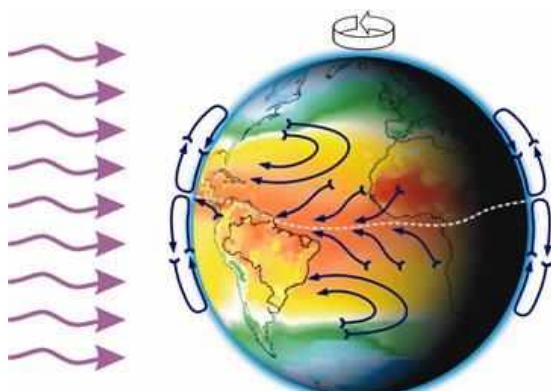
Para um maior entendimento sobre a energia eólica e os aerogeradores o tópico apresentado descreve o comportamento dos ventos, o princípio de funcionamento das turbinas bem como os tipos e aplicações.

### 2.1 Formação dos Ventos

Os ventos possuem sua formação causada pela rotação e aquecimento da Terra e a influência de efeitos térmicos. Em escala global, os ventos são resultantes das variações de propriedades do ar como pressão, temperatura e densidade derivadas do aquecimento desigual da Terra proporcionados pela distribuição geográfica, diária e anual.

Próximo à linha do equador a radiação solar é maior e consequentemente as temperaturas das massas de ar são maiores alcançando altitudes maiores devido à densidade (ventos contra - alísios). Por outro lado, a temperatura próximo aos polos é menor devido à incidência de raios solares formando massas de ar frias e de baixa altitude (ventos alísios). A circulação entre as massas de ar descritas são da forma que o ar frio mais denso tende seguir para à linha do equador e o ar quente em altitudes maiores para os pólos.

Outro fator importante é a rotação da Terra (Força de Coriolis) que tende a girar a massa de ar fria mais próxima da superfície da Terra para o Oeste e a massa de ar quente para o Leste. A ação das massas de ar descritas estão exemplificadas na Figura 2-1.



*Figura 2-1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO, 2008).*

Em uma escala menor, os ventos locais são formados principalmente pelas brisas marítimas e terrestres e brisas de vale e montanha. As brisas marítimas são formadas em regiões costeiras devido ao fato de a radiação solar ser mais absorvida pela terra do que pela água, formando uma corrente de ar que sopra do mar para a terra, já as brisas terrestres ocorrem de maneira inversa.

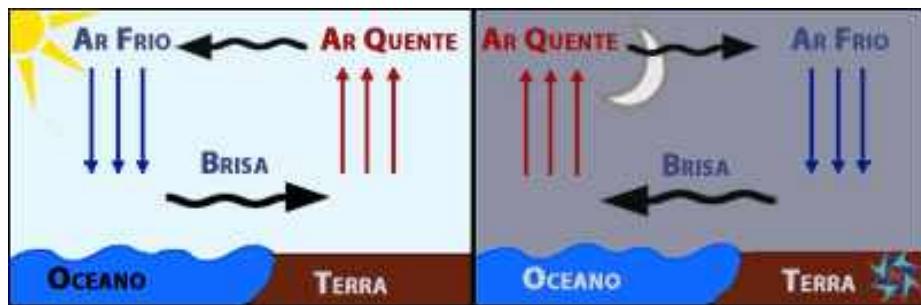


Figura 2-2 – Formação das Brisas Marítimas(Esq.) e Terrestres(Dir.) (IPMA).

As brisas de vale ocorrem devido ao aquecimento do ar na montanha durante o dia o que faz com que o ar quente suba e dê lugar ao ar frio das montanhas. Durante a noite o fluxo se inverte e ocorrem as brisas de montanha.

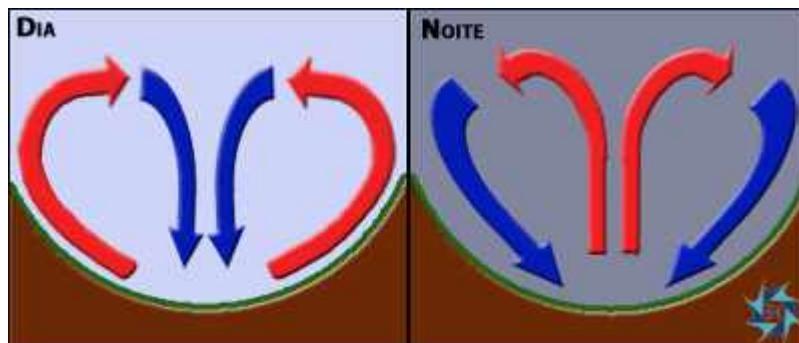


Figura 2-3 – Formação das Brisas de Vale(Esq.) e Brisas de Montanha(Dir.) (IPMA).

## 2.2 Variação de Intensidade Dos Ventos

As variações de intensidade e direção dos ventos são divididas em 2 fatores: as variações temporais e as espaciais. As variações temporais são divididas em variações interanuais, sazonais, diárias e de curta duração. Entender cada tipo de variação é de suma importância tanto nas variações interanuais onde contratos entre empresas são firmados como em variações de curta duração que podem ocorrer em décimos de segundo e influenciam na fadiga da estrutura.

As variações espaciais se dão em função principalmente de obstáculos próximos dos locais de medição, a rugosidade do terreno como por exemplo o tipo de vegetação e a orografia que é a existência de montanhas e vales. Este tipo de variação influencia no perfil vertical de velocidade na camada limite (aproximadamente 1 km da superfície da terra) e para a estimativa de intensidade dos ventos são propostos alguns modelos matemáticos.

O modelo mais simples, a Lei de Potência (Eq. 2.1) estima a velocidade do vento ( $V$ ) para certa altura ( $H$ ) em função da velocidade e a altura de referência ( $V_r, H_r$ ) em função da característica do terreno ( $n$ ).

$$V = V_r \left( \frac{H}{H_r} \right)^n \quad (2.1)$$

O expoente da lei de potência é dado em função da rugosidade do terreno, a Tabela 2-1 mostra alguns valores de  $n$  em função do tipo de terreno.

Descrição do Terreno	Fator n
Superfície Lisa, Lago ou Oceano	0,1
Grama baixa	0,14
Vegetação rasteira (até 0,3 m), árvores ocasionais	0,16
Arbustos, árvores ocasionais	0,20
Árvores construções ocasionais	0,22-0,24
Áreas residenciais	0,28-0,40

Tabela 2-1 – Fator  $n$  para diferentes tipos de superfícies (Amaral, 2011).

### 2.3 Princípio de Funcionamento das Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas possuem como objetivo a transformação da energia contida nos ventos em energia cinética através das pás conforme a ação das forças de arrasto e sustentação e a posterior conversão em energia elétrica ou bombeamento de água.

Interligado as pás está o eixo central que rotacionará e mais adiante a caixa de transmissão responsável por aumentar a velocidade de rotação do eixo. O gerador elétrico converterá esta energia mecânica em energia elétrica que será

enviada através de cabos para a rede elétrica ou banco de baterias, conforme esquematizado na Figura 2-4.

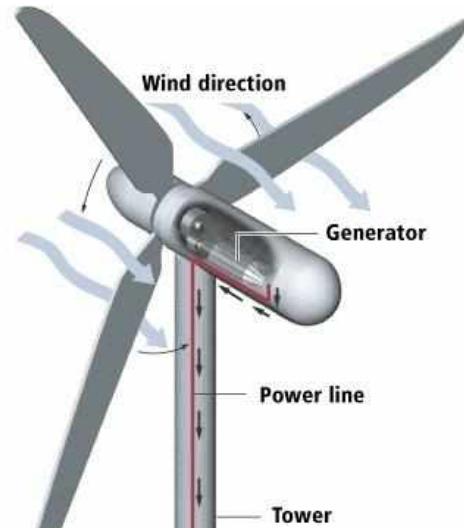


Figura 2-4 – Esquema de constituintes de uma Turbina Eólica (PORTAL ENERGIA, 2016).

## 2.4 Tipos de Turbinas Eólicas

Durante anos de estudos e tentativas de transformação da energia contida no fluxo de ar em energia mecânica vários modelos de turbinas e outros dispositivos foram criados. A principal diferenciação entre os principais modelos inventados aconteceu em relação ao eixo de rotação do aerogerador sendo classificados em turbinas de eixo horizontal (HAWTs) e de eixo vertical (VAWTs) como mostrado na Figura 2-5 a seguir.

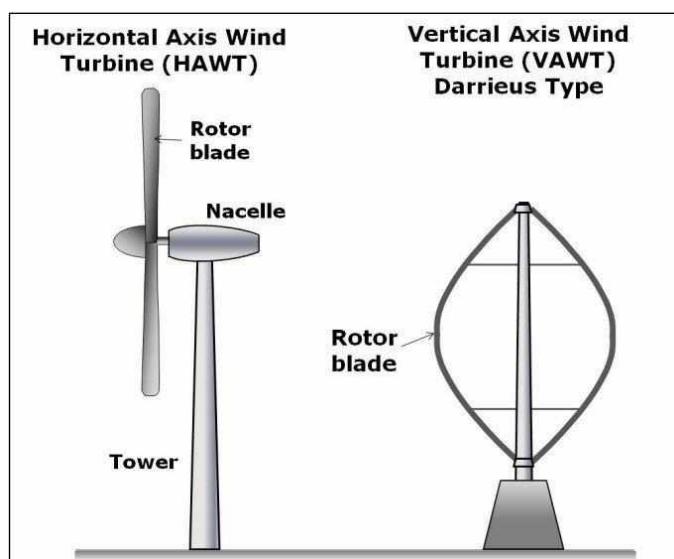
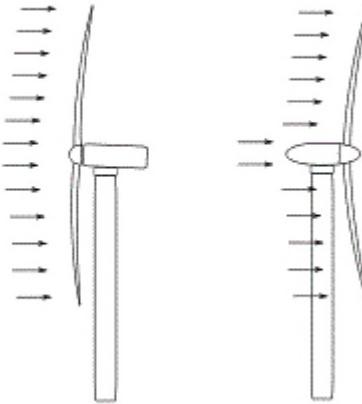


Figura 2-5 – Exemplo de Turbina de Eixo Horizontal (Esq.) e Turbina de Eixo Vertical (Dir.) (BU COLLEGE OF ENGINEERING)

#### 2.4.1 Turbinas de Eixo Horizontal

Segundo (DOS SANTOS, 2007), atualmente as HAWTs são as mais utilizadas principalmente em instalações de grandes potências para a produção de energia elétrica, além disso elas precisam estar perpendiculares à direção do vento para obterem o máximo de energia. Devido ao fato de suas pás sempre se moverem perpendicular ao escoamento do ar, sua eficiência energética é maior considerando que a turbina recebe a energia de toda sua rotação, ao contrário das VAWTs que envolvem forças contrárias ao movimento de rotação. Outra vantagem que este tipo de turbina possui é a maior velocidade dos ventos devido à altura da torre de sustentação.

Dentre as turbinas de eixo horizontal temos ainda a classificação em relação à orientação de recebimento dos ventos, podendo ser ela Upwind e Downwind como ilustrado na Figura 2-6 . Como relação à diferença entre estes tipos de turbinas, As turbinas upwind necessitam de um motor para orientação dos ventos, porém apresentam menor interferência aerodinâmica da torre, enquanto as downwind são autoguiáveis mas sofrem estas perdas devido ao escoamento anterior.



*Figura 2-6 – Tipos de Turbinas de Eixo Horizontal em relação à orientação de recebimento dos ventos: Upwind (Esq.) e Downwind (Dir.). (Modificado WIKIPEDIA, 2016)*

#### 2.4.2 Turbinas de Eixo Vertical

O eixo de rotação das turbinas de eixo vertical é perpendicular à direção dos ventos. De acordo com (MENEZES, 2012), uma das vantagens neste tipo de turbina é a capacidade de operar em baixas velocidades e com ventos turbulentos além de

não necessitar de sistemas de orientação do eixo como nas HAWTs, por isso elas são vantajosas no caso de ambientes urbanos e locais com regiões de ventos fortes ou com rajadas de ventos.

Ainda segundo a autora, outro ponto importante é que o gerador e outros componentes primários podem ser instalados próximos ao solo, facilitando a manutenção. Por outro lado, uma das grandes desvantagens que as VAWTs possuem é a baixa eficiência energética se comparada com as HAWTs.

Um dos principais modelos de eixo vertical é o rotor de Darrieus (Fig.2-7), modelo movido predominantemente pelas forças de sustentação e caracterizado pela alta rotação, com rendimento de aproximadamente 30% de acordo com CARMO(2012, apud MATTE, 2014). Sua grande limitação é a capacidade de partida do rotor.



*Figura 2-7 – Turbina Eólica de Eixo Vertical de Darrieus (WIKIPEDIA, 2014).*

O modelo proposto por Savonius (Fig. 2-8) consiste de duas pás com o formato cilíndrico ou elíptico dispostas lado a lado porém com a parte convexa para fora do eixo de rotação. O movimento de rotação é dado basicamente pelas forças de arrasto gerada predominantemente pela parte côncava em relação a parte convexa. Alguns dispositivos como deflectores podem ser usados para aumentar a performance do rotor direcionando o fluxo de ar para a parte côncava.

Segundo (MENEZES, 2012), pelo fato da força de movimento ser puramente de arrasto, o coeficiente de potência deste tipo de rotor é baixa, em contrapartida este tipo de turbina possui alto torque sendo preferencialmente utilizado em aplicações de bombeamento de água.



*Figura 2-8 – Turbina Eólica de Savonius (ELETRONICKITS).*

Baseado no formato e posição das pás do modelo de Darrieus H e incluindo o fato de uma das faces do aerofólio não ser fechada do mesmo modo que a turbina de Savonius, Edwin Lenz propôs seu modelo.

Para Menezes(2012, p.17) “a vantagem da pá não ser totalmente fechada se encontra durante a partida da turbina, pois possibilita que a turbina inicie seu movimento em baixas velocidades de vento”.

O princípio de funcionamento do modelo de Lenz (Fig. 2-9) se baseia nas forças de arrasto e sustentação, proporcionando a auto-partida juntamente com maiores rendimentos se comparado com aerogeradores movidos somente através do arrasto.



*Figura 2-9 – Exemplo de Turbina Lenz (LENZ, Edwin)*

Resumindo, a geometria da turbina de Darrieus é composta por aerofólios de seção fechada enquanto a turbina de Savonius por cilindros abertos dispostos paralelamente com as partes abertas para fora do eixo de rotação e por fim o aerogerador de Lenz por aerofólios parcialmente abertos.

## 2.5 Aplicação de Sistemas Eólicos

Os sistemas eólicos com a finalidade de produção de energia elétrica possuem 3 tipos distintos de aplicações sendo sistema isolados ou independentes, híbridos e interligados à rede elétrica.

Nos sistemas isolados ou independentes o aerogerador é o único responsável pela geração de energia elétrica. Devido à alta variação da intensidade dos ventos durante o dia e estações do ano, faz-se necessário o uso de baterias para que haja armazenamento da energia em períodos em que o consumo é inferior à produção e para que não ocorra a falta quando o consumo for superior.

Os sistemas híbridos são aqueles nos quais a energia eólica trabalha juntamente com outra fonte de energia como por exemplo solar e à combustão. Este tipo de sistema requer uma alta complexidade no controle para que haja uma otimização no uso de cada fonte.

Por fim existem os sistemas interligados à rede elétrica que são caracterizados pela geração de energia elétrica em grande escala juntamente com outras fontes como por exemplo hidroelétricas ou termoelétricas. Outro ponto importante ressaltado por Menezes (2012) é que este tipo de sistema não necessita de baterias mas de um rígido controle para que não haja perturbações na rede elétrica.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora o design da turbina eólica de Edwin Lenz seja recente, alguns trabalhos acadêmicos já abordaram o assunto através de cálculos teóricos, experimentos práticos e simulações computacionais. Alguns destes trabalhos serão comentados afim de se obter um maior conhecimento sobre este tipo de aerogerador e que novas descobertas possam ser feitas.

Para a construção de uma turbina eólica pequena de eixo vertical para o suprimento de níveis entre 10 e 20 Watts de eletricidade com ventos em torno de 15 mph a Catapult Design (2010) testou um aerogerador do tipo Lenz. Os testes foram realizados em um túnel de vento da NASA com seção de testes de 7x10 pés e a turbina com dimensão de aproximadamente 3 pés de altura por 2 pés de diâmetro. Além disso, o experimento avaliou o ângulo de ataque das pás em relação ao eixo do rotor em 3 posições diferentes 26, 9 e -8 graus e diferentes velocidades entre 10 e 25 mph.

Os resultados apresentados pela Catapult Design (2010) demonstraram que a eficiência do gerador varia consideravelmente para ventos acima de 10 mph e alcança seu valor máximo de 38% em ventos de aproximadamente 20,2 mph como mostra a Figura 3-1. Outro tópico ressaltado diz respeito à velocidade específica que atinge seu ponto máximo a aproximadamente 1.0, o que pode indicar que este tipo de aerogerador opera somente por arrasto.

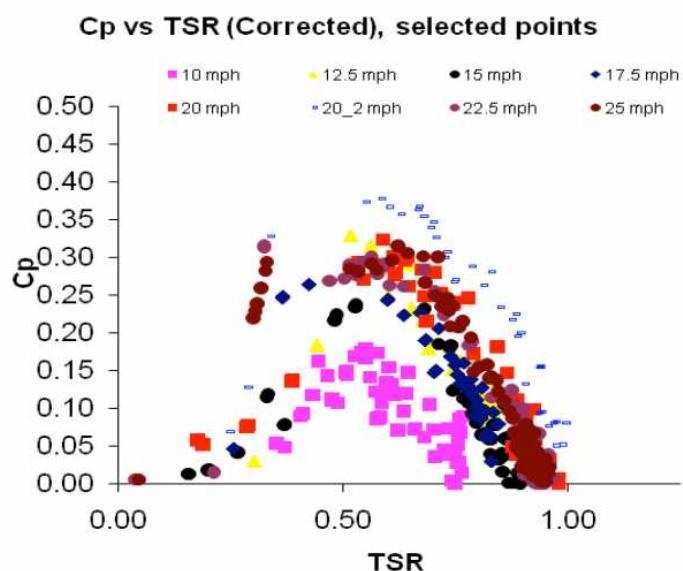


Figura 3-1 – Coeficiente de potência em função da velocidade específica da Turbina Eólica tipo Lenz testada (Catapult Design 2010).

Em relação ao ângulo de ataque dos aerofólios testados, não houve mudanças significativas no desempenho.

Menezes (2012) dimensionou em seu trabalho uma turbina Lenz com o intuito de fornecer energia elétrica para uma vila de pescadores. Para a escolha do tipo de turbina a autora levou em conta pontos importantes como a fácil construção e manutenção e o baixo custo.

Ao final do projeto desenvolvido por Menezes (2012), uma metodologia própria foi desenvolvida para o cálculo do ponto de operação nominal da turbina eólica e os resultados teóricos obtidos se mostraram satisfatórios na viabilidade de operação e execução do projeto apesar da eficiência energética do modelo não ser testado.

Outro trabalho importante foi desenvolvido por Matte (2014) no dimensionamento e simulação de um perfil aerodinâmico para um gerador de eixo vertical. Para o dimensionamento do aerogerador o autor utilizou a velocidade dos ventos retirado do site Climatempo em um período de 6 dias na cidade de Santa Rosa – RS e a média de consumo de energia elétrica de uma residência na mesma cidade.

A partir dos dados citados anteriormente o autor concluiu que são necessários 4 turbinas de 2,10 m de altura por 1,50 m de diâmetro para o fornecimento de 5,63kWh diário e em relação à simulação não houve cálculos nem observações em relação ao escoamento em torno do aerofólio.

A turbina eólica do tipo Lenz também foi abordada por Gohil (2014) na qual o autor dimensiona a potência gerada pelo aerogerador em função da média de eficiência das turbinas de Savonius (40%) e Darrieus (30%), porém nenhum estudo mais aprofundado sobre o tema foi feito.

## 4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Esta seção apresenta as principais equações para a análise do comportamento do aerogerador como por exemplo a potência mecânica e o coeficiente de potência. Além disso o capítulo apresenta dados importantes como a máxima extração eólica e forças atuantes nas pás da turbina eólica.

O modelamento apresentado adiante feito por Albert Betz entre 1922 e 1925 foi capaz de mostrar através de escritas publicadas que aplicando leis da física elementar é possível determinar o máximo de energia mecânica que pode ser extraída através de uma corrente de ar passando por um disco atuador.

Embora a teoria criada por Betz considera que não ocorrem perdas por arrasto e portanto algumas simplificações, ela é bastante usada para o cálculo de estimativas de potência.

O principal parâmetro no dimensionamento de uma turbina é o seu potencial eólico, para seu cálculo considera-se uma massa de ar ( $m$ ) movendo-se com velocidade ( $v_w$ ) através de uma secção perpendicular de área ( $A$ ) de uma Turbina Eólica como esquematizado na Figura 4-1.

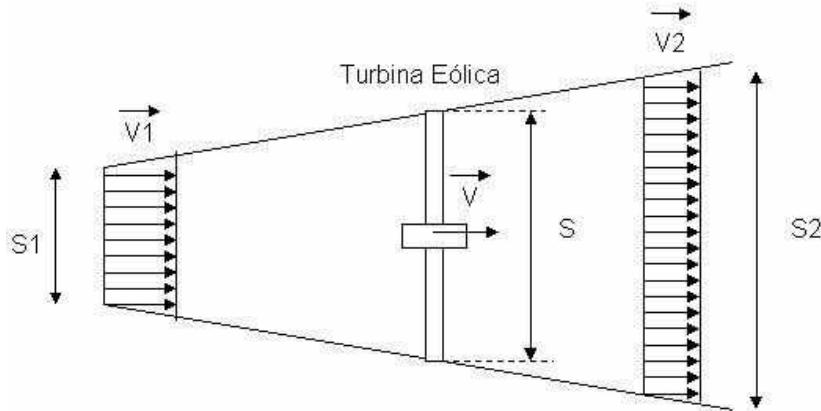


Figura 4-1 – Condição de um fluxo de ar passando através de uma Turbina para extração de energia mecânica (BRIZON; SCHILD, 2017).

A energia cinética do fluxo de ar ( $E_w$ ) é dada por:

$$E_w = \frac{mv_w^2}{2} \quad (4.1)$$

Considerando a potência gerada ( $P_w$ ) pela massa de ar descrita acima como sendo a derivada da energia e ( $\rho$ ) como a densidade do ar, tem-se:

$$P_w = \rho \cdot A \cdot v_w^3 \quad (4.2)$$

A partir da equação 4.2 é possível notar a principal influência na potência eólica dada pela velocidade dos ventos, assim como a proporção linear com a área varrida pelas pás e a densidade do ar, sendo esta última dependente das condições atmosféricas.

Para o cálculo da potência mecânica ( $P_e$ ) gerada pelo aerogerador usa-se a diferença de energia do fluxo de ar antes e depois de passar pela turbina em função de suas velocidades ( $v_1$  e  $v_2$ ) como mostra a equação 4.3.

$$P_e = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (4.3)$$

O coeficiente de potência da Turbina ( $c_p$ ) será dado pela razão entre a potência gerada pelo aerogerador e a potência da massa de ar sem geração de energia mecânica, como ilustra a equação 4.4 seguinte:

$$c_p = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (4.4)$$

O gráfico do coeficiente de potência gerado pela turbina em função da relação entre as velocidades  $v_2$  e  $v_1$ :

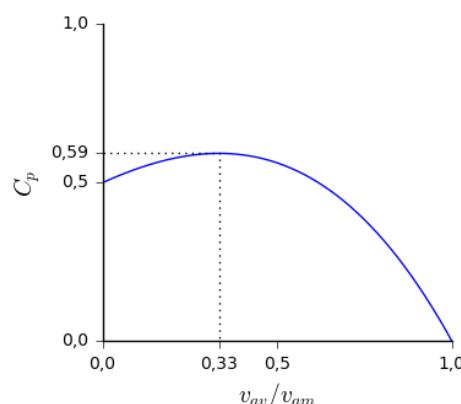


Figura 4-2 – Coeficiente de Potência em função da razão de velocidade depois e antes do conversor de energia mecânica (AABU, 2016).

Através de soluções analíticas o coeficiente de potência encontrado por Betz é máximo quando:

$$\nu_2 = \frac{1}{3} \nu_1 \quad (4.5)$$

e portanto o coeficiente de potência máximo ( $c_{p,\max}$ ) é:

$$c_{p,\max} = 0.593 \quad (4.6)$$

O valor da potência máxima que corresponde a 59.3% refere-se a um valor teórico ideal chamado de Limite de Betz. Na prática deve-se levar em conta perdas mecânicas, elétricas e a eficiência do gerador.

Embora a Teoria de Betz determine o valor máximo da extração de potência de um aerogerador ela não considera o design da turbina utilizada. Entender quais forças aerodinâmicas agem em um tipo de turbina é de fundamental importância uma vez que os valores de coeficiente de potência real variam fortemente em dependência com o design baseado em arrasto ou sustentação Hau(2013, p.84).

Outro parâmetro muito importante na caracterização do aerogerador é a velocidade específica na ponta da pá ( $\lambda$ ) e calculado através da equação 4.8:

$$\lambda = \frac{u}{v_w} \quad (4.7)$$

Sendo que a velocidade da ponta de pá ( $u$ ) é dada pela velocidade angular ( $\omega$ ) vezes o raio da ponta da pá ( $R$ ) como descrito na equação 4.8:

$$u = \omega \cdot R \quad (4.8)$$

Supondo um fluxo de ar com velocidade constante e considerando as pás da turbina com velocidade baixa e consequentemente a velocidade específica baixa, não haverá um bom aproveitamento de energia. Em contrapartida, caso a velocidade específica da turbina seja muito alta, o fluxo de ar se torna muito

turbulento e portanto há grande perda de energia resultando em um baixo coeficiente de potência.

Segundo Carvalho (2013, apud Menezes 2012) turbinas eólicas de grande porte apresentam baixa velocidade angular, enquanto as de pequeno porte apresentam alta velocidade angular.

O gráfico a seguir da Figura 4-3 representa o comportamento típico do coeficiente de potência de algumas turbinas em função da velocidade específica.

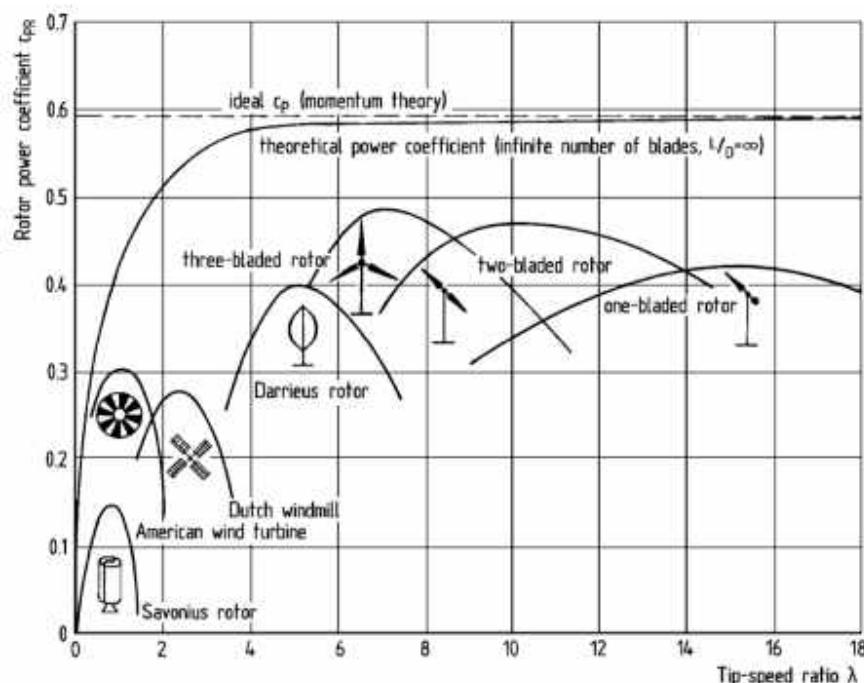


Figura 4-3 - Relação entre o coeficiente de potência e a razão de velocidades de diferentes tipos de aerogeradores (AABU, 2016).

Para o detalhamento do torque resultante na turbina de Lenz Gohil (2010) faz uma decomposição de forças atuantes nos aerofólios da seguinte maneira:

Considerando a resultante da força agindo sobre um aerofólio como sendo a decomposição da força normal  $F_N$  e tangencial  $F_T$ , sabe-se que somente a força normal à linha de rotação das pás irá gerar movimento no aerogerador. Sendo assim o torque total sobre a turbina  $T_\theta$  será dado pela soma nas  $n$  pás das forças normais vezes a metade da circunferência do eixo de rotação  $C$  até o centro de força sobre o aerofólio (Eq. 4.9).

$$T_\theta = \sum_{N=1}^n F_N \cdot \frac{C}{2} \quad (4.9)$$

Onde a decomposição da força  $F_N$  é dado pela seguinte fórmula:

$$F_{N_n} = \pm x_n \cos \theta \pm y_n \sin \theta \quad (4.10)$$

A Figura 4-4 adiante exemplifica a decomposição das forças.

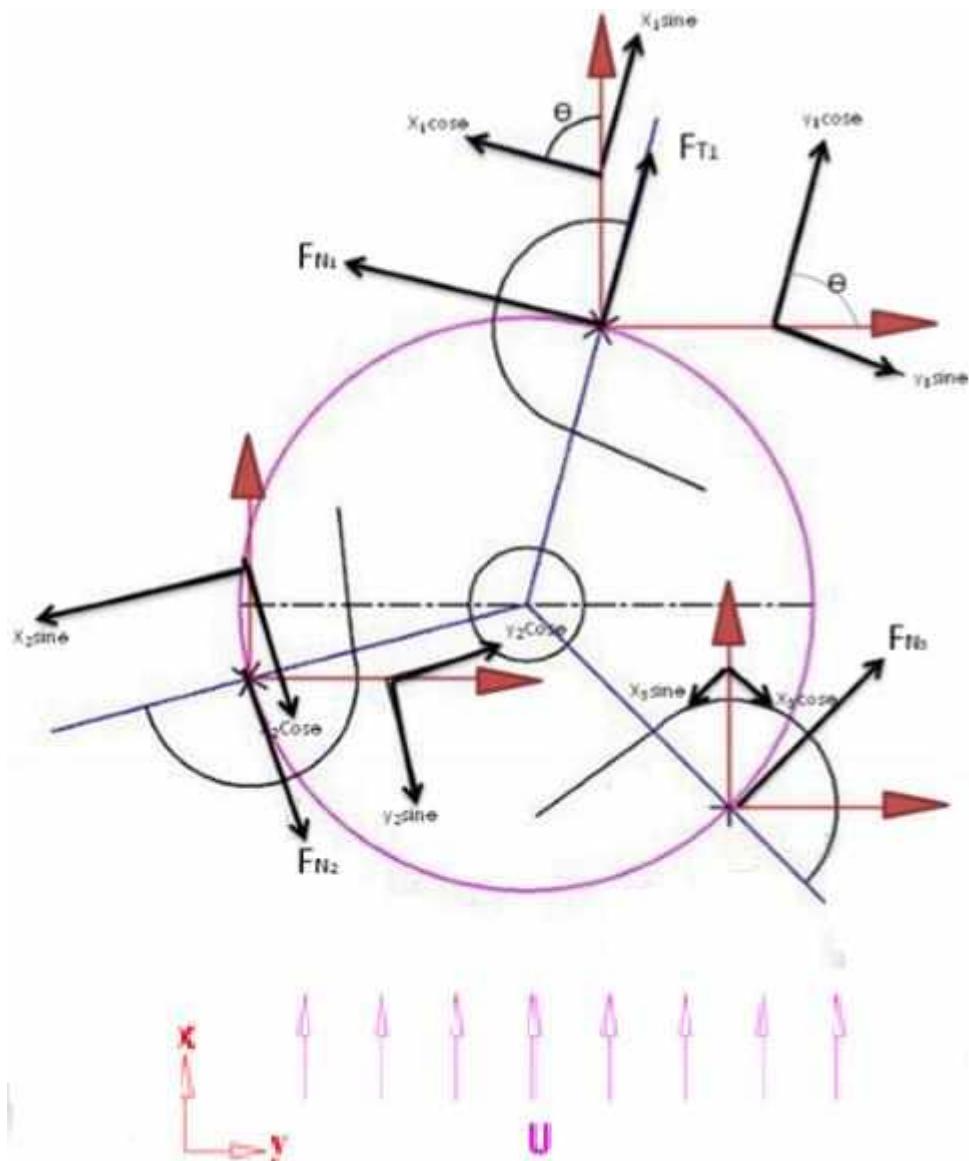


Figura 4-4- Decomposição das Forças Atuantes na Turbina Lenz.

## 5 DESENVOLVIMENTO TÉCNICO

Este capítulo apresentará o dimensionamento do protótipo, os equipamentos utilizados nos ensaios bem como seus posicionamentos, os passos seguidos para a realização do experimento, os cálculos utilizados e os resultados apresentados.

### 5.1 Equipamentos Utilizados e Posicionamentos.

O dimensionamento da turbina foi feito a partir das dimensões da seção de testes do túnel de vento disponível no Laboratório de Ensino em Engenharia Aeronáutica (LEA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como mostra a Figura 5-1 .

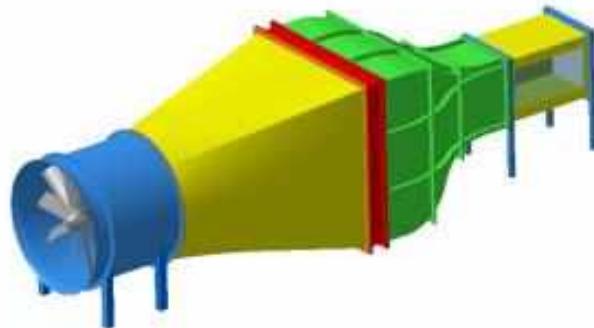


Figura 5-1 – Modelo em CAD do Túnel de Vento utilizado nos ensaios.

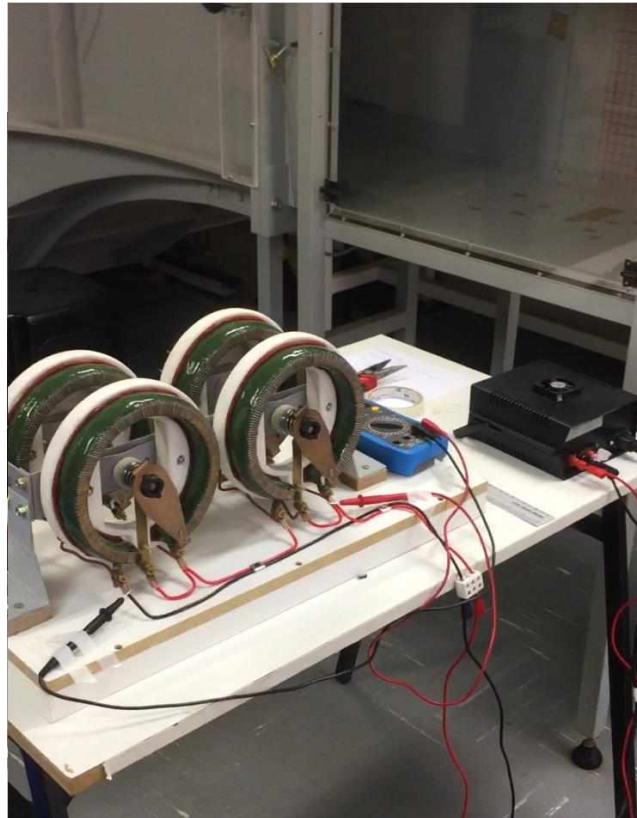
O aerogerador foi projetado para que suas dimensões não ultrapassassem as medidas da saída do túnel que são 60 cm x 60 cm, portanto o protótipo final (Fig. 5-2) possuiu 60 cm de altura e 45 cm de diâmetro e sua montagem está descrita no Anexo 1.



Figura 5-2 – Foto do protótipo final.

Após a montagem, a turbina eólica foi posicionada a uma distância de 1 corda de medida da saída do túnel de vento ou seja aproximadamente 19 cm.

Uma bancada (Fig. 5-3) foi utilizada para o suporte dos equipamentos utilizados e foi posicionada de maneira que não houvesse interferência do fluxo de ar entre o túnel de vento e a turbina. Após o posicionamento da bancada os equipamentos utilizados durante o ensaio foram colocados sobre a bancada como a carga resistiva (Reostatos ligados em série), o tacômetro para a medição da rotação do aerogerador e o multímetro para a leitura das voltagens e resistências do sistema elétrico. As especificações de todos os equipamentos encontram-se no Anexo 2.



*Figura 5-3 – Foto da Bancada Experimental.*

## 5.2 Procedimento Experimental

A partir da montagem e posicionamento de todos os equipamentos, os testes foram definidos afim de que os dados representassem de forma mais fiel possível o comportamento da turbina sem que houvessem excessivos testes.

O experimento definido consistiu na variação do túnel de vento de 5, 6, 7, 8, 9, 10, 10,8 e 11,7 metros por segundo para cada carga resistiva ( $R_c$ ) de 14,7, 12, 9, 6 e 3 ohms , sendo assim foram feitos ao todo 40 testes.

O procedimento ocorreu da seguinte forma:

- Procedimento inicia (Feito apenas 1 vez):
  1. Medição da resistência interna do gerador.
- Procedimento intermediário (Repetido após cada procedimento final):
  2. Ajuste da velocidade na saída do túnel (Crescente)
- Procedimento final (Repetido para cada carga resistiva):
  3. Ajuste da carga resistiva (Decrescente).
  4. Medição da rotação no eixo da turbina com o tacômetro.
  5. Medição da voltagem de saída no gerador elétrico.

### 5.3 Cálculos Utilizados no Experimento

Para que fosse possível a aquisição da potência mecânica do eixo, foi necessário o uso de um gerador de corrente contínua e uma carga resistiva para drenar a energia elétrica do sistema como é esquematizado na Figura 5-4. Além disso foram utilizados alguns equipamentos de medição.

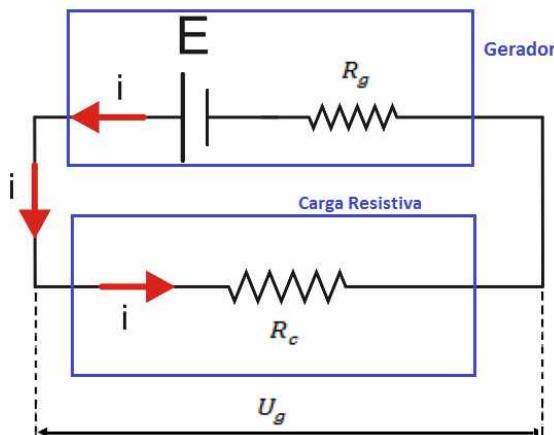


Figura 5-4 – Esquema elétrico do gerador utilizado.

A fim de facilitar o entendimento sobre as variáveis à ser calculadas e as perdas, o esquema da Figura 5-4 foi feita com o intuito de mostrar os possíveis caminhos percorridos pela energia durante a transformação da energia contida nos ventos até a transformação em energia elétrica útil.

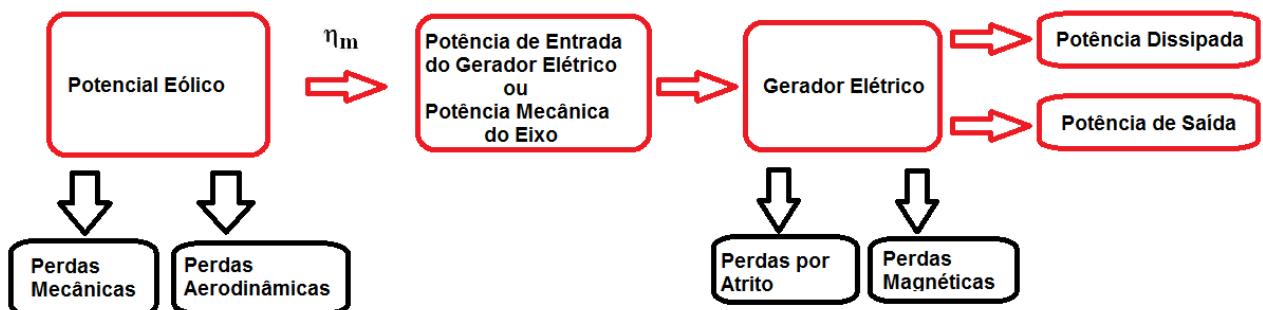


Figura 5-5 – Esquema dos possíveis caminhos percorrido pela energia durante a transformação eólica.

Para a medição dos dados primeiramente obteve-se a leitura da voltagem na saída do gerador afim de calcular a potência elétrica de saída ( $P_g$ ) do mesmo através da equação 5.1. onde  $U_g$  é a voltagem medida na saída do gerador.

$$P_g = \frac{U_g^2}{R_c} \quad (5.1)$$

A partir da potência elétrica do gerador foram feitos os cálculos para a potência elétrica dissipada ( $P_d$ ) pelo gerador através da medição da resistência elétrica de sua armadura ( $R_g$ ) e do seguinte cálculo (Eq. 5.2):

$$P_d = R_g \cdot \left( \frac{U_g}{R_c} \right)^2 \quad (5.2)$$

A potência mecânica no eixo do protótipo ( $P_m$ ) é igual a potência elétrica de entrada do gerador ( $P_e$ ) que é dado pela soma da potência elétrica de saída e a dissipada pelo gerador, como mostra a equação 5.3.

$$P_m = P_e = P_d + P_g \quad (5.3)$$

Por fim o cálculo para o rendimento mecânico da turbina eólica ( $\eta_m$ ) (Eq. 5.4) é dado pela relação entre a potência mecânica disponível no eixo e o potencial eólico ( $P_w$ ) (Eq. 4.2) para dada velocidade de saída do túnel de vento.

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_w} \quad (5.4)$$

Para a medição da rotação do aerogerador foi utilizado um tacômetro ótico posicionado próximo ao eixo de rotação. A tabela com os valores medidos e calculados neste experimento estão disponíveis no tópico seguinte.

## 5.4 Resultados Experimentais

Os resultados obtidos através da medição e de cálculos expostos na seção anterior estão mostrados na Tabela 5-1 seguinte.

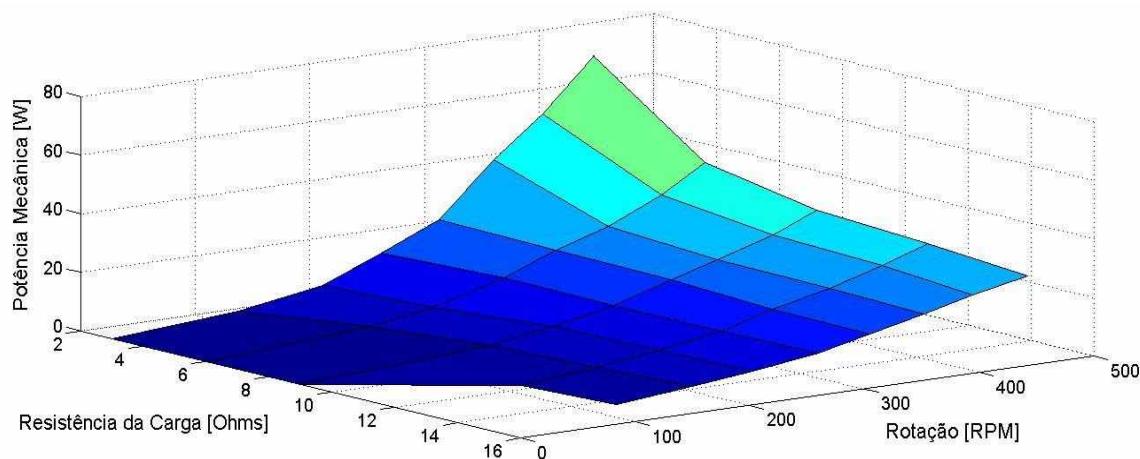
Velocidade do Vento (m/s)	Resistência [Ω]	Tensão [V]	Rotação [RPM]	Potência dissipada [W]	Potência de saída [W]	Potência de entrada [W]	Rendimento Mecânico [%]
5	14.7	3.4	119	0.7249	0.7864	1.5113	7.31%
5	12	2.9	110	0.7914	0.7008	1.4922	7.22%
5	9	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.00%
6	14.7	5.4	185	1.8285	1.9837	3.8122	10.67%
6	12	4.7	175	2.0786	1.8408	3.9194	10.97%
6	9	3.85	165	2.4796	1.6469	4.1265	11.55%
6	6	2.7	143	2.7439	1.2150	3.9589	11.08%
6	3	1.3	110	2.5444	0.5633	3.1077	8.70%
7	14.7	6.85	238	2.9423	3.1920	6.1343	10.81%
7	12	6.15	230	3.5590	3.1519	6.7109	11.83%
7	9	5.2	220	4.5234	3.0044	7.5278	13.27%
7	6	3.7	197	5.1528	2.2817	7.4344	13.11%
7	3	2.05	184	6.3271	1.4008	7.7279	13.62%
8	14.7	8.4	295	4.4245	4.8000	9.2245	10.89%
8	12	7.5	285	5.2930	4.6875	9.9805	11.79%
8	9	6.5	273	7.0677	4.6944	11.7622	13.89%
8	6	5.1	260	9.7899	4.3350	14.1249	16.68%
8	3	2.95	235	13.1021	2.9008	16.0029	18.90%
9	14.7	10	340	6.2705	6.8027	13.0733	10.84%
9	12	9.2	329	7.9644	7.0533	15.0177	12.46%
9	9	8	323	10.7062	7.1111	17.8173	14.78%
9	6	6.2	305	14.4684	6.4067	20.8751	17.32%
9	3	3.65	285	20.0578	4.4408	24.4986	20.32%
10	14.7	11.5	387	8.2928	8.9966	17.2894	10.45%
10	12	10.5	379	10.3742	9.1875	19.5617	11.83%
10	9	8.95	363	13.3999	8.9003	22.3001	13.48%
10	6	7	350	18.4431	8.1667	26.6097	16.09%
10	3	4.8	333	34.6880	7.6800	42.3680	25.62%
10.8	14.7	12.75	430	10.1935	11.0587	21.2522	10.20%
10.8	12	11.8	425	13.1021	11.6033	24.7054	11.86%
10.8	9	10	412	16.7284	11.1111	27.8395	13.36%
10.8	6	8	397	24.0889	10.6667	34.7556	16.68%
10.8	3	5.5	375	45.5431	10.0833	55.6264	26.70%
11.7	14.7	13.85	478	12.0283	13.0491	25.0774	9.47%
11.7	12	13	465	15.9024	14.0833	29.9858	11.32%
11.7	9	11.1	450	20.6111	13.6900	34.3011	12.95%
11.7	6	8.95	435	30.1497	13.3504	43.5001	16.42%
11.7	3	6.3	420	59.7555	13.2300	72.9855	27.56%

Tabela 5-1 – Resultado obtido através dos testes e de cálculos.

Para a determinação da resistência na amadura do gerador devido à alta variação para diferentes posições do eixo usou-se a mediana dos valores encontrados, obtendo-se 13,55 ohms.

A partir dos dados obtidos no experimento, foram traçados alguns gráficos afim de ilustrar o comportamento de algumas variáveis como por exemplo o rendimento mecânico e a potência mecânica do sistema.

O gráfico da potência mecânica em função das resistências utilizadas nos testes e das rotações obtidas através do tacômetro é mostrado abaixo (Fig. 5-6).



*Figura 5-6 – Gráfico em 3 dimensões da potência mecânica obtida em função da resistência e rotação do protótipo.*

Os resultados da Figura 5-6 acima mostram o aumento da potência mecânica em função do aumento no valor da rotação da turbina e da diminuição da carga resistiva, como também pode ser visto na Figura 5-7 na qual os mesmos dados foram plotados em um gráfico de duas dimensões afim de facilitar a visualização dos valores obtidos.

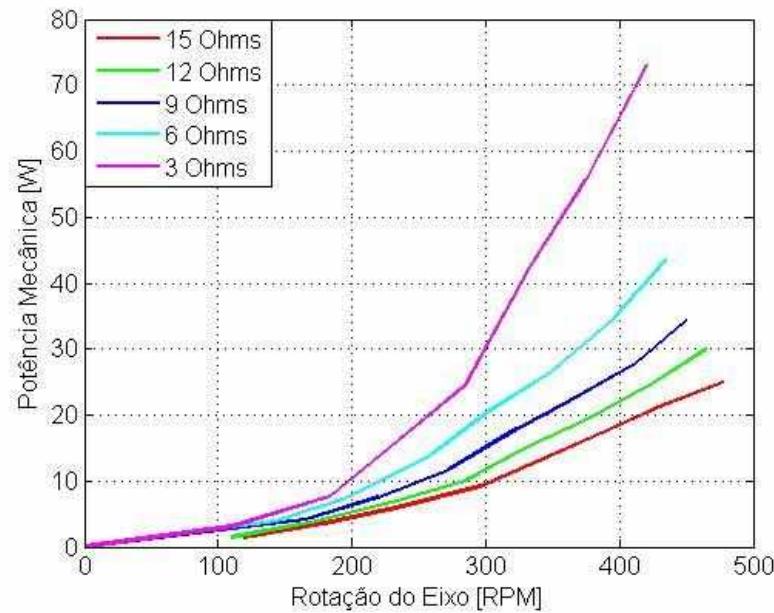


Figura 5-7 – Gráfico da potência mecânica de entrada no gerador em função da rotação do aerogerador ensaiado para diferentes valores de cargas resistivas.

Para a análise da variação da velocidade do túnel de vento na potência do eixo, foi plotado o gráfico da Figura 5-8 que mostra o aumento exponencial da potência mecânica com o aumento da velocidade do vento na saída do túnel de vento, sendo o resultado esperado uma vez que a potência eólica é cubicamente dependente da velocidade do vento como visto na equação 4.2.

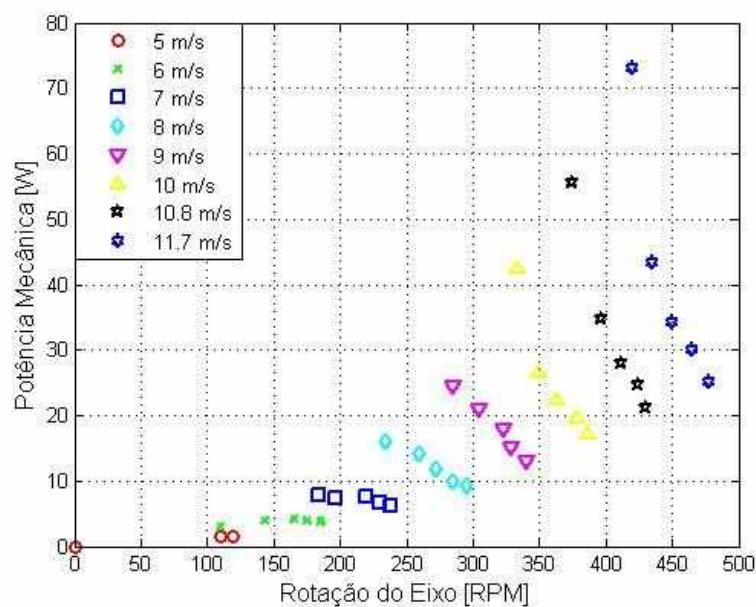


Figura 5-8 – Gráfico da potência mecânica de entrada no gerador em função da rotação do eixo do aerogerador para diferentes velocidades de vento.

Para ilustrar a potência mecânica gerada pela turbina, a potência elétrica de saída do gerador e o potencial eólico máximo foi plotado o gráfico da Figura 5-9. No gráfico é possível observar que o aerogerador alcançou valores de aproximadamente 75 Watts de potência mecânica enquanto o gerador produziu 13 Watts de potência elétrica útil. A baixa potência elétrica útil deve-se principalmente ao gerador elétrico utilizado, uma vez que o equipamento foi fabricado para operação em maiores rotações e portanto grande parte da energia produzida foi dissipada internamente.

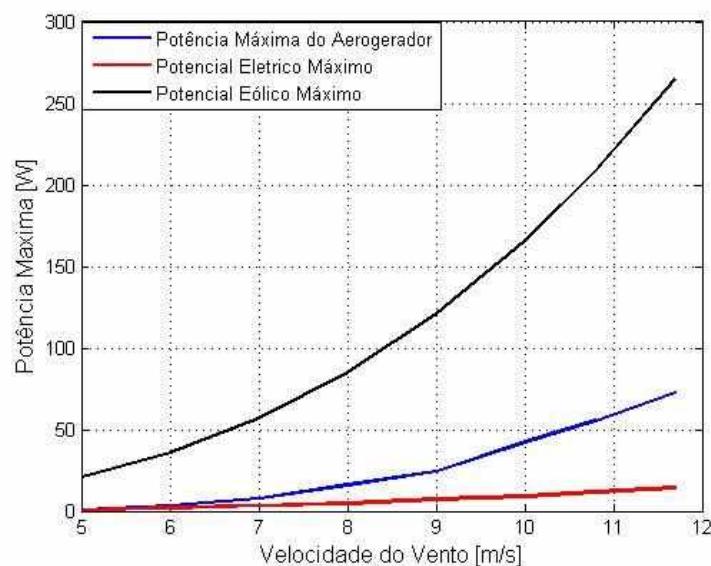
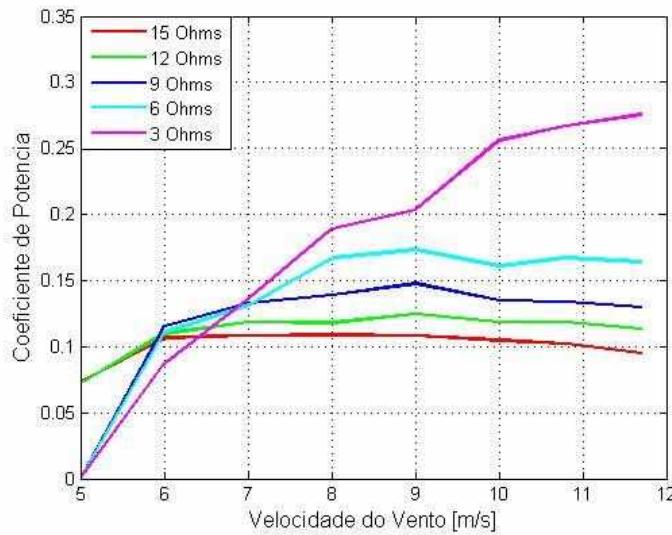


Figura 5-9 – Gráfico da Potência mecânica do eixo, elétrica de saída do gerador e eólica máxima em função da velocidade do vento testado.

Por fim, o gráfico do coeficiente de potência mecânica em função da velocidade testada é mostrado na Figura 5-10. Como pode ser visto, para todas as cargas abaixo de 15 ohms o valor máximo de coeficiente de potência ocorreu em aproximadamente 9 metros por segundo a partir deste valor ocorreram possíveis perdas na eficiência aerodinâmica em função da interação entre as pás e o escoamento do ar. Em contrapartida nos testes realizados com a carga de 15 ohms houve aumento no coeficiente de potência até o maior valor de velocidade testada (11,7 m/s) a partir daí os ensaios não foram realizados por medidas de segurança.



*Figura 5-10 – Gráfico do Coeficiente de Potência Mecânica em função da velocidade do vento na saída do túnel de vento para diferentes valores de carga resistiva.*

Para velocidades de vento na saída do túnel de 5 m/s e com cargas resistivas de 3, 6 e 9 ohms não ocorreram a partida da turbina eólica ou seja, as forças aerodinâmicas não foram capazes de vencer o atrito mecânico. Já a menor velocidade de partida foi de 4,5 m/s obtido para o sistema sem carga resistiva.

Outro ponto de destaque se refere ao máximo coeficiente de potência obtido em torno de 27%, diferente do resultado apresentado pela CatapultDesign (2010) que foi de 38%. Grande parte desta diferença de resultado deu-se provavelmente ao empenamento do eixo durante o processo de soldagem que acarretou em um certo nível de travamento nos rolamentos fixados pelos mancais. Uma possível melhoria seria a construção de um eixo torneado em material maciço de alumínio afim de evitar o empenamento e o aumento da inércia do aerogerador.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre conceitos fundamentais para o entendimento sobre a energia eólica e o projeto de uma turbina eólica do tipo Lenz tentando obter um modelo fácil de ser construído e de baixo custo. Após o desenho em software de CAD o protótipo foi confeccionado com a ajuda de técnicos e ferramentas da universidade além de empresas do setor privado. Apesar da maioria dos materiais utilizados serem facilmente encontrados como madeiras, rolamentos e aço carbono, a chapa de alumínio precisou ser comprada pela internet uma vez que são difíceis de serem encontradas em espessuras muito finas.

Para complementar o trabalho testes em túnel de vento foram feitos no Laboratório de Ensino em Engenharia Aeronáutica da UFU para a determinação de características do protótipo como a potência mecânica a velocidade de rotação e o coeficiente de potência. Os equipamentos de medição, os elétricos e o túnel de vento foram emprestados pela Universidade uma vez que são de difícil aquisição e para usos específicos.

Após a obtenção dos dados do experimento os gráficos foram plotados e os resultados comentados. Além disso foram identificados possíveis melhorias no projeto como o uso de eixo maciço de alumínio, uma vez que grande parte na perda de eficiência foi atribuído ao empenamento do tubo utilizado como eixo.

Este trabalho surgiu com o intuito de avançar nas pesquisas sobre turbinas eólicas de eixo vertical do tipo Lenz apresentando um estudo e projeto do mesmo. Assim, o trabalho atingiu seu objetivo indo além com o experimento realizado e podendo dar suporte para futuras pesquisas na área.

Como sugestão para os próximos trabalhos podem ser realizados análises em softwares de simulação numérica para determinação das características do aerofólio como por exemplo os coeficientes de sustentação e arrasto. Podem ainda, ser feitas melhorias no eixo do aerogerador afim de diminuir o empenamento e as vibrações.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOS SANTOS CUSTÓDIO, Ronaldo. **Energia eólica.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2007. p. 280.
- ALDABÓ, Ricardo. **Energia Eólica.** São Paulo, 2002. Editora Artliber.
- FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. **Energia eólica.** Barueri,SP: Manole, 2011. p.48
- LOPES, Noêmia. **Potencial eólico em terra do Brasil pode ser seis vezes maior do que o estimado.** Agência FAPESP, Rio de Janeiro - RJ, p. 1-1, jan. 2016. Disponível em: <<http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=4021>>. Acesso em: 02 abr. 2017.
- MENEZES, Ana Elisa da Silva. **Aproveitamento eólico para uma vila de pescadores.** 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- CATAPULT DESIGN. “**Wind Turbine Test Report**”. San Francisco, December 2010. MATTE, Eudes Klockner. **Dimensionamento e Simulação de Um Pefil Aerodinâmico para um Aerogerador de Eixo Vertical.** 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, Horizontina, 2014.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira.** Disponível em:  
[http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02++Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+\(PDF\)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4?version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02++Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+(PDF)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4?version=1.0). Acesso em 4 de abril 2017
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report: Anual Market Update 2015.** Disponível em: <[http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report\\_April-2016\\_22\\_04.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf)>. Acesso em 4 de abril de 2017
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Tutorial de Energia Eólica.** Disponível em:<[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=211](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=211)>. Acesso em: 10 mar. 2017.

INSTITUTO PORTUGUÊS DE MAR E ATMOSFERA. **Brisas marítimas.** Disponível em:

<<https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html?page=aladin.brisa.mar.xml>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

INSTITUTO PORTUGUÊS DE MAR E ATMOSFERA. **Brisas de Montanha.** Disponível em:

<<https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.html?page=aladin.brisa.monta.xml>>. Acesso em: 4 mar. 2017

WIND **Turbines: Lift and Drag.** Disponível em: <<http://people.bu.edu/dew11/liftanddrag.html>>.

Acesso em: 06 abr. 2017.

PORTAL ENERGIA. **Como funciona um Aerogerador.** Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>>. Acesso em: 06 abr. 2017.

WIND **Turbines: Types of Wind Turbines.** Disponível em: <<http://people.bu.edu/dew11/turbinetypes.html>>. Acesso em: 06 abr. 2017

Yaw system. (2016, May 18). In Wikipedia, **The Free Encyclopedia**. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Yaw\\_system&oldid=720861377](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Yaw_system&oldid=720861377)>. Acesso em : 06 abr. 2017.

AABU. **Énergie éolienne et limite de Betz.** 2016. Disponível em: <<https://zestedesavoir.com/articles/1250/combien-denergie-peut-on-extraire-du-vent/>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

DARRIEUS **Rotor.** Disponível em: <[https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Darrieus-Rotor\\_Ennabeuren-3256.jpg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Darrieus-Rotor_Ennabeuren-3256.jpg)>. Acesso em: 07 abr. 2017.

PICOTURBINE Savonius **Wind Turbine Kit (AC) Basic.** Disponível em: <<https://www.electronickits.com/picoturbine-savonius-wind-turbine-kit-ac-basic-stem-lab/>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

LENZ, Edwin. **Lenz2 Turbine.** Disponível em:[http://www.windstuffnow.com/main/lenz2\\_turbine.htm](http://www.windstuffnow.com/main/lenz2_turbine.htm). Acesso em: 07 abr. 2017.

LENZ, Edwin. VAWT - “**Yet another VAWT...The Lenz Turbine**”. Disponível em: <<http://www.windstuffnow.com/main/vawt.htm>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

WENZEL, Guilherme München. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**. 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.

GOHIL, Himmatsinh P. **Design procedure for Lenz type vertical axis wind turbine for urban domestic application**. 2014. 5 p. Pesquisa Científica (P.G. Student)- Engenharia Mecânica, G.E.C., Valsad, Gujarat, India, 2014. Disponível em: <<http://www.ijsr.com/Article.php?manuscript=IJSRDV2I3550>>. Acesso em: 25 abr. 2017.

BRIZON, Diane; SCHILD, Nathalie. **Estudo aplicado de uma eólica**. Disponível em: <<http://e-lee.ist.utl.pt/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Etudeappliquee/Etudeappliquee.htm>>. Acesso em: 23 jul. 2017

## ANEXO 1 - FABRICAÇÃO DO AEROGERADOR (SISTEMA MECÂNICO)

A fabricação da turbina do tipo Lenz dimensionada anteriormente se deu através de um estudo que levou em conta parâmetros como a viabilidade econômica da fabricação do aerogerador, o nível de dificuldade de confecção do modelo e obtenção dos materiais e máquinas necessárias, o peso dos materiais afim de que a Inércia seja a menor possível e a durabilidade considerando as intempéries climáticas.

Os materiais utilizados na fabricação do protótipo foram os seguintes:

- Madeira Compensado de 10 mm de largura
- Madeira MDF de 6 mm de largura
- Chapa de alumínio de 0,4 mm de largura
- Tubo de Aço Carbono  $\frac{3}{4}$  pol chapa 20
- Rolamentos e Mancais  $\frac{3}{4}$  pol
- Grampos de Madeira
- Perfil em U de Alumínio
- Chapa de aço carbono 2 mm de espessura

A partir da definição das dimensões, dos materiais utilizados e a forma que seria feita a montagem, foi realizado o desenho em 3 dimensões do modelo no software de CAD Catia®. A figura A-1 abaixo mostra o protótipo no programa utilizado.

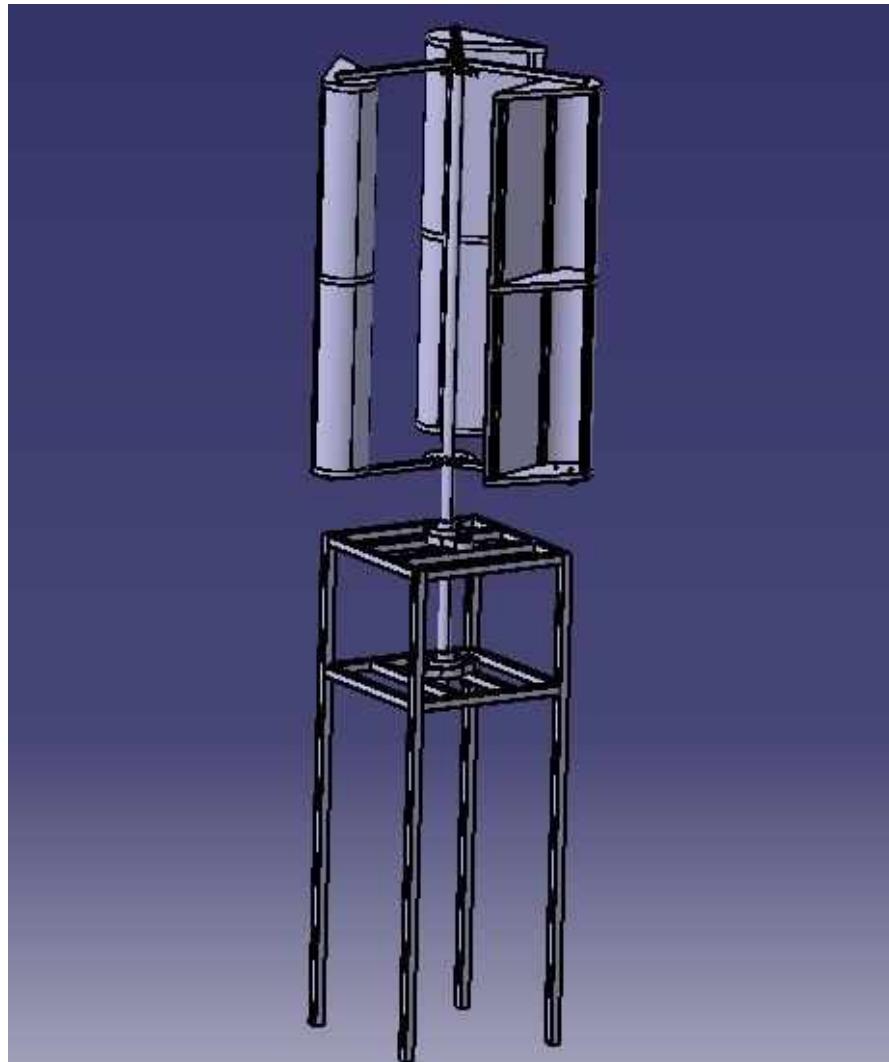


Figura A-1 – Desenho em 3 dimensões do protótipo em software de CAD.

A imagem em 2 dimensões das principais dimensões do aerogerador segue adiante na Figura A-2.

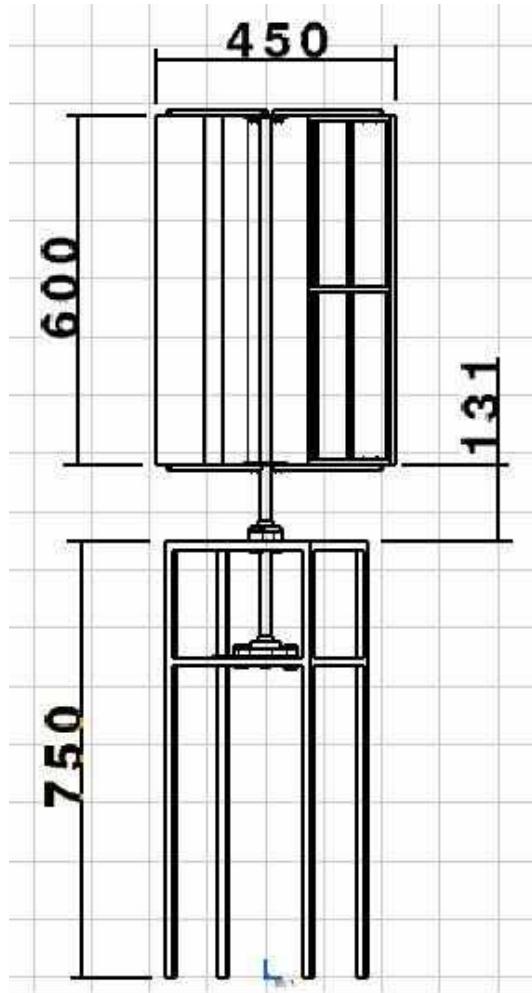


Figura A-2 – Desenho 2D do aerogerador com as principais dimensões em mm.

As nervuras das pás foram fabricadas em madeira compensado de largura 10 mm e cortadas a laser nas dimensões da Figura A-3. A escolha pelo corte a laser se deu pelo tamanho reduzido das nervuras, que diminui o preço deste tipo de fabricação e por outro lado dificulta a precisão em cortes manuais.

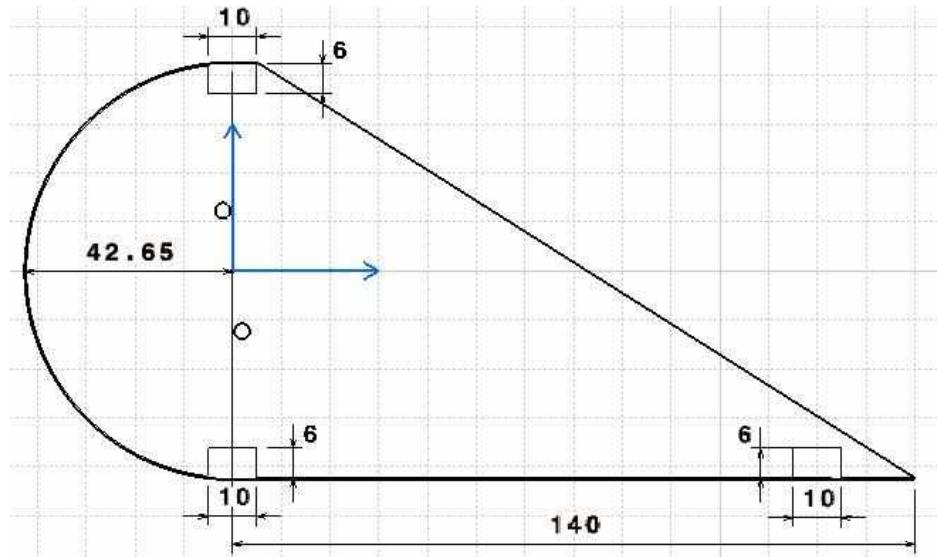


Figura A-3 – Desenho geométrico do perfil do aerofólio utilizado e suas dimensões em mm.

Para a confecção das longarinas foi utilizado madeira MDF de 6 mm de largura e o revestimento de chapa de alumínio com espessura 0,4 mm, podendo ser feito também em folha de PVC. Por fim, as junções das nervuras, longarinas e revestimento foram feitas com grampos de madeira como ilustrado na figura A-4.

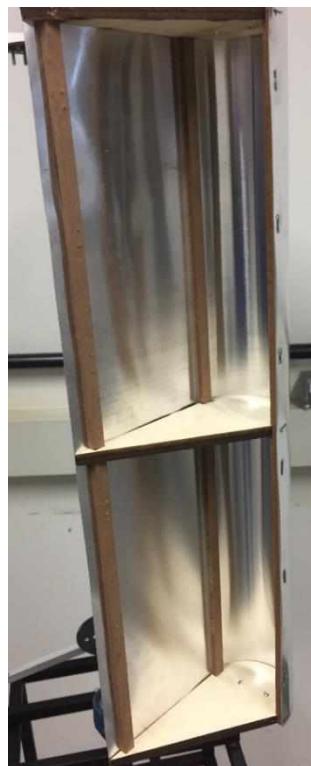


Figura A-4 – Estrutura das pás da turbina.

O suporte de sustentação das pás foi feito através de 6 perfis em U (1 cm x 1 cm) de alumínio parafusados em dois discos de aço carbono cortados à jato d'água (Fig.A–5).



Figura A–5 – Disco de sustentação das pás.

Ligado aos discos através de solda, o eixo foi produzido de um tubo de ferro galvanizado com diâmetro externo de  $\frac{3}{4}$  pol. e preso à torre de sustentação por dois mancais do tipo apoio e dois rolamentos de esfera parafusados como mostrado na Figura A–6.



Figura A–6 – Montagem do eixo sobre os rolamentos e mancais.

A torre para a sustentação da turbina eólica foi produzida em tubo de aço carbono de seção quadrada de dimensão 15 cm x 15 cm. Para a torre de 75 cm de altura foram necessários 6 metros de tubo.

A confecção desta parte do projeto se deu através de cortes no tubo de aço e posteriormente a solda entre as partes.



*Figura A-7 – Torre de sustentação do aerogerador.*

Os preços dos materiais adquiridos para a construção do sistema mecânico do aerogerador está listado na Tabela A-1 abaixo e foram comprados em valor de varejo nas cidades de Uberlândia e Monte Carmelo sem maiores cotações de preços. Os valores marcados com asterisco se referem a materiais doados por algumas empresas devido ao baixo valor em função da quantidade, porém foram usados valores pesquisados no mercado.

Material	Preço
Chapa de Alumínio 0,4x200x100 mm	R\$ 54,00
Tubo de ferro galvanizado ¾ pol x 3 m	R\$ 6,00
2 rolamentos e 2 mancais ¾ pol	R\$ 80,00
Tubo de metalon seção quadrada 15x15x600 cm	R\$ 17,00
1,5 m Perfil U de alumínio	R\$ 6,00
Corte a laser mdf	R\$ 40,00
Chapa de aço carbono e Corte a jato d'água	R\$ 40,00
Solda da torre	R\$ 30,00
Madeira Compensado 10 mm	R\$ 30,00*
Madeira MDF 6 mm	R\$ 20,00*
<b>CUSTO TOTAL</b>	<b>R\$ 323,00</b>

*Tabela A-1 – Descrição dos materiais utilizados e os respectivos preços.*

## ANEXO 2 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Este anexo mostra e descreve os equipamentos utilizados para a montagem do sistema elétrico dos experimentos e para a medição dos dados obtidos através de figuras e tabelas.

### **Túnel de Vento**

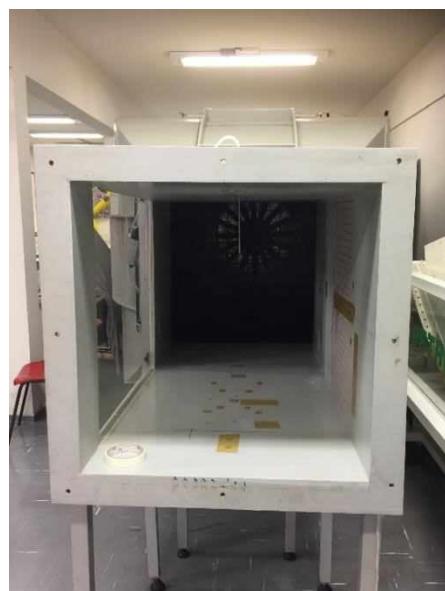


Figura A–8 – Seção de saída do túnel de vento utilizado durante o experimento.

Equipamento	Túnel de Vento de Seção Aberta
Marca / Modelo	TBX / TUN-SOP-1
Velocidade máxima do escoamento com a saída de ar livre:	33m/s.
Seção de saída	0,6 m x 0,6 m
Comprimento	6 m
Largura(máxima)	1,90 m
Altura	1,90 m

*Tabela A–2- Especificações técnicas do túnel de vento utilizado.*

## Gerador elétrico

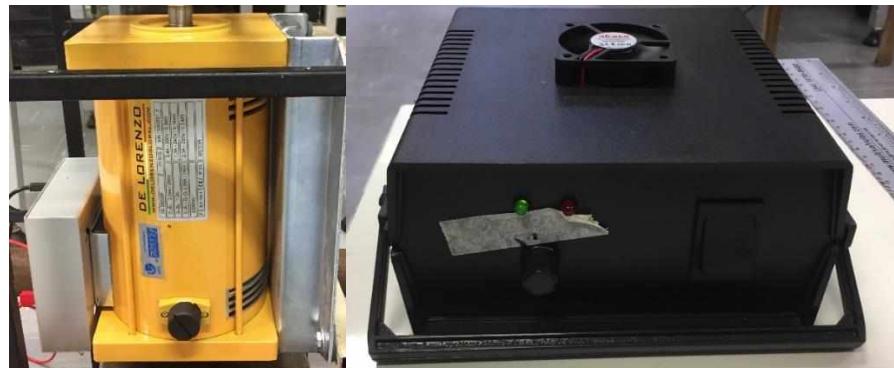


Figura A-9 – Gerador de CC (Esq.) e energizador da armadura do gerador (Dir.).

Equipamento	Gerador elétrico CC
Marca / Modelo	Delorenzo DI 30220 P
Potência	300 W
Voltagem	220 V
Velocidade	3.000 rpm
Excitação	140 V / 0.12 A

Tabela 3 – A- Especificações técnicas do gerador utilizado.

## Cargas Resistivas



Figura A-10 – Reostatos utilizados durante os testes.

Equipamento	Reostato
Marca / Modelo	Ohmic / Modelos não encontrados
Resistência	5Ω/10Ω
Potência	1.000W/1.000W

Tabela A-4 - Especificações técnicas do reostato utilizado.

## Multímetro



Figura A-11 – Multímetro utilizado.

Equipamento	Multímetro Digital
Marca / Modelo	Minipa / ET2042D
Precisão / Resolução à 20V DC	$\pm(0,5\%+3D)$ / 10mV
Precisão / Resolução à 200 Ω	$\pm(0,8\%+5D)$ / 0,1Ω

Tabela A-5 - Especificações técnicas do multímetro utilizado.

## Tacômetro



Figura A-12 – Tacômetro utilizado durante o experimento.

Equipamento	Tacômetro Foto/Contato Digital
Marca / Modelo	Minipa / MDT-2238B
Faixa de Medição Fototacômetro	2,5 ~ 99.999 RPM
Precisão	0,05 %
Distância de detecção	50 ~ 500 mm

Tabela A-6 - Especificações técnicas do tacômetro utilizado.

### ANEXO 3 – CÓDIGO MATLAB®

O código utilizado no software MATLAB® para o cálculo dos dados citados no relatório e plotagem do gráfico encontra-se a seguir na Figura A-13.

```
%Variáveis
rho=1.225;                                     %Densidade do ar [kg/m^3]
H=0.6;                                         %Altura do aerogerador [m]
D=0.45;                                         %Diâmetro do aerogerador[m]
v_w=[5; 6; 7; 8; 9; 10; 10.8; 11.7]';        %Velocidade do vento [m/s]
R_c=[14.7; 12; 9; 6; 3];                      %Resistência da Carga [Ohms]
R_g=(19.2+7.9)/2;                             %Resistência da armadura do gerador[Ohms]

%Voltagens obtidas na saída do gerador para diferentes velocidades do vento
U_R(1,:)=[3.4;5.4;6.85;8.4;10;11.5;12.75;13.85]; %Carga resistiva de 14.7 ohms
U_R(2,:)=[2.9;4.7;6.15;7.5;9.2;10.5;11.8;13];    %Carga resistiva de 12 ohms
U_R(3,:)=[0;3.85;5.2;6.5;8;8.95;10;11.1];       %Carga resistiva de 9 ohms
U_R(4,:)=[0;2.7;3.7;5.1;6.2;7;8;8.95];           %Carga resistiva de 6 ohms
U_R(5,:)=[0;1.3;2.05;2.95;3.65;4.8;5.5;6.3];     %Carga resistiva de 3 ohms
%Rotação do eixo para diferentes velocidades do vento
f_R(1,:)=[119;185;238;295;340;387;430;478];      %Carga resistiva de 14.7 ohms
f_R(2,:)=[110;175;230;285;329;379;425;465];      %Carga resistiva de 12 ohms
f_R(3,:)=[0;165;220;273;323;363;412;450];        %Carga resistiva de 9 ohms
f_R(4,:)=[0;143;197;260;305;350;397;435];        %Carga resistiva de 6 ohms
f_R(5,:)=[0;110;184;235;285;333;375;420];        %Carga resistiva de 3 ohms

%Cálculo das Potências envolvidas no estudo
for i=1:8
P_w(i)=0.5*rho*H*D*v_w(i)^3;                   %Potencial eólico [W]
R_x(:,i)=R_c;
end
for i=1:5
P_dis(i,:)=((U_R(i,:)/R_c(i,:)).^2)*R_g;      %Potência dissipada [W]
P_s(i,:)=U_R(i,:).^2/R_c(i);                     %Potência de saída
P_e(i,:)=P_s(i,:)+P_dis(i,:);                   %Potência de entrada [W]
neta_M(i,:)=P_e(i,:)/P_w;                        %Rendimento Mecânico [W]
end

colors = ['r';'g';'b';'c';'m';'y';'k';'b'];
symbols = ['o';'x';'s';'d';'v';'^';'p';'h'];

%Plotagem dos gráficos

Gráfico Potência em função da Carga e Rotação
figure(1)
surf(f_R,R_x,P_e)

for i=1:5
col = [colors(i)];

%Gráfico Coeficiente de Rendimento x Velocidade do vento
figure (2)
plot(v_w,neta_M(i,:),'color',rand(1,3),'color',col,'Linewidth',1.5)
legend('15 Ohms','12 Ohms','9 Ohms','6 Ohms','3 Ohms')
ylabel('Coeficiente de Potencia','FontSize',12)
xlabel('Velocidade do Vento [m/s]','FontSize',12)
grid on
hold on

%Gráfico Potência x Rotação para diferentes cargas resistivas
figure(3)
plot(f_R(i,:),P_e(i,:),'color',col,'Linewidth',1.5)
legend('15 Ohms','12 Ohms','9 Ohms','6 Ohms','3 Ohms')
ylabel('Potência Mecânica [W]','FontSize',12)
xlabel('Rotação do Eixo [RPM]','FontSize',12)
```

```

set(gca,'fontsize',12)
grid on
hold on
end

for i=1:8
col = [colors(i)];
colsym = [colors(i),symbols(i)];

%Gráfico Potência x Rotação para diferentes velocidades de vento
figure(4)
plot(f_R(:,i),P_e(:,i),colsym,'Linewidth',1.5)
ylabel('Potência Mecânica [W]', 'FontSize',12)
xlabel('Rotação do Eixo [RPM]', 'FontSize',12)
legend('5 m/s','6 m/s','7 m/s','8 m/s','9 m/s','10 m/s','10.8 m/s','11.7 m/s')
grid on
hold on

%Gráfico Potencial Eólico e Potência Máxima x velocidade de vento
figure(5)
ix=find(P_e(:,i)==max(P_e(:,i)));
P_e_max=P_e(ix,i);
ixx=find(P_s(:,i)==max(P_s(:,i)));
P_s_max=P_e(ixx,i);
if i==8
plot(v_w,P_e(ix,:),'Color','b','Linewidth',1.5)
hold on
plot(v_w,P_s(ixx,:),'Color','r','Linewidth',1.5)
plot(v_w,P_w,'Color','k','Linewidth',1.5)
g = findobj('Color','b');
i = findobj('Color','k');
v = [g(1) i(1)];
legend('Potência Máxima do Aerogerador','Potencial Eletrico Máximo','Potencial
Eólico Máximo')
ylabel('Potência Maxima [W]', 'FontSize',12)
xlabel('Velocidade do Vento [m/s]', 'FontSize',12)
grid on
end
end

```

*Figura A-13 – Código em Matlab® utilizado nos cálculos e confecção dos gráficos.*