

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE  
DO NORTE – *CAMPUS* JOÃO CÂMARA  
CURSO DE TECNOLOGIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

GILSON CLEMENTINO DA SILVA FILHO  
WAGNER SILVA DE OLIVEIRA

**ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TURBINA DE EIXO  
VERTICAL SAVONIUS, NA CIDADE DE JOÃO CÂMARA - RN**

JOÃO CÂMARA – RN  
2018

GILSON CLEMENTINO DA SILVA FILHO  
WAGNER SILVA DE OLIVEIRA

**ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TURBINA DE EIXO  
VERTICAL SAVONIUS, NA CIDADE DE JOÃO CÂMARA - RN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Energias Renováveis.

Prof. ° Orientador: Dennys Lopes Alves, MSc.  
Prof. ° Coorientador: Gennisson Batista Carneiro, MSc.

GILSON CLEMENTINO DA SILVA FILHO  
WAGNER SILVA DE OLIVEIRA

**ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TURBINA DE EIXO  
VERTICAL SAVONIUS, NA CIDADE DE JOÃO CÂMARA - RN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Energias Renováveis.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_, pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof. Dennys Lopes Alves - Presidente  
IFRN – *Campus* João Câmara

---

Prof. Dener da Silva Albuquerque - Examinador  
IFRN – *Campus* João Câmara

---

Prof.<sup>a</sup>. Sâmia Lorena de Medeiros Confessor - Examinador  
IFRN – *Campus* João Câmara

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de exprimir nossos agradecimentos primeiramente a Deus que sempre nos acompanha nos dando forças para continuarmos a realização de nossos sonhos.

Agradecemos as nossas famílias por serem nossas bases e por sempre estarem ao nosso lado nos dando apoio durante nossa formação.

Agradecemos a todos os colegas de turma do curso de Tecnologia em Energias Renováveis pelo carinho, incentivo, apoio, colaboração e por nos acompanharem durante nossas trajetórias acadêmicas, no qual estiveram sempre presentes.

Agradecemos a todos os professores que dedicaram seu precioso tempo com o objetivo de passar adiante o conhecimento na área, principalmente ao nosso orientador, Dennys Lopes Alves, devido a sua valiosa ajuda e pelas suas correções e incentivos, assim como o nosso Coorientador, Gennisson Batista Carneiro. A todos os professores que nos orientaram e se dispuseram a auxiliar e tirar dúvidas durante o desenvolvimento deste projeto.

Agradecemos as pessoas que nos ajudaram na construção do protótipo, em especial ao torneiro mecânico Iranilton Fernandes Pereira, ao professor Washington dos Santos Silva Júnior, Uilton Medeiros dos Santos, aos funcionários terceirizados do *Campus*, em especial a João Batista pela imensa ajuda e ao nosso companheiro de curso Esdras Targino pela imensa contribuição. A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O constante avanço tecnológico e, conseqüentemente, o aumento do consumo energético despertam nesse setor a necessidade de investimentos voltados para a geração de energia limpa, que tenha custo acessível, supra as necessidades humanas e minimize os danos ambientais. Sob esta perspectiva, um ramo desse setor que vem ganhando destaque é o da energia eólica, principalmente na região Nordeste do Brasil. Desta forma, o trabalho consistiu em projetar, construir e executar um protótipo de um aerogerador de eixo vertical do tipo Savonius, também conhecido como aerogerador do tipo S, com a intenção de analisar seu comportamento nas condições de vento da cidade de João Câmara, Rio Grande do Norte. O protótipo foi desenvolvido, implementado e testado entre os meses de dezembro de 2017 a março de 2018 no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), na referida cidade. Todo o projeto da turbina Savonius foi desenvolvido a partir de pesquisas e estudos anteriores referentes à melhor geometria de rendimento para a turbina, levando em consideração a disponibilidade de materiais de baixo custo para sua construção. Após seu desenvolvimento, o protótipo foi posto a teste, logo, foram verificadas e analisadas as variáveis que o cercam, como tensão, corrente, velocidade do vento, temperatura do gerador e os efeitos do clima em seus materiais. Como também a influência dos materiais afetados no comportamento da turbina. O protótipo foi implementado a um estudo de caso onde obteve um desempenho satisfatório sob as condições de vento da região. Identificou-se a necessidade de correções em trabalhos futuros, afim de melhorar principalmente a estrutura física da turbina em decorrência do desgaste excessivo de determinados materiais.

**PALAVRAS CHAVES:** Energia Eólica; João Câmara; Protótipo; Turbina de Eixo Vertical; Turbina Savonius.

## **ABSTRACT**

The constant technological advance and, consequently, the increase of the energy consumption awaken in this sector the need of investments directed to the generation of clean energy that has accessible cost, exceeds the human needs and minimizes the environmental damages. From this perspective, one branch of this sector that has been gaining prominence is that of wind energy, mainly in the Northeastern region of Brazil. In this way, the work consisted in designing, constructing and executing a prototype of a vertical axis wind turbine of the Savonius type, also known as type S wind turbine, with the intention of analyzing its behavior in the wind conditions of the city of João Câmara, Rio Grande do Norte. The prototype was developed, implemented and tested between December 2017 and March 2018 at the Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte (IFRN), in that city. The entire Savonius turbine design was developed from previous research and studies on the best turbine efficiency geometry, taking into account the availability of low cost materials for its construction. After its development, the prototype was put to the test, so the variables that surround it, such as voltage, current, wind speed, generator temperature and the effects of the climate on its materials were verified and analyzed. As well as the influence of the materials affected on the turbine behavior. The prototype was implemented in a case study, with satisfactory performance under the wind conditions of the region. It was identified the need for corrections in future work, in order to improve mainly the physical structure of the turbine due to the excessive wear of certain materials.

**KEYWORDS:** Wind Energy; João Câmara; Prototype; Vertical Axis Turbine; Turbine Savonius.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Representação do Fluxo de ar pela seção transversal da área de um cilindro. ....	6
<b>Figura 2</b> - Relação da altura com a turbulência do deslocamento da massa de ar. ....	7
<b>Figura 3</b> - Antigo moinho Persa datado de 200 a.C. ....	8
<b>Figura 4</b> - Antigo moinho de vento chinês para bombeamento de água. ....	9
<b>Figura 5</b> - Diversos modelos de moinhos de vento históricos da Europa. ....	9
<b>Figura 6</b> - Moinho de vento de Daniel Halladay. ....	10
<b>Figura 7</b> - Ilustração do moinho de vento de James Blyth. ....	11
<b>Figura 8</b> - Primeira turbina eólica de Poul La Cour, 1891 Dinamarca. ....	12
<b>Figura 9</b> - Demonstração de uma turbina eólica de eixo vertical e uma turbina eólica de eixo horizontal. ....	12
<b>Figura 10</b> - Demonstração de aerogeradores de uma pá, duas pás, três pás e múltiplas pás. ....	13
<b>Figura 11</b> - Representação do fluxo de ar sobre estruturas diferentes e suas respectivas forças atuantes. ....	14
<b>Figura 12</b> - Representação dos principais componentes de uma turbina eólica. ....	15
<b>Figura 13</b> - Representação das turbinas eólicas de eixo vertical do tipo Savonius, Darrieus e Darrieus H. ....	16
<b>Figura 14</b> - Diferentes Tipos de Geometrias da Turbina Eólica Darrieus. ....	17
<b>Figura 15</b> - Demonstração do rotor Savonius. ....	18
<b>Figura 16</b> - Demonstração da ação do vento nas diferentes superfícies da pá. ....	18
<b>Figura 17</b> - Representação da solidez no sistema eólica. ....	19
<b>Figura 18</b> - Vista frontal (a) e vista superior (b) de um rotor Savonius. ....	20
<b>Figura 19</b> - Representação do Coeficiente de Torque em Função da TSR. ....	21
<b>Figura 20</b> - Demonstração dos valores de $C_p$ de acordo com a variação da $\lambda$ . ....	22
<b>Figura 21</b> - Representação das variáveis do rotor Savonius para a relação de aspecto. ....	23
<b>Figura 22</b> - Dados Meteorológicos da localidade em 2017. ....	26
<b>Figura 23</b> - Estrutura de caixa de som de madeira. ....	28
<b>Figura 24</b> - Peça de madeira acoplada ao centro da estrutura. ....	28
<b>Figura 25</b> - Aberturas para a circulação do ar. ....	29
<b>Figura 26</b> - (a) Peças de vidro, (b) Travas. ....	29
<b>Figura 27</b> - (a) Hastes de aço, (b) haste de aço fixando a estrutura ao solo. ....	30
<b>Figura 28</b> - (a) Gerador, (b) vista superior do gerador. ....	30
<b>Figura 29</b> - Rótulo do gerador. ....	31
<b>Figura 30</b> - Ficha de especificações do gerador. ....	31
<b>Figura 31</b> - (a) Vista superior da caixa e da catraca acopladas ao gerador, (b) vista lateral. ....	32
<b>Figura 32</b> - Relação entre o coeficiente de potência e a velocidade do vento para rotores com duas, três e quatro lâminas. ....	33
<b>Figura 33</b> - (a) Balde de óleo, (b) pás do protótipo. ....	33
<b>Figura 34</b> - Variação da potência mecânica em relação a velocidade do vento para rotores com e sem placas de extremidades. ....	34
<b>Figura 35</b> - Placa de Extremidade feita de PVC. ....	34
<b>Figura 36</b> - Haste de Aço. ....	35
<b>Figura 37</b> - (a) Rolamento superior, (b) rolamento inferior. ....	35
<b>Figura 38</b> - Variação da potência mecânica em relação a velocidade do vento para diferentes valores de sobreposição. ....	36
<b>Figura 39</b> - Acoplamento das peças ao eixo. ....	36

<b>Figura 40</b> - Submetido a testes.....	37
<b>Figura 41</b> - (a) Tambor de Aço de 200 litros, (b) novas pás do protótipo.....	38
<b>Figura 42</b> - Placa de extremidade de madeira MDF.....	38
<b>Figura 43</b> - (a) Acoplamento no eixo, (b) tábua.....	39
<b>Figura 44</b> - Rotor acoplado a estrutura da turbina.....	39
<b>Figura 45</b> - Sistema multiplicador de velocidade, (a) Catraca maior, (b) catraca menor.....	40
<b>Figura 46</b> - Sistema multiplicador de velocidade, (a) Catraca maior, (b) catraca menor.....	40
<b>Figura 47</b> - (a) Borne com três entradas, (b) caixa de distribuição. ....	41
<b>Figura 48</b> - (a) Conectores para medir tensão, (b) Suporte do multímetro. ....	42
<b>Figura 49</b> - Lâmpada e interruptor. ....	42
<b>Figura 50</b> - Esquema de ligação da parte elétrica.....	43
<b>Figura 51</b> - Dados de velocidade de vento dos dias 15 e 16 de março.....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Dados da média de velocidade de vento coletado no <i>Campus</i> . .....	47
<b>Gráfico 2</b> - Dados de velocidade de vento no <i>Campus</i> x dados de velocidade de vento no Meteoblue. .....	47
<b>Gráfico 3</b> - Dados da média de tensão e temperatura do gerador.....	48
<b>Gráfico 4</b> - Comparação entre as potências estimadas e a potência extraída. ....	49

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Materiais e custos.....	44
<b>Tabela 2</b> - Custos de serviços.....	44
<b>Tabela 3</b> - Dados de média de tensão e temperatura do gerador.....	48

## LISTA DE SIGLAS

A	Amperes
CP	Coeficiente de Potência
CT	Coeficiente de Torque
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
TEEH	Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal
TEEV	Turbinas Eólicas de Eixo Vertical
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
V	Volts
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>
W	Watts

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO.....	4
2.1	OBJETIVO GERAL.....	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	FORMAÇÃO DOS VENTOS.....	4
3.2	POTÊNCIA CONTIDA NAS MASSAS DE AR EM MOVIMENTO.....	5
3.3	ALTURA E RUGOSIDADE DO TERRENO NA INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO DE AR .....	7
3.4	ORIGEM E EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS AEROGERADORES .....	8
3.5	CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES .....	12
<b>3.5.1</b>	<b>Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal.....</b>	<b>13</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Turbinas Eólicas de Eixo Vertical .....</b>	<b>16</b>
3.6	TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL SAVONIUS .....	18
4.	METODOLOGIA .....	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
5.1	DADOS METEOROLÓGICOS DA LOCALIDADE .....	26
5.2	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO .....	27
<b>5.2.1</b>	<b>Base do rotor.....</b>	<b>27</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Gerador .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Construção do Rotor .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Multiplicador de Velocidade .....</b>	<b>40</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Parte Elétrica .....</b>	<b>41</b>
5.3	MATERIAIS, SERVIÇOS E CUSTOS .....	43
5.4	RESULTADOS .....	45
<b>5.4.1</b>	<b>Potência Estimada e Potência Extraída.....</b>	<b>46</b>
6.	CONCLUSÃO.....	50
<b>6.1.1</b>	<b>Sugestões Para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>51</b>
7.	REFERÊNCIAS .....	52
	APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO PROTÓTIPO.....	56
	APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO DO PROTÓTIPO.....	57

## 1. INTRODUÇÃO

As necessidades energéticas do homem estão em constante evolução. Durante o desenvolvimento do ser humano enquanto ser pertencente à sociedade, este buscou satisfazer suas necessidades primárias que eram basicamente a alimentação, uma fonte de iluminação noturna e aquecimento, o homem apropriou-se do uso do fogo e desenvolveu a agricultura e a pecuária, armazenando energia excedente nos animais e alimentos (FONSECA, 1972; HÉMERY, BEBIER e DELÉAGE, 1993).

Ao longo da história, o homem foi desenvolvendo máquinas cada vez mais sofisticadas para lidar com as necessidades emergentes de uma sociedade em processo de modernização. As máquinas inventadas tornaram-se cada vez mais sofisticadas, justamente para atender a tais necessidades. Assim, buscou e utilizou as fontes de energia da natureza e aos poucos foi descobrindo maneiras de transformar essa energia disponível em outros moldes mais convenientes para a sua utilização (BURATTINI, 2008).

A diversificação do trabalho, visando a otimização das tarefas e o aumento do nível de conforto, exigiu novas formas de utilização de energia, que foram sendo desenvolvidas e aprimoradas através do desenvolvimento da matemática, da geometria e da engenharia, que proporcionaram a criação de dispositivos mecânicos complexos, empregados para o aproveitamento da energia contida nos ventos e no vapor (PIERRE, 2011).

Tercio (2002) afirma que o vento disponível em abundância no planeta, pode ser considerado uma derivação da energia advinda do sol, o qual resulta da movimentação do ar quente que se desloca do equador em direção as regiões polares, de forma ininterrupta.

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, isto é, o vento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação através do auxílio de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, destinados à geração de eletricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água (ANEEL, 2009).

As primeiras menções sobre o uso da energia dos ventos têm origem no Oriente: Índia, Tibete, Afeganistão e Pérsia, atual Irã. Pinto (2013), tal como outros autores, afirmam terem descobertos restos de um moinho de vento com aproximadamente 3.000 anos de idade, no antigo Egito. Os egípcios utilizavam velas como auxílio para embarcações a remo. Outras civilizações como a China e Pérsia utilizavam as forças do vento para mover máquinas para moagem dos grãos e irrigação em 644 a.C. Os holandeses em 1350 d.C. aprimoraram a

eficiência do moinho ao colocar seu eixo de rotação na forma horizontal e com quatro pás, assim utilizaram o moinho para a drenagem de pântanos e lagos, além de outras atividades (DUTRA, 2001). Entretanto, as características de design, eficiência e capacidade instalada de uma turbina eólica melhoraram bastante desde 1980, quando as primeiras turbinas comerciais foram desenvolvidas, como afirma Pinto (2013).

As turbinas eólicas podem ser classificadas de duas maneiras conforme a orientação do eixo de rotação de cada máquina. Desta forma, classificadas em turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) do inglês *horizontal axis wind turbine* (HAWT) e em turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) ou *vertical axis wind turbine* (VAWT).

Os projetos mais antigos de rotores eólicos destacavam rotores com o eixo de rotação vertical. No início, entretanto, os rotores com eixo vertical só podiam ser construídos como simples rotores de arrasto (PINTO, 2013). Neste contexto está inserida a turbina de eixo vertical Savonius.

Semelhante a outras modalidades de energia alternativa, a energia eólica apresenta vantagens sobre o uso de recursos fósseis por ser uma fonte limpa, renovável. “A energia eólica é considerada a fonte de energia mais limpa do planeta” (PAULINO, 2015). Além disso, sua produção é pouco suscetível a crises de produção como as hidrelétricas, pois depende apenas de condições climáticas favoráveis a regularidade da força do vento.

Sob esta ótica, o estado do Rio Grande do Norte apresenta condições climáticas ideais para a instalação de parques eólicos. Tal característica faz do estado o detentor da maior matriz eólica estadual do país (PAULINO, 2015) e torna as usinas eólicas uma alternativa energética válida e funcional dos pontos de vista econômicos, sociais e ambientais, para compor a matriz energética brasileira e, quiçá, substituir o uso de recursos fósseis por uma fonte de energia limpa e que apresenta benefícios ambientais e econômicos.

Entretanto, apesar das vantagens dos parques eólicos, os mesmos também apresentam limitações. A instalação de um parque eólico exige espaço vasto e distante de áreas habitadas. Seu custo de instalação é o mais alto em relação aos outros tipos de energia limpa e sua capacidade de captação e eficiência de produção energética é afetado pelas limitações de altura de suas torres.

Assim, estudos em prol do desenvolvimento de métodos eficientes em captação eólica relacionado à geração distribuída minimizam as restrições que o atual modelo de grande geração apresenta, pois, assim como os sistemas eólicos de pequeno porte, estão mais próximos do solo e visam aproveitar o vento em pequenas alturas sem que ocorram baixas na

produção de energia, envolvendo menos custos de instalação, manutenção e maior retorno monetário.

Em termos de eficiência e não complexidade de montagem, a construção do protótipo do micro-aerogerador de eixo vertical do tipo Savonius, apresenta grandes vantagens, pois não necessita de grandes correntes de ar para gerar energia, apresenta maior resistência aos ventos turbulentos do que os outros tipos de aerogeradores, produz menos ruídos e interferências, tornando-o mais adequado para áreas urbanas. Seu custo de fabricação e montagem apresenta grande potencial econômico, por ser constituído por materiais acessíveis e cuja montagem torna-se mais econômica em relação às opções de geração eólica existentes no mercado.

Tendo em vista o crescimento de investimento no setor eólico e a capacidade de produção do Nordeste, principalmente no estado do Rio Grande do Norte, observa-se a oportunidade de investimentos nesse tipo de tecnologia. Sendo assim, este trabalho objetivou-se em apresentar e estudar a tecnologia da turbina eólica do tipo Savonius, além de criar e implementar um protótipo no IFRN *Campus* João Câmara a fim de analisar seu comportamento a partir dos dados de geração coletados em consonância com os dados de velocidade do deslocamento da massa de ar incidente no local.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

De maneira sucinta, o objetivo deste estudo é apresentar e detalhar a tecnologia de captação de energia eólica através de uma turbina do tipo Savonius. Além de desenvolver e implementar um protótipo no IFRN – *Campus* João Câmara, afim de avaliar seu comportamento a partir dos dados de geração coletados em consonância com os dados de velocidade de deslocamento da massa de ar incidente no local.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Apresentar dados de velocidade do vento na região de João Câmara;
- Descrever as etapas necessárias à construção de um protótipo de um sistema de geração eólica do tipo Savonius;
- Demonstrar o princípio de funcionamento;
- Obter as medições de grandezas elétricas;
- Apresentar o potencial de geração e atestar a viabilidade energética do sistema.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 FORMAÇÃO DOS VENTOS**

A análise das condições de vento é primordial para a instalação de turbinas eólicas, portanto, o estudo para estimar os recursos e regimes de vento em uma determinada localidade torna-se fundamental para fixação de uma turbina em uma localidade específica.

O sol aquece a Terra de forma desigual, esse aquecimento diferenciado da atmosfera provoca diferentes gradientes de pressão atmosférica formando variados fluxos de vento que são responsáveis por movimentos da massa de ar. Assim, como aponta Lopez (2012) o aquecimento desigual entre o equador e as regiões polares causa a movimentação de ar chamada de circulação geral média.

Há regiões no planeta cujas movimentações das massas de ar ocorrem de forma ininterruptas. Tais massas de ar podem ser classificadas como ventos alísios, contra-alísios,

ventos do oeste e ventos polares. Segundo Oliveira e Pereira (2012) os ventos alísios são responsáveis por explicarem o grande potencial eólico do litoral nordeste do Brasil, mais precisamente do Rio Grande do Norte ao Piauí.

### 3.2 POTÊNCIA CONTIDA NAS MASSAS DE AR EM MOVIMENTO

O ar em movimento produz energia, sendo a energia cinética proveniente de tal movimento correspondente à energia eólica. Sabe-se que o vento tem natureza estocástica, existindo variação constante tanto na sua direção quanto na sua velocidade (PINTO, 2013).

Segundo Cardoso e Ferreira (2015), pode-se calcular a energia eólica do vento basicamente calculando a energia cinética do movimento dessa massa de ar, no qual a potência é dada pelo trabalho sobre a variação do tempo, como mostra a Equação (1), onde  $P$  é a potência em Watts (W),  $w$  o trabalho realizado em Joule (J) e  $\Delta t$  a variação do tempo em segundos (s).

$$P = \frac{w}{\Delta t} \quad (1)$$

Desta forma pode-se dizer que o trabalho realizado para mover a massa de ar é igual à energia cinética do vento, como demonstrado na Equação (2), onde  $Ec$  é a energia cinética devido ao deslocamento da massa de ar dado em Joule (J),  $m$  é a massa do ar dado em quilograma (Kg) e  $v$  é a velocidade do vento medido em metros por segundos ( $\frac{m}{s}$ ).

$$w = Ec = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

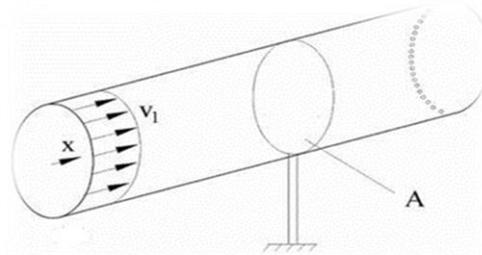
Na Equação (3) temos a associação entre a potência do vento e o trabalho realizado para o deslocamento dessa massa de ar.

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{Ec}{\Delta t} = \frac{mv^2}{2 \Delta t} \quad (3)$$

Assim, temos a potência disponível no deslocamento das massas de ar, dada pela Equação (4), onde  $\frac{m}{\Delta t}$  é a quantidade de massa de ar deslocada em um determinado período de tempo.

$$P = \frac{mv^2}{2\Delta t} \quad (4)$$

Logo, o fluxo de massa em relação a uma determinada área, neste caso, é representado pela área de um cilindro como demonstra a Figura (1).



**Figura 1** - Representação do Fluxo de ar pela seção transversal da área de um cilindro.

Fonte: CRESESB (Modificada pelos autores). Disponível

em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=221](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=221)>, acesso em: 07 mar. 2018.

O Fluxo de massa também poderá ser representado conforme mostra a Equação (5), no qual  $\rho$  é massa específica do ar medida em quilograma por metro cúbico  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ ,  $A$  a área da seção transversal dada em metros quadrados ( $m^2$ ) e  $v$  é a velocidade do vento medida em metros por segundo  $\left(\frac{m}{s}\right)$ .

$$\frac{m}{\Delta t} = \rho Av \quad (5)$$

Desta forma a potência contida no vento fica expressa pela Equação (6).

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (6)$$

Segundo Lopez (2012) a equação da potência é muito importante para a análise da energia eólica, que também pode ser escrita por unidade de área, chamada de densidade de potência como demonstra a Equação (7):

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (7)$$

O qual  $DP$  é a Densidade de Potência (DP) dada em quilograma por metro quadrado  $\left(\frac{Kg}{m^2}\right)$ .

Conforme Pinto (2013), existem fatores aos quais influenciam no potencial eólico, são exemplos de alguns deles: temperatura, pressão e altitude. Em conformidade com a Equação (6) o potencial eólico depende diretamente da massa específica do ar. E tal massa depende da temperatura e da pressão atmosférica conforme a Equação (8).

$$\rho = \frac{Pa}{RT} \quad (8)$$

Onde  $Pa$  é a Pressão Atmosférica,  $R$  a constante do ar ( $287 \frac{J}{kg} \cdot K$ ) e  $T$  a temperatura em Kelvin ( $K$ ). A massa específica do ar também sofre influência da altura e da temperatura ambiente como demonstra a Equação (9).

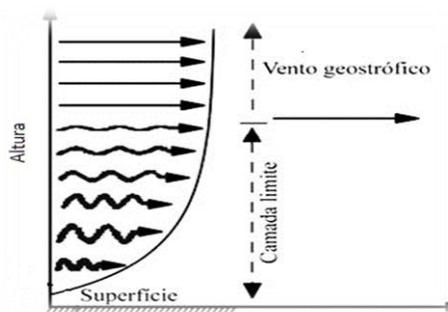
$$\rho = \frac{\left[ 353,4 \left( 1 - \frac{z}{45271} \right) 5,2624 \right]}{273,15 + T} \quad (9)$$

Sendo  $z$  a altitude do local em metros ( $m$ ) e  $T$  a temperatura do ambiente em graus Celsius ( $^{\circ}C$ ).

### 3.3 ALTURA E RUGOSIDADE DO TERRENO NA INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO DE AR

O estudo prévio do relevo é de fundamental importância na avaliação das condições a que será submetido à captação do recurso eólico. Segundo Lopez (2012) a velocidade do vento e sua turbulência são afetadas diretamente pela rugosidade do terreno. Assim, com o aumento da rugosidade do terreno a velocidade do vento diminui, enquanto a turbulência desse escoamento aumenta.

As correntes de ar que circulam a Terra são afetadas pelo atrito que ocorre com a superfície do planeta. Esse atrito resulta numa força horizontal contrária ao fluxo incidente e decrescente com a altura, até um ponto chamado de camada-limite, como mostra a Figura (2). De acordo com Pinto (2013), a eólica a camada-limite superficial é a que interessa. Pois esta varia entre 50 a 150 metros de altura aproximadamente.



**Figura 2** - Relação da altura com a turbulência do deslocamento da massa de ar.

Fonte: UFRGS (Editado pelos autores). Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/sieolica/mapaeolico.html>>, acesso em: 08 mar. 2018.

A variação da velocidade do vento em decorrência de sua altura segue a equação do tipo estatístico, conhecida como Lei exponencial de Hellmann ou Lei da Potência (Díez, 2005), conforme a Equação (10).

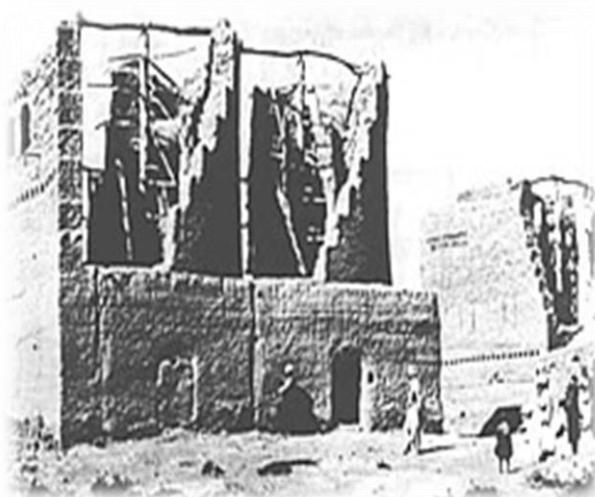
$$Vh = Vh1 * \left(\frac{h}{h1}\right)^\alpha \quad (10)$$

Onde  $Vh$  é a velocidade do vento na altura  $h$ ,  $Vh1$  a velocidade do vento na altura  $h1$  e  $\alpha$  é o expoente de Hellmann que é em função da rugosidade do terreno.

### 3.4 ORIGEM E EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS AEROGERADORES

A data exata da utilização de equipamentos mecânicos para a captação da energia eólica pelo homem é incerta. Pouco se sabe sobre o exato momento da história em que isto aconteceu, mas vários estudiosos acreditam que os egípcios, em torno do ano 2800 a.C, foram os primeiros a utilizar a energia advinda do vento em velas para ajudar no trabalho de força animal, como moagem de grãos e bombeamento de água (Hau, 2006).

Segundo Pinto (2013), as primeiras referências ao uso da energia eólica tiveram origem no Oriente, na antiga Pérsia por volta de 644 a.C., onde hoje está localizado o Irã. Os persas aplicaram essa fonte de energia em moinhos principalmente moagem de grãos e bombeamento de água, como mostra a Figura 3. Já na China, o surgimento dessa tecnologia data de 1219, que podem ter sido importadas pelo conquistador mongol Gêngis Khan (1162-1227).



**Figura 3** - Antigo moinho Persa datado de 200 a.C.

Fonte: CRESESB. Disponível

em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=11&filter%5B%5D](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=11&filter%5B%5D)>, acesso em: 09 mar. 2018.

Os moinhos de vento chineses eram constituídos de uma tecnologia frágil, formado basicamente por hastes de bambu e tecido em formato de velas, fixado em um eixo vertical, como ilustrado pela Figura 4.



**Figura 4** - Antigo moinho de vento chinês para bombeamento de água.

Fonte: Diaz (2012). Disponível em: <[http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufri-pem\\_upl/THESIS/16/pemufri2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf](http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufri-pem_upl/THESIS/16/pemufri2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf)>, acesso em: 09 mar. 2018.

Lopez (2012) aponta que os primeiros moinhos de vento chegaram a Europa por volta do século XII em países como França e Inglaterra. Diferentemente dos utilizados na Pérsia e na China, os moinhos europeus possuíam na sua parte superior um eixo horizontal que dava suporte para quatro ou oito vigas (pás) de madeira com comprimentos que variavam entre 3 a 9 metros. Tais vigas eram cobertas com telas ou pranchas de madeira e a energia gerada pelo eixo era transmitida por um sistema de engrenagens. A Figura 5 apresenta modelos desses tipos de moinhos surgidos na Europa.



**Figura 5** - Diversos modelos de moinhos de vento históricos da Europa.

Fonte: Dreamstime (Editado pelos autores). Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/ilustra%C3%A7%C3%A3o-stock-moinhos-de-vento-hist%C3%B3ricos-europeus-ajustados-image79986839>>, acesso em: 09 mar. 2018.

Com o estabelecimento da Física e da Matemática por volta dos séculos XVII e XVIII, a tecnologia dos moinhos de vento foi considerada pela primeira vez pelas emergentes ciências naturais da época (PINTO, 2013).

Por volta do século XVI melhorias significativas foram feitas em moinhos localizados na Holanda de tal maneira que estes passaram a ser vistos como um novo modelo denominado como “moinho holandês” (GODAY DIAS, 2012). Uma dessas melhorias foi a introdução de uma torre fixada ao solo (Figura 5). Devido à boa parte do território holandês está abaixo do nível do mar esses moinhos em sua maioria eram utilizados para a drenagem das terras.

Os moinhos de vento na Holanda tiveram inúmeras aplicações. Em meados do século XIX existiam em funcionamento aproximadamente 9.000 moinhos de vento na Europa. Tal número mostra a importância de seu uso em diversos países como a Bélgica com 3.000 moinhos, Inglaterra com 10 000 e França com cerca de 650 moinhos.

O advento da Revolução Industrial no século XIX trouxe o início da revolução tecnológica e com ela as novas fontes energéticas a vapor e principalmente os combustíveis fósseis, que por sua vez trouxeram o estancamento da produção dos moinhos de vento (LOPEZ, 2012).

Mesmo assim, ainda no século XIX houve uma vasta proliferação de moinhos de vento nos Estados Unidos, vários deles sendo patenteados. O pioneiro foi o mecânico estadunidense Daniel Halladay em 1854, no estado de Connecticut, cujo protótipo inicial possuía quatro pás de madeira e posteriormente um modelo multipás foi desenvolvido em meados de 1929, como mostra a Figura 6.



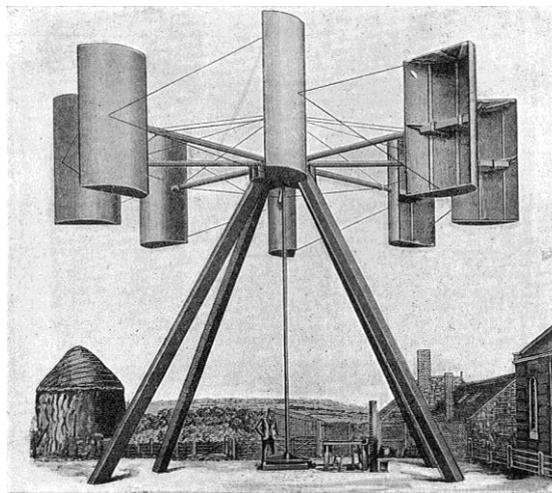
**Figura 6** - Moinho de vento de Daniel Halladay.

Fonte: Diaz (2012). Disponível em: <[http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufrij-pem\\_upl//THESIS/16/pemufrij2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf](http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufrij-pem_upl//THESIS/16/pemufrij2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf)>, acesso em: 09 mar. 2018.

O modelo teve tanto sucesso para bombeamento de água que foi difundido em todo meio rural norte americano, ficando conhecido como o moinho de vento americano (PINTO, 2013).

O primeiro moinho de vento utilizado para geração de energia elétrica foi desenvolvido no fim do século XIX. Segundo Pinto (2013) o escocês, engenheiro eletricitista e professor James Blyth (1839 – 1906) foi responsável pelo primeiro protótipo de um moinho de vento capaz de converter a energia dos ventos em energia elétrica. Tal protótipo foi construído em julho de 1887 na cidade de Glasgow e só em 1891 que James Blyth conseguiu a patente britânica da turbina.

Em um artigo entregue a sociedade filosófica de Glasgow em 2 de maio de 1888, Blyth descreve o moinho de vento. Segundo James Blyth, o moinho possuía uma base em forma de tripé e tinha uma altura de 33 pés, aproximadamente 10 metros (Figura 7). A energia gerada por um dínamo era armazenada em baterias que posteriormente era utilizada para a alimentação de sua residência. A residência de campo de Blyth foi a primeira residência do mundo a ser alimentada por uma turbina eólica.



**Figura 7** - Ilustração do moinho de vento de James Blyth.

Fonte: Wikiwand. Disponível em: <[http://www.wikiwand.com/de/Vertikalrotor\\_\(Windturbine\)](http://www.wikiwand.com/de/Vertikalrotor_(Windturbine))>, acesso em: 09 mar. 2018.

A transição de moinhos de vento para a moderna tecnologia dos aerogeradores deve-se primordialmente ao físico dinamarquês Poul La Cour (1846 – 1908). Foi responsável pelo primeiro desenvolvimento considerável, conseguindo devido à eletricidade produzir hidrogênio através do processo de eletrólise, para a alimentação de lâmpadas de gás (GODAY DIAZ, 2012; LA COUR, 1900). La Cour utilizou pás do tipo vela na construção do seu aerogerador (Figura 8), apesar de ser ciente das vantagens das pás aerodinâmicas.



**Figura 8** - Primeira turbina eólica de Poul La Cour, 1891 Dinamarca.

Fonte: Histenergia. Disponível em: <<http://histenergia.blogspot.com.br/p/cronologia-historica.html>>, acesso em: 09 mar. 2018.

A primeira metade do século XX viu o surgimento de grande parte das turbinas eólicas que influenciaram a tecnologia da atualidade. Turbinas de até 35 KW de potência nominal e com diâmetros de rotor de 20 metros. Tais turbinas já apresentavam caixas multiplicadoras de velocidade para melhorar sua eficiência na transformação da energia do vento em energia elétrica.

### 3.5 CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES

Uma das maneiras de classificar os aerogeradores é através da observação da orientação da parte responsável por captar a energia cinética do vento, o rotor (Figura 9).



**Figura 9** - Demonstração de uma turbina eólica de eixo vertical e uma turbina eólica de eixo horizontal

Fonte: Ebah.com. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABT4QAI/turbinas-eolicas?part=2>>, acesso em: 10 mar. 2018.

As turbinas eólicas podem ser divididas em Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH), ou traduzido para o inglês, *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), que são responsáveis por grande parte da produção de eletricidade advinda da energia eólica e as Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV), ou traduzido para o inglês, *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

### 3.5.1 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

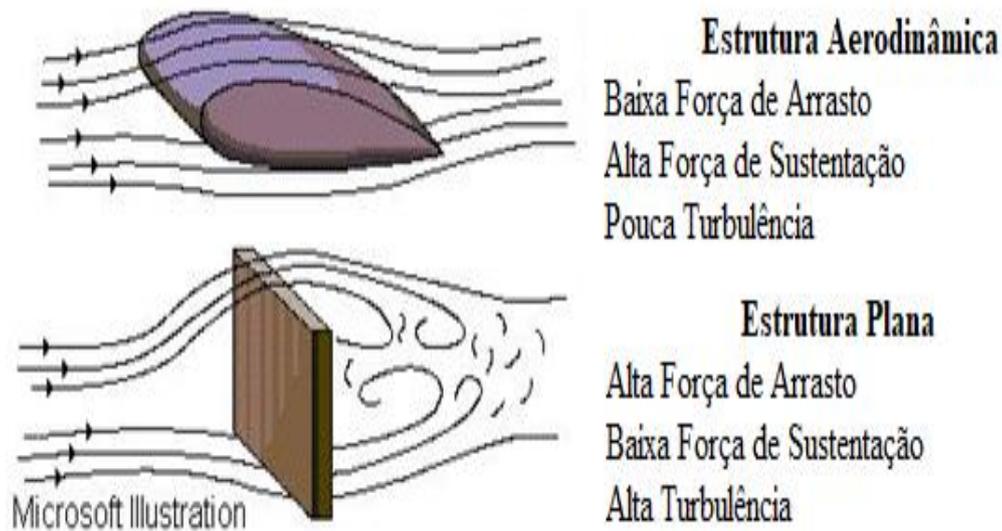
Por serem mais potentes e mais eficientes na produção de energia elétrica, os aerogeradores de eixo horizontal são os mais utilizados no planeta, pois, a velocidade de rotação desses modelos de turbinas eólicas é maior comparada com as turbinas de eixo vertical. Seu eixo de rotação é movimentado prioritariamente por forças aerodinâmicas chamadas de força de sustentação e em segundo plano uma força denominada força de arrasto. Estes rotores podem ser constituídos de uma pá (com um contrapeso), duas pás, três pás (as mais utilizadas) ou múltiplas pás (usado basicamente para bombeamento), conforme pode ser visto na Figura 10.



**Figura 10** - Demonstração de aerogeradores de uma pá, duas pás, três pás e múltiplas pás.

Fonte: ebah.com. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgIT0AC/centrais-solares-eolicas?part=2>>, acesso em: 10 mar. 2018.

A sustentação é uma força aplicada em um objeto imerso em um fluido em movimento e atua perpendicularmente na direção do fluxo do fluido (Figura 11). A força de arrasto pode ser explicada da mesma forma, com uma diferença. A força de arrasto atua paralelamente ao fluxo do fluido (RIBEIRO, 2011). Ambas as forças são proporcionais ao quadrado da velocidade do vento. E a força de sustentação depende primordialmente da geometria do corpo e do ângulo de ataque.



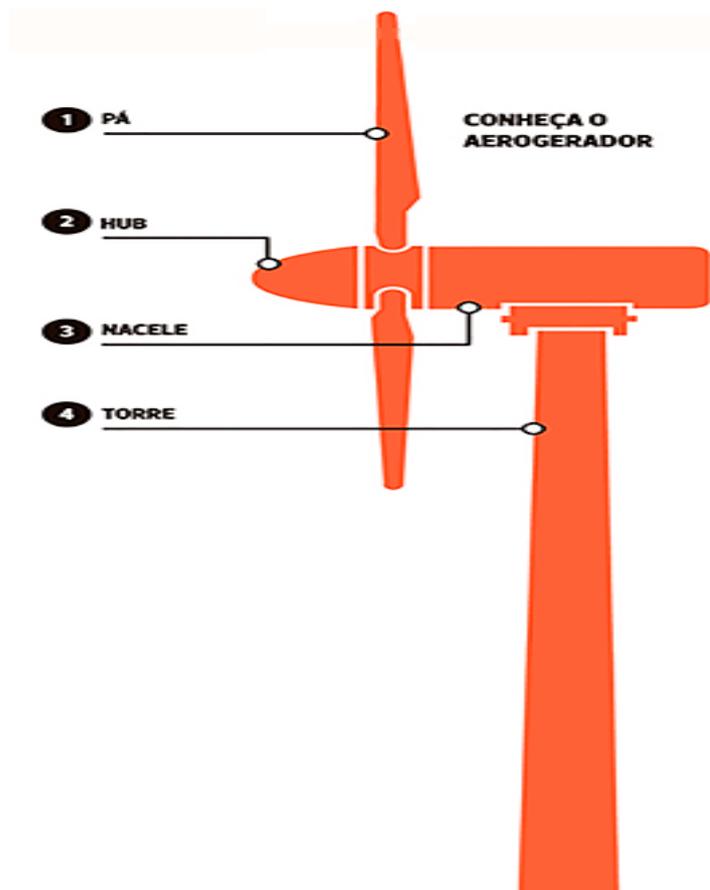
**Figura 11** - Representação do fluxo de ar sobre estruturas diferentes e suas respectivas forças atuantes.

Fonte: meioambiente.culturamix (Editada pelos autores). Disponível em:

<<http://meioambiente.culturamix.com/natureza/arrasto-aerodinamico-caracteristicas-gerais>>, acesso em: 10 mar. 2018.

As turbinas eólicas de eixo horizontal também podem ser classificadas de acordo com a orientação do rotor em relação à incidência do vento. São elas *upwind* e *downwind*. Quando o vento incide na parte dianteira da turbina ela será *upwind*, mas se o vento incide na parte traseira da área de varredura da turbina, ela será *downwind*. As turbinas *downwind* ajustam-se naturalmente a orientação do vento, porém tem o problema de efeito de sombra causado pela torre em umas das pás. Esse efeito causa o aumento dos ruídos, flexão das pás e conseqüentemente reduz a potência de saída da turbina. Já a *upwind* necessita de um complexo sistema de orientação do rotor para a captação da melhor incidência de vento. Entretanto as turbinas desse modelo trabalham de forma mais suave e conseqüentemente fornecendo mais potência (PINTO, 2013).

A Figura 12 a seguir demonstra os principais componentes de uma turbina de eixo horizontal. São eles: As pás, responsáveis por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional; O hub (ou cubo), onde fica localizado o rotor de baixa rotação responsável por transferir a energia mecânica rotacional para o gerador ou a caixa multiplicadora de velocidade; A nacelle, responsável por abrigar equipamentos como gerador e caixa multiplicadora de velocidade; e a torre, que tem como função sustentar todo o peso da nacelle e das pás.



**Figura 12** - Representação dos principais componentes de uma turbina eólica.

Fonte: Guiadotrc. Disponível em: <<http://www.guiadotrc.com.br/noticias/noticiaid.asp?id=32173>>, acesso em: 10 mar. 2018.

A seguir serão apresentadas algumas das vantagens e desvantagens de turbinas eólicas de eixo horizontal segundo Pinto (2013).

São as vantagens:

- Acesso a ventos de maiores velocidades devido à altura da torre.
- Melhor controle devido ao ajuste do ângulo de passo.
- Alta eficiência, uma vez que as pás enfrentam perpendicularmente o vento.

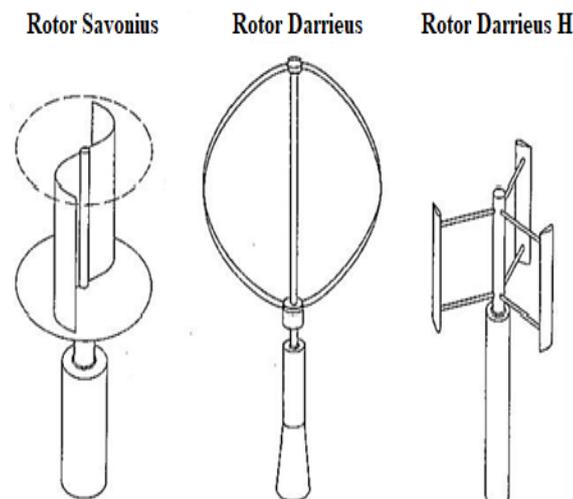
São as desvantagens:

- Dificuldade para a instalação de uma torre.
- Dificuldade no transporte dos equipamentos, devido à grande extensão.
- Exigência de um sistema de controle para a orientação das pás em direção ao vento.
- Construção complexa da torre para sustentar o peso das pás, do rotor e da nacele.

### 3.5.2 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

Os primeiros projetos de moinhos de vento para o aproveitamento da energia contida no deslocamento das massas de ar destacavam-se por seu eixo de orientação ser vertical. Ou seja, o eixo de rotação está na mesma direção da torre que suporta o peso das pás, nesse tipo aerogerador.

Há vários tipos de turbinas de eixo vertical atualmente no mercado (Figura 13). Cada uma delas com suas peculiaridades e características de funcionamento. A principal característica desse tipo de aerogerador, além do eixo de rotação está orientado na vertical é que a parte de engrenagens e gerador fica localizado no solo. Não havendo assim a necessidade de construção de uma torre mais robusta para a sustentação do sistema de geração. Outra peculiaridade desse tipo de turbina são suas vibrações excessivas devido a estar localizada mais próxima ao solo, recebendo a incidência de ventos mais turbulentos devido a rugosidade da superfície.



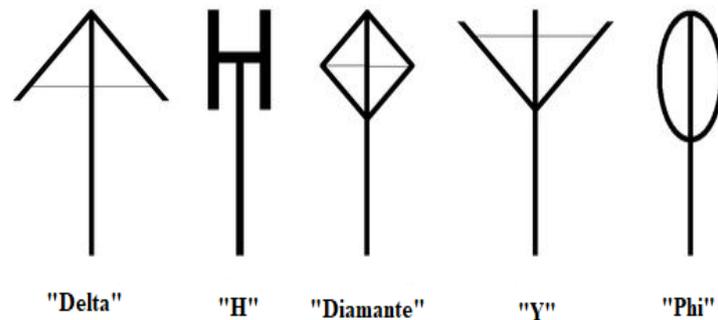
**Figura 13** - Representação das turbinas eólicas de eixo vertical do tipo Savonius, Darrieus e Darrieus H.

Fonte: alvaro.lima (Editado pelos autores). Disponível em:

<<http://alvaro.lima.vieira.50megs.com/aerogeradoresusinaseolicas.html>>, acesso em: 10 mar. 2018.

Segundo Tibola (2009) existem vários modelos de turbinas eólicas de eixo vertical, sendo a Savonius e Darrieus como as mais conhecidas. O rotor Darrieus apresenta o melhor rendimento entre as turbinas de eixo vertical. Já foi bastante utilizado para a geração de energia elétrica. Seu maior rendimento se deve ao fato de que suas pás curvas fixadas as pontas do eixo, possuem perfis aerodinâmicos, tendo como a principal força de movimento de seu eixo a força de sustentação. Uma das principais características deste tipo de máquina é

que ela necessita de um motor de partida para vencer a inércia, já que possui grande deficiência nesse quesito (PINTO, 2013). Ainda segundo Pinto (2013) existem diversos outros formatos de turbinas Darrieus (Figura 14), além da sua configuração principal em forma de  $\phi$ .



**Figura 14** - Diferentes Tipos de Geometrias da Turbina Eólica Darrieus.

Fonte: Vawtturbine (Editado pelo autor). Disponível em: <<https://vawtturbine.wordpress.com/>>, acesso em: 10 mar. 2018.

Na teoria a turbina Darrieus possui o mesmo desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal, porém na prática isso não ocorre. Tal queda no desempenho se deve a vários fatores, incluindo variação de velocidade do vento, regime de vento turbulento devido sua proximidade ao solo e a queda da força de sustentação devido a constante variação do ângulo de ataque das pás (GODOY DIAZ, 2012).

Apesar da menor eficiência comparada com as turbinas de eixo horizontal, as turbinas eólicas de eixo vertical possuem vários pontos positivos. Segundo Cardoso e Ferreira (2015) podem-se citar como características positivas das TEEVs:

- Caixa de engrenagens e gerador próximo ao solo. Isso em geradores de grandes dimensões diminui o custo da instalação, além de facilitar a manutenção.
- As TEEVs podem ser agrupadas umas próximas das outras.
- A estrutura do rotor de uma TEEV, geralmente, é menos complexa comparada com as TEEHs. O que facilita na montagem e manutenção desses equipamentos.

Cardoso e Ferreira (2015) também explanam alguns pontos negativos das TEEVs, os quais se destacam:

- Baixo rendimento comparado às TEEHs.
- Está sujeita a ventos turbulentos, devido à proximidade de suas pás ao solo.
- Apresenta alto índice de vibrações devido às forças que atuam sobre seu eixo.

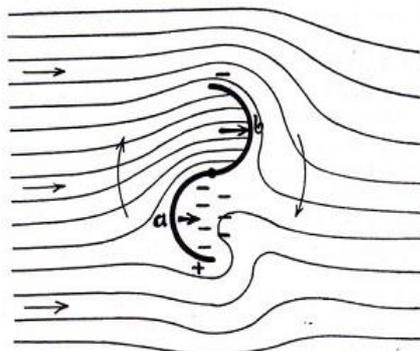
### 3.6 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL SAVONIUS

O rotor Savonius (Figura 15) foi desenvolvido e apresentado em 1926 pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius (1884 – 1931). Este modelo de turbina eólica já havia tentado ser construído pelo alemão Johann Ernst Elias Bressler (1680 – 1745), em Fusrtenburg, Alemanha (PINTO, 2013). Savonius descreve sua obra no livro *The wing-rotor in theory and practice – published by Savonius & Co. Helsingfors* de sua autoria publicado em 1926.



**Figura 15** - Demonstração do rotor Savonius.  
Fonte: Savonius (1926).

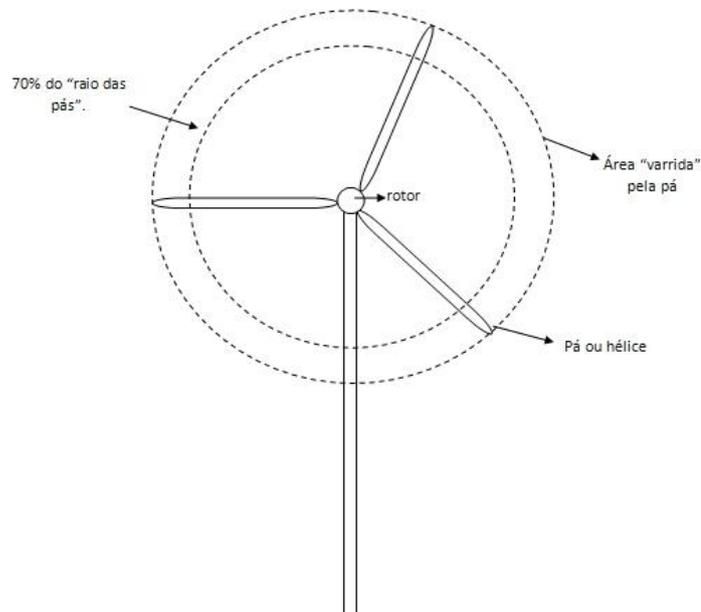
O rotor Savonius é um modelo de fácil construção, podendo ser utilizado como estrutura de suas pás e um barril cortado ao meio. Esse tipo de rotor é constituído por dois semicilindros, um côncavo e outro convexo, inserido em um eixo vertical. Desta forma, segundo Câmara Corona (2016), o vento atinge as pás resultando numa diferença de forças de arrasto entre a parte côncava e a parte convexa. Assim surgindo um momento de força que faz girar a turbina, como expõe a Figura 16.



**Figura 16** - Demonstração da ação do vento nas diferentes superfícies da pá.  
Fonte: Savonius (1926).

A turbina Savonius é comumente utilizada para bombeamento de poços e ventilação, além de servir como carregador de baterias em faróis marítimos. Tal utilização se deve principalmente devido a sua baixa potência, que está ligada intrinsecamente à relação de velocidade de ponta de pá ou do inglês *Tip Speed Ratio* (TSR) e sua solidez, que neste caso não tem nenhuma ligação com rigidez do material ou sua resistência mecânica.

A solidez de uma turbina eólica é a relação entre a área total das pás e 70% da área de varredura das pás, conforme a Figura 17. A solidez de uma turbina eólica é o que refere características importantes das turbinas, tais como: capacidade de gerar potência a determinadas velocidades de vento, o quão ela é indicada para geração de eletricidade, custo do sistema, entre outros.



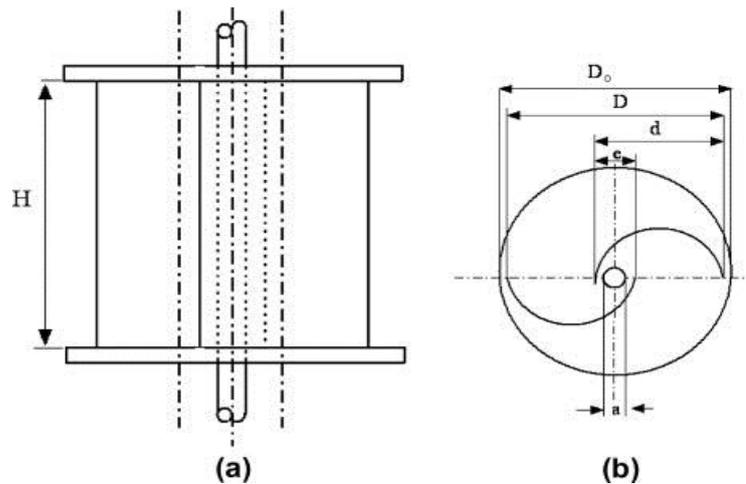
**Figura 17** - Representação da solidez no sistema eólica.

Fonte: Infoescola.com. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/tecnologia/solidez-energia-eolica/>>, acesso em: 10 mar. 2018.

Turbinas de alta solidez possuem alto coeficiente de potência ( $C_p$ ) em baixas velocidades de rotação o qual é inversamente proporcional a TSR devido ao efeito cascata. Segundo Alé (2012) a solidez de uma turbina é dada conforme a Equação (11).

$$\sigma = \frac{\text{Área Total das Pás}}{\text{Área de Varredura das Pás}} \quad (11)$$

No caso da TEEV Savonius a área total das pás é praticamente a mesma da área de varredura, como mostra a Figura 18.



**Figura 18** - Vista frontal (a) e vista superior (b) de um rotor Savonius.

Fonte: ResearchGate.net. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-a-single-stage-Savonius-rotor-a-elevation-view-b-plan-view\\_fig3\\_257497943](https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-a-single-stage-Savonius-rotor-a-elevation-view-b-plan-view_fig3_257497943)>, acesso em: 10 mar. 2018.

A área de varredura de um rotor Savonius é dada conforme a Equação (12):

$$A_{\text{varredura}} = H * D \quad (12)$$

Onde  $A_{\text{varredura}}$  é a área de varredura do rotor Savonius,  $H$  é a altura das pás e  $D$  é o diâmetro total do rotor, dado pela Equação (13).

$$D = 2d + e \quad (13)$$

Onde  $d$  é o diâmetro de uma das pás do gerador e o símbolo  $e$  representa a relação de superposição. Já a área das pás é dada conforme a Equação (14).

$$A_{\text{pás}} = 2d * H \quad (14)$$

Assim a solidez da turbina Savonius é representada conforme a Equação (15).

$$\sigma = \frac{2d * H}{(2 * d + e) * H} \quad (15)$$

Em casos onde o diâmetro do eixo do rotor for muito menor que o diâmetro das pás, seu valor descartável. Dessa forma o valor da solidez de uma Savonius é muito próximo a um.

Outro fator importante para rendimento de uma turbina eólica é a TSR. Se o rotor se mover muito lentamente boa parte do vento passará pelas lâminas sem que seja aproveitada sua energia cinética. Por outro lado, se o rotor se mover rápido demais as pás atuarão como uma barreira, oferecendo resistência para a passagem do vento. Por isso a relação de velocidade de ponta de pá deve ser meticulosamente calculada de forma a ter sua melhor extração de potência.

O TSR é a relação entre a velocidade da lâmina e a velocidade do vento. E Segundo Câmara Corona (2016) é definida pela Equação (16), Onde  $\lambda$  é a relação de velocidade de ponta de pá,  $\omega$  é velocidade angular do rotor,  $R$  é o raio do rotor dado em metros (m) e  $V$  a velocidade do vento ( $\frac{m}{s}$ ).

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V} \quad (16)$$

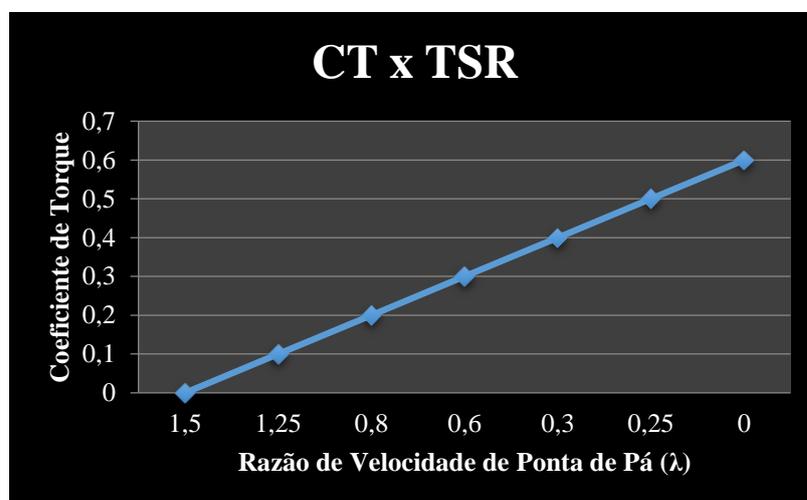
Tendo uma turbina Savonius com uma altura  $H$  sendo atingida por uma velocidade de vento  $v$  o coeficiente de potência ( $C_p$ ), que é a relação entre a potência extraída do vento e a potência disponível pelo vento, poderá ser calculada (Equação 17).

$$C_p = \frac{P_{ext}}{P_{disp}} \quad (17)$$

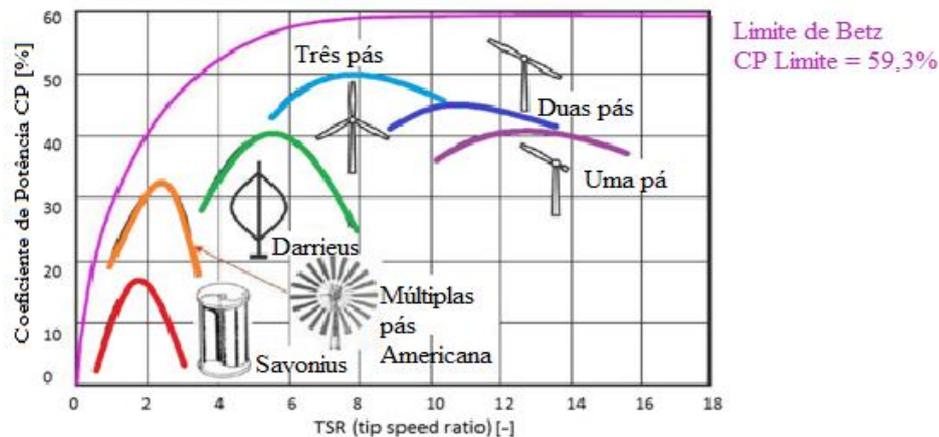
Assim como o  $C_t$  é o coeficiente de torque (CT) (Equação 18) (ALÉ, 2012).

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A v^2 R} \quad (18)$$

Onde  $C_p$  é o coeficiente de potência (CP),  $P_{ext}$  se refere a potência extraída do vento,  $\rho$  a densidade do vento,  $A$  representa a área de varredura do rotor Savonius,  $v$  é a velocidade do vento e  $R$  é o raio dado em metros. Tanto o coeficiente de potência, quanto o coeficiente de torque mudam conforme o modelo de turbina. Cada modelo de turbina possui suas particularidades de TSR, CP, CT entre outros, conforme está representado nas Figuras 19 e 20.



**Figura 19** - Representação do Coeficiente de Torque em Função da TSR.  
Fonte: Alé (2012) (Editado pelo autor).



**Figura 20** - Demonstração dos valores de Cp de acordo com a variação da  $\lambda$ .

Fonte: Vinícius Almeida, LinkedIn (Editado pelo autor). Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/como-otimizar-produ%C3%A7%C3%A3o-e%C3%B3lica-vin%C3%ADcius-almeida>>, acesso em: 10 mar. 2018.

Em uma turbina Savonius é de fundamental importância o coeficiente de arrasto, devido a este modelo de turbina trabalhar especificamente por forças de arrasto. O coeficiente de arrasto é a força que atua sobre um corpo sólido na direção relativa do fluxo do fluido. Segundo Câmara Corona (2016), tal coeficiente é dado pela Equação 19, onde  $Cd$  é o coeficiente de arrasto,  $Fd$  a força de arrasto sobre o corpo,  $\rho$  a densidade do fluido,  $A$  respectiva área de varredura das pás e  $v$  é a velocidade do vento.

$$Cd = \frac{Fd}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho Av^2} \quad (19)$$

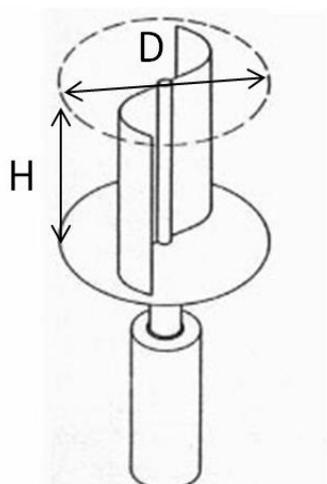
Outro parâmetro estrutural que influencia no rendimento do gerador é a relação de sobreposição das pás dado pela letra grega  $\beta$ , representado na Equação 20 a seguir.

$$\beta = \frac{e}{d} \quad (20)$$

Sendo  $e$  o diâmetro do rotor e  $d$  o diâmetro das pás. Assim como a relação de sobreposição a relação de aspecto é muito importante para o rendimento da turbina Savonius. A relação de aspecto é indicada pela ligação da altura do rotor em relação ao seu diâmetro. Tal relação é dada pela Equação (21).

$$\alpha = \frac{H}{D} \quad (21)$$

Onde  $\alpha$  é a relação de aspecto,  $H$  é a altura das pás e  $D$  o diâmetro do rotor, conforme a Figura 21.



**Figura 21** - Representação das variáveis do rotor Savonius para a relação de aspecto.

Fonte: Ebah.com (Editado pelos Autores). Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABT4QAI/turbinas-eolicas?part=2>>, acesso em: 10 mar. 2018.

#### 4. METODOLOGIA

Este trabalho de conclusão de curso pode ser caracterizado como uma atividade de pesquisa investigativa aplicada, uma vez que está associada ao desenvolvimento de um sistema de geração eólica através de micro-aerogerador do tipo Savonius. De acordo com Barros e Lehfeld (2000), esse tipo de pesquisa visa contribuir para fins práticos e tem como estímulo a necessidade de gerar conhecimento para aplicação de seus resultados, buscando soluções ou necessidades concretas e imediatas. Estes resultados serão obtidos a partir de um protótipo desenvolvido nas instalações do IFRN – *Campus* João Câmara, submetido às condições de vento da referida cidade. A opção por esta metodologia ocorreu em consonância com os objetivos de nosso estudo.

A construção desse protótipo ocorreu em nove etapas distintas:

- a) Definição da temática e do objetivo da pesquisa;
- b) Levantamento bibliográfico e seleção de obras correlacionadas à temática do trabalho;
- c) Avaliação, do potencial de geração eólico da localidade, a partir do banco de dados do *website* Meteoblue;
- d) Especificação e aquisição dos materiais requeridos;
- e) Montagem do protótipo;
- f) Desenho do projeto no *software* AutoCAD 2018;
- g) Verificação da estabilidade do conjunto e execução de testes gerais;
- h) Aquisição e tabulação dos dados;

i) Exposição dos resultados.

Inicialmente, ocorreu a definição da temática de estudo, realizada através da observação de textos técnicos, expondo o uso da tecnologia de sistemas eólicos de pequeno porte para o aproveitamento eficiente de ventos em pequenas altitudes. Assim, foi realizado um estudo de caráter geral e introdutório sobre os relatos de testes com o protótipo micro-aerogerador do tipo Savonius. Esse tipo de pesquisa é classificado como pesquisa qualitativa, como afirma Gil (2002), tal abordagem não utiliza o uso de métodos e técnicas estatísticas. Apresenta o objetivo de “produzir informações aprofundadas e ilustrativas: sejam elas pequenas ou grandes, o que importa é que elas sejam capazes de produzir novas informações” (DESLAURIERS, 1991, p. 58).

Durante a segunda etapa foi realizado o levantamento bibliográfico, visando a seleção de obras correlacionadas com a temática escolhida, afim de obter informações precisas e relevantes para alicerçar as etapas subsequentes. Os instrumentos consultados na elaboração da pesquisa foram: artigos, sites, vídeos, livros, entre outros. Segundo Lakatos e Marconi (1996), tal pesquisa visa levantar informações, por meio de fatos e fenômenos, na coleta de dados referentes e registro de variáveis importantes para o efeito de análise.

A pesquisa bibliográfica, considerada uma fonte de coleta de dados secundária, pode ser definida como: contribuições culturais ou científicas realizadas no passado sobre um determinado assunto, tema ou problema que possa ser estudado (CERVO e BERVIAN, 2002; LAKATOS e MARCONI, 2001).

A terceira etapa do projeto consistiu na avaliação do potencial de geração eólica na localidade. Visando obter acesso ao banco de dados meteorológicos, especificamente ao perfil dos ventos, foi utilizado o site de acesso gratuito Meteoblue, a fonte de dados mais completa encontrada durante o levantamento de dados. Assim, foi possível obter as informações relevantes de velocidade e variação dos ventos da região, chegando-se a um resultado satisfatório para a construção do projeto.

A quarta etapa foi consistida pelo estudo e seleção igualmente minuciosos de ferramentas e materiais necessários, visando a construção do protótipo. Para a seleção dos outros materiais foram levados em consideração os seguintes critérios: preço, funcionalidade e desempenho, respectivamente. Algumas das peças utilizadas nesse protótipo foram obtidas através do *Campus*. A partir deste momento, o projeto deixa de ter uma caracterização de pesquisa bibliográfica e passa a ter um aspecto mais experimental, onde são descritas todas as

etapas utilizadas para o desenvolvimento do protótipo do micro-aerogerador do tipo Savonius nas instalações do IFRN, *Campus João Câmara*.

De acordo com Gil (2002), o experimento é considerado o melhor exemplo de pesquisa científica. A pesquisa experimental constitui o delineamento mais prestigiado nos meios científicos. Ainda segundo o autor, “consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2002, p. 47).

A montagem do protótipo ocorreu durante a quinta etapa do projeto e foi baseada nos estudos e pesquisas realizados nas etapas anteriores.

Após a montagem, a sexta etapa consistiu na realização do desenho técnico com todas as dimensões e perspectivas possíveis do protótipo, utilizando o *software* AutoCAD 2018, visando apresentar detalhes essenciais projetados após a execução do projeto e auxiliar em futuras modificações para a realização de melhorias. Foram feitos dois desenhos técnicos do protótipo onde o primeiro apresenta a vista frontal e superior representados no Apêndice A, enquanto no Apêndice B está apresentado o desenho técnico do protótipo com a vista 2D.

A sétima etapa do projeto consistiu na implementação do protótipo, onde foram executados testes gerais através da submissão do protótipo às condições de vento da localidade para a verificação da estabilidade do conjunto e análise de possíveis melhorias a serem feitas, mas principalmente visando a obtenção de resultados.

Com a montagem e execução do protótipo, a oitava fase consistiu na aquisição e tabulação dos dados obtidos através da observação e medição de seu funcionamento. Esse tipo de pesquisa em relação ao experimento tem propriedade descritiva, onde “pode-se dizer que ela está interessada em descobrir e observar fenômenos, procurando descrevê-los, classificá-los e interpretá-los” (VIEIRA, 2002, p.65).

A nona e última etapa teve como finalidade expor os resultados adquiridos através do desempenho do protótipo. Segundo Fonseca (2002) “os efeitos observados são relacionados com as variações nos estímulos, pois o propósito da pesquisa experimental é apreender as relações de causa e efeito ao eliminar explicações conflitantes das descobertas realizadas” (FONSECA, 2002, p. 38).

A pesquisa em relação ao protótipo tem abordagem descritiva. Esse tipo de pesquisa “pode ser entendido como um estudo de caso onde, após a coleta de dados, é realizada uma análise das relações entre as variáveis para uma posterior determinação dos efeitos resultantes em uma empresa, sistema de produção ou produto” (SOUZA e FEY, 2008, p.14).

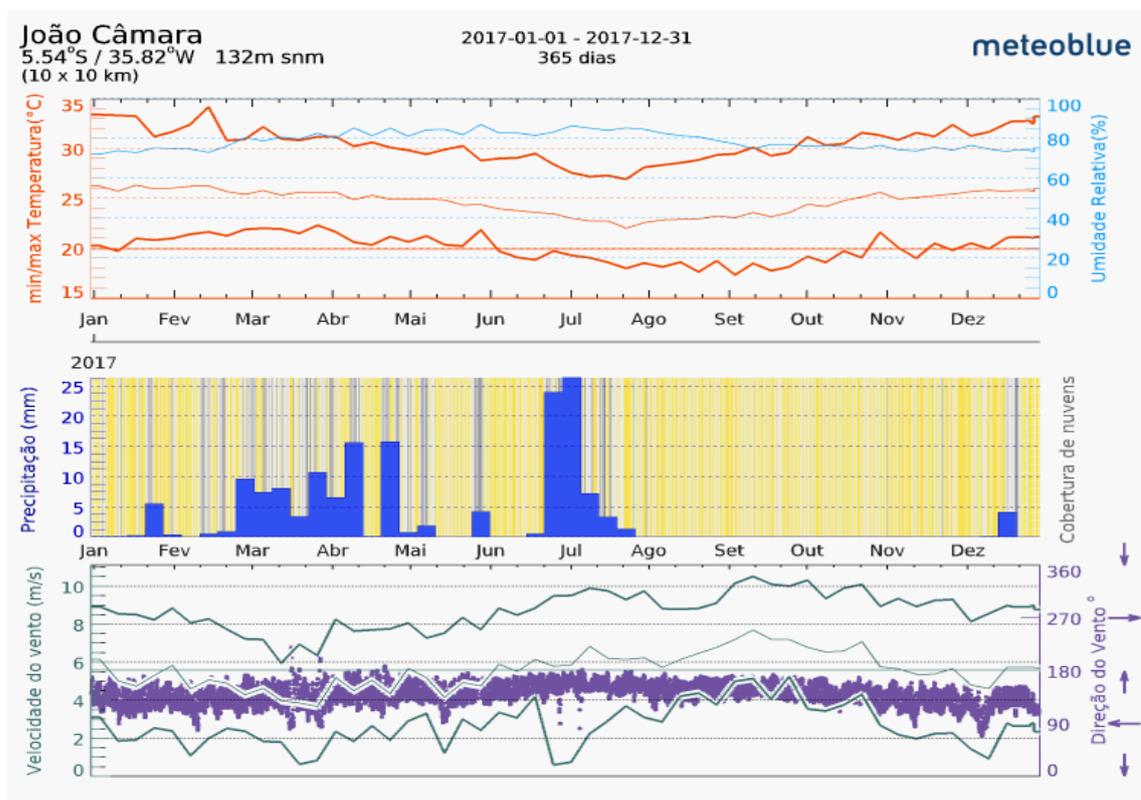
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 DADOS METEOROLÓGICOS DA LOCALIDADE

Para o desenvolvimento e construção do protótipo da turbina eólica do tipo Savonius, dados meteorológicos da cidade de João Câmara, Rio Grande do Norte, foram obtidos a partir do banco de dados do *website* Meteoblue, com a finalidade de analisar o potencial de geração eólico na localidade.

A Figura 22 apresenta as informações da meteorologia local em 2017, em três gráficos. Em ordem de cima para baixo, são eles: temperatura (°C), precipitação (mm) e velocidade do vento (m/s).

Como a atuação do vento muda de acordo com as mudanças climáticas, a temperatura torna-se uma variável importante a ser avaliada. Podemos constatar, através da Figura 22, que o período de maior temperatura apresentada foi entre os meses de janeiro a março, já o período de menor temperatura foi entre os meses de junho a outubro e que a média da umidade relativa do ar foi de aproximadamente 80%.



**Figura 22** - Dados Meteorológicos da localidade em 2017.

Fonte: Meteoblue (2017). Disponível em: <[https://www.meteoblue.com/pt/tempo/previsao/archive/joão-câmara\\_brasil\\_3397315?fcstlength=1y&year=2017&month=4](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/previsao/archive/joão-câmara_brasil_3397315?fcstlength=1y&year=2017&month=4)>, acesso em: 09 mar. 2018.

No gráfico relacionado com a precipitação que corresponde à quantidade de água sob a forma de chuva, neve, gelo ou granizo para a superfície da terra, as nuvens são representadas pelas partes cinza e quanto mais escuras, mais densa a cobertura de nuvens. O período mais nublado foi entre os meses de fevereiro a junho. As partes amarelas correspondem ao céu limpo, no qual, aparecem mais predominantes no período entre agosto a dezembro. O período chuvoso na região foi entre os meses de fevereiro a maio, porém o mês de julho apresentou 25 mm de precipitação.

No gráfico relacionado a velocidade do vento, as direções estão representadas em graus, onde  $0^\circ$  é o Norte,  $90^\circ$  é o Leste,  $180^\circ$  o Sul e  $270^\circ$  o Oeste. Os pontos roxos representam a direção predominante do vento da localidade. Podemos afirmar através do gráfico que a direção do vento varia entre leste e sudeste e a velocidade do vento varia entre 4 a 6 m/s.

Após avaliar as condições, o potencial de geração eólica local mostrou-se bastante satisfatório para a implementação do projeto.

## 5.2 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo apresenta simplicidade na construção e montagem tendo como ponto principal o baixo custo relacionado a materiais. Sua construção foi realizada em 5 etapas, foram elas: Base do rotor, gerador, construção do rotor, multiplicador de velocidade e parte elétrica.

### 5.2.1 Base do rotor

Segundo Ôlo (2012), uma Savonius com dois andares apresenta vantagens como, por exemplo, um momento de arranque inicial menor o que torna mais estável o rotor no arranque. No entanto, por falta de recursos e disponibilidade de materiais para a construção de uma estrutura de dois andares para o protótipo, a estrutura da turbina foi projetada com um andar apenas.

Para a construção da base do rotor foi procurado materiais acessíveis e resistentes que suportassem tanto os esforços exercidos pela turbina, quanto efeitos das condições climáticas da localidade. Uma estrutura composta por materiais metálicos seria o ideal, porém por falta de recursos e ferramentas para a montagem, esta opção foi inviabilizada. A alternativa

encontrada foi a utilização de uma estrutura de caixa de som feita de madeira apresentada na Figura 23.



**Figura 23** - Estrutura de caixa de som de madeira.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

A caixa tem as seguintes medições: 50 centímetros (cm) de altura, 89 cm de comprimento e 35 cm de largura. O objetivo desta estrutura é de dar suporte ao eixo do rotor, gerador, sistema de engrenagens e parte elétrica. Além de suportar os esforços mecânicos causados pela força do vento, ao qual fazia a estrutura vibrar.

Foi adicionada uma peça de madeira com 2 cm de espessura, 86 cm de comprimento e 12 cm de largura. Tal peça foi adicionada para sustentar o sistema de engrenagens de tal maneira que ficasse alinhado com o eixo do gerador, como demonstrado na Figura 24.



**Figura 24** - Peça de madeira acoplada ao centro da estrutura.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Visando melhorar a circulação do ar, afim de minimizar a temperatura interna da estrutura de suporte do rotor, tal como o gerador, foram feitas aberturas na parte traseira da caixa como pode-se observar na Figura 25.



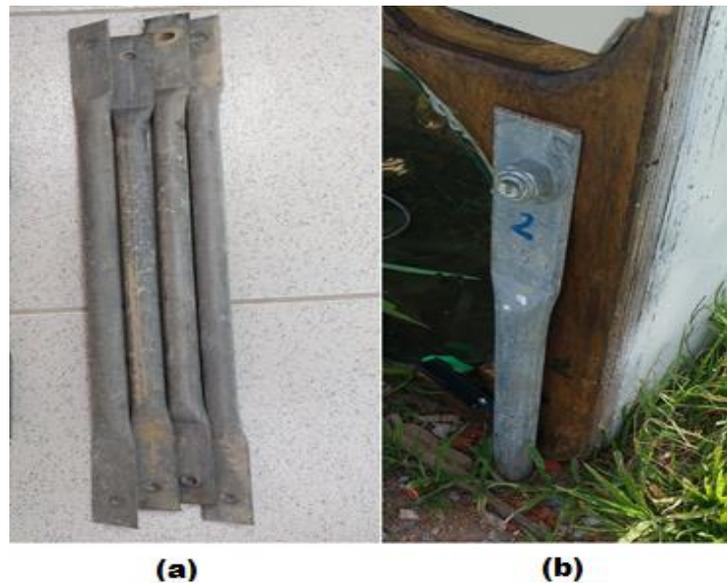
**Figura 25** - Aberturas para a circulação do ar.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Como a estrutura ficaria submetida às condições climáticas da localidade, medidas preventivas foram tomadas a fim de evitar danos aos componentes e a estrutura. Uma das preocupações foi evitar que a chuva afetasse os componentes dentro da caixa de madeira como o multiplicador de velocidade e o gerador, o que ao longo do tempo poderia ocasionar a oxidação desses componentes, assim como danificar a parte elétrica. Para evitar tal problema foi inserido duas peças circulares com 36 cm de diâmetro (Figura 26(a)) nas aberturas frontais da caixa. Estas estruturas de vidro foram suportadas por peças de plásticos, conforme a Figura 26(b).



**Figura 26** - (a) Peças de vidro, (b) Travas.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

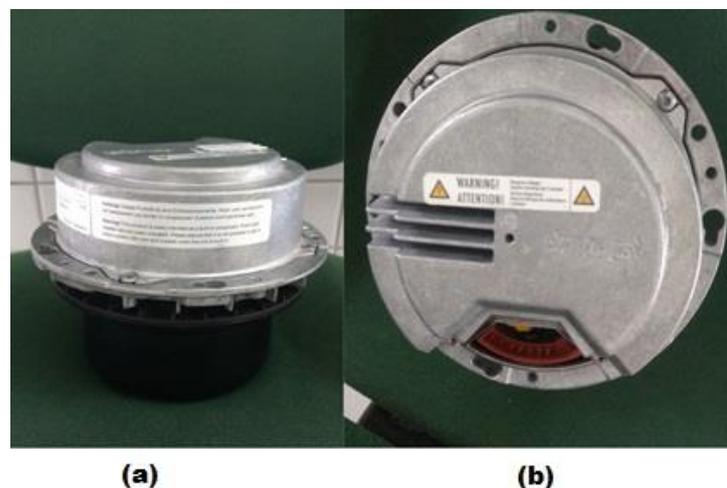
Para evitar as trepidações devido às forças atuantes no rotor o que afetaria o desempenho da turbina foi necessário estaiar a estrutura ao solo. Para isso foi utilizado quatro hastes de alumínio de 65 cm de altura, apresentadas na Figura 27(a), parafusadas no centro da estrutura e fixadas a 35 cm no solo como apresentado na Figura 27(b).



**Figura 27** - (a) Hastes de aço, (b) haste de aço fixando a estrutura ao solo.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

### 5.2.2 Gerador

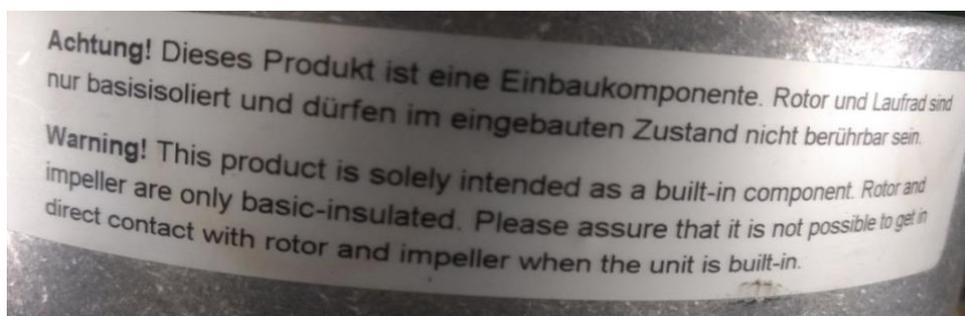
As Figuras 28(a) e 28(b) apresentam o gerador utilizado no protótipo antes das adaptações realizadas.



**Figura 28** - (a) Gerador, (b) vista superior do gerador.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

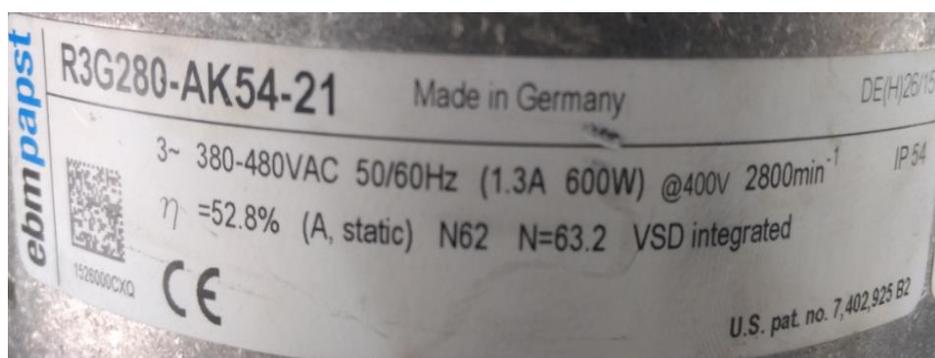
Segundo Washington Júnior, professor e eletrotécnico que trabalha na manutenção em aerogeradores e foi responsável pela doação desse motor gerador, esta peça é um dos componentes responsáveis pelo sistema de refrigeração da parte de placas eletrônicas de torres eólicas.

No rótulo do gerador encontra-se um trecho relacionado as características desse componente no sistema de refrigeração, apresentado originalmente na Figura 29. A seguir a tradução deste trecho: “Atenção! Este produto destina-se apenas como um componente incorporado. O rotor e o impulsor são apenas de isolamento básico. Certifique-se de que não é possível entrar em contato direto com o rotor e o impulsor quando a unidade é embutida” (Tradução nossa).



**Figura 29** - Rótulo do gerador.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Podemos analisar o gerador a partir da sua folha de dados (*datasheet*) apresentado na Figura 30.



**Figura 30** - Ficha de especificações do gerador.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

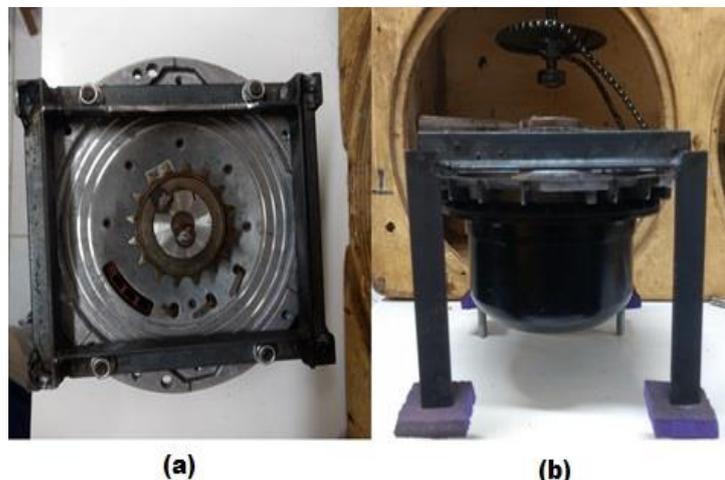
Segundo sua folha de dados apresentados na Figura acima, o motor gerador é trifásico, podendo gerar até 480 Volts (V). Este pode gerar uma corrente alternada de até 1,3 Amperes

(A). Apresenta também uma potência de até 600 Watts (W) e um rendimento consideravelmente baixo de 52,8%, porém satisfatório para o projeto.

Foram realizadas duas adaptações no gerador. Para realização destes ajustes foi necessário contar com o serviço de um torneiro mecânico por falta de equipamentos necessários nas instalações do instituto.

A primeira modificação realizada pelo profissional se deu através da retirada da tampa superior do gerador fixada com parafusos, como apresentada na Figura 28(b). Em seguida seu eixo foi retirado com a prensa hidráulica e aumentado em 3 cm, após inserido novamente ao gerador, em sua extremidade foi soldado uma catraca de 16 dentes que compõe o sistema multiplicador de velocidade, como podemos observar na Figura 31(a).

A segunda modificação foi a construção de uma caixa de suporte feita de cantoneira de ferro de  $1 \times \frac{1}{8}$ . A caixa tem as seguintes medições: 20 cm de comprimento, 18 cm de largura e 18,5 cm de altura. Em suas extremidades foram soldados partes de uma barra roscada para fixar o gerador a estrutura da caixa, como apresentado na Figura 31(b).

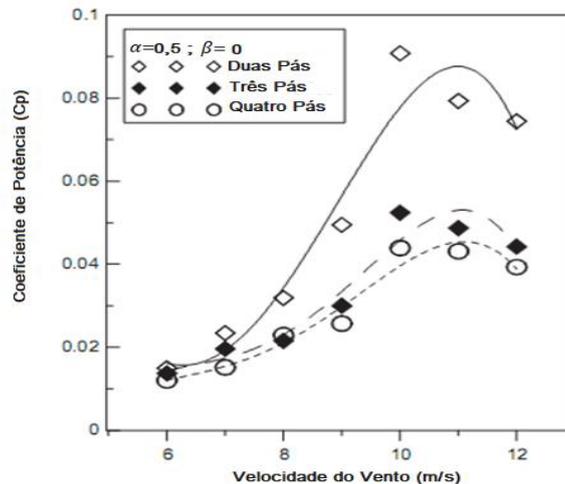


**Figura 31** - (a) Vista superior da caixa e da catraca acopladas ao gerador, (b) vista lateral.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

### 5.2.3 Construção do Rotor

O desenvolvimento do protótipo teve como base os estudos realizados por Mahmoud et al. (2012) para avaliar a melhor geometria para rotores de eixo vertical do tipo Savonius. Foram feitos testes com rotores de duas, três e quatro pás. Com um ou dois estágios. Com valores de sobreposição de 0, 0,2, 0,25, 0,3 e 0,35 e relação de aspecto de 0,5, 1, 2, 3, 4 e 5. Além da existência ou não de placas de extremidades.

O modelo selecionado para a construção do rotor da turbina eólica do tipo Savonius, também denominado de rotor tipo S, foi o modelo de duas pás. Que segundo Mahmoud et al. (2012) possui coeficiente de potência maior em relação a rotores de três e quatro pás (Figura 32), devido a força de arrasto que incide no rotor ser superior em relação aos demais, proporcionando a este uma maior potência mecânica.



**Figura 32** - Relação entre o coeficiente de potência e a velocidade do vento para rotores com duas, três e quatro lâminas.

Fonte: Mahmoud et al. (2012) (Editado pelos autores).

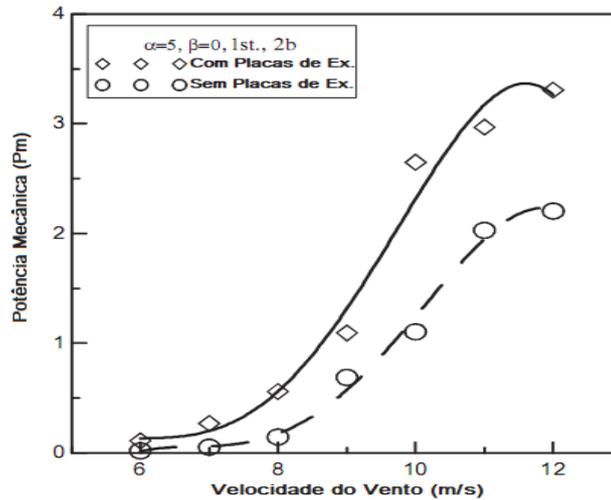
Inicialmente as pás do protótipo foram construídas a partir de uma lata de óleo de 20 litros, apresentada na Figura 33(a). Esta foi cortada verticalmente ao meio, como apresentado na Figura 33(b), com a ferramenta serra mármore conhecida popularmente como makita. As pás demonstradas na imagem abaixo possuem 34 cm de altura por 29,5 cm de diâmetro.



**Figura 33** - (a) Balde de óleo, (b) pás do protótipo.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para um melhor desempenho da turbina, foi adicionado ao rotor placas de extremidades com a finalidade de proporcionar maior potência mecânica, conforme mostrado na Figura 34.



**Figura 34** - Variação da potência mecânica em relação a velocidade do vento para rotores com e sem placas de extremidades.

Fonte: Mahmoud et al. (2012)(Editado pelos autores).

Segundo Mahmoud et al (2012) a existência de placas finais aumenta a quantidade de ar que atinge as lâminas do rotor Savonius proporcionando uma maior potência mecânica comparada a rotores que não possuem placas de extremidades. Tais placas devem possuir um diâmetro 10% superior ao diâmetro do rotor.

O melhor material encontrado para a construção das placas de extremidades foi o PVC por ser um material leve e resistente, como mostrado na Figura 35.



**Figura 35** - Placa de Extremidade feita de PVC.

Fonte: Elaborada pelos autores.

O eixo do rotor foi constituído a partir de um trilho de portão de aço galvanizado, onde foi realizado algumas adaptações. Inicialmente foi retirado partes excedentes com a serra de mármore, no qual, a haste ficou com 1,20 m de comprimento.

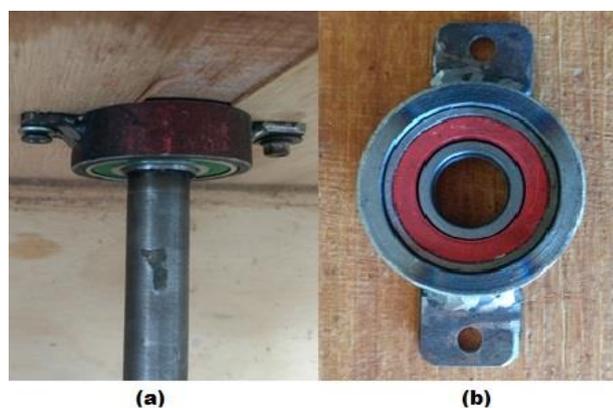
Na Figura 36, quase no centro da imagem, podemos observar uma trava na altura de 20 cm que representa o limite de onde a haste ficará acoplada na estrutura da turbina, ligada ao rolamento superior, como mostrado na Figura 37(a).



**Figura 36** - Haste de Aço.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

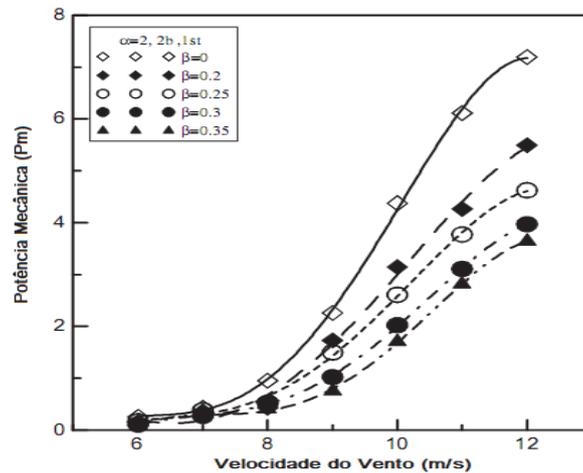
Ainda na Figura 35 foi feito um pequeno furo utilizado para fixar uma peça do sistema de engrenagem através de um parafuso, já na extremidade, uma adaptação foi feita com a finalidade de acoplar a ponta do eixo ao rolamento inferior.

Foram utilizados dois rolamentos no projeto, ambos de moto. Foram confeccionados mancais para a fixação dos rolamentos na estrutura da caixa. Os rolamentos apresentam diâmetros diferentes, o apresentado na Figura 37(a), tem 6 cm de diâmetro, já o da Figura 37(b) tem 5 cm.



**Figura 37** - (a) Rolamento superior, (b) rolamento inferior  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Na construção do rotor foi levado em consideração o parâmetro geométrico de relação de sobreposição. Ao qual segundo Mahmoud et al. (2012) afirma sobre uma maior potência mecânica no rotor sem relação de sobreposição comparado com rotores com sobreposição. E conforme mostrado na Figura 38.



**Figura 38** - Variação da potência mecânica em relação a velocidade do vento para diferente valores de sobreposição.

Fonte: Mahmoud et al. (2012)(Editado pelos autores).

Para o acoplamento das pás ao eixo foram utilizados três parafusos ligando uma pá a outra através da haste de aço galvanizado, como apresentado na Figura 39.



**Figura 39** - Acoplamento das peças ao eixo.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Já para a ligação entre as pás e as placas de extremidades, foi utilizado doze rebites ao todo, sendo seis rebites para cada pá, onde três rebites ligam a pá a placa de extremidade de

cima e três a placa de extremidade de baixo. Após a montagem do rotor, este foi acoplado a estrutura da turbina e submetido às condições de vento da localidade, ainda sem o gerador conectado, como apresentado na Figura 40, com a principal finalidade de verificar o conjunto e realizar testes.

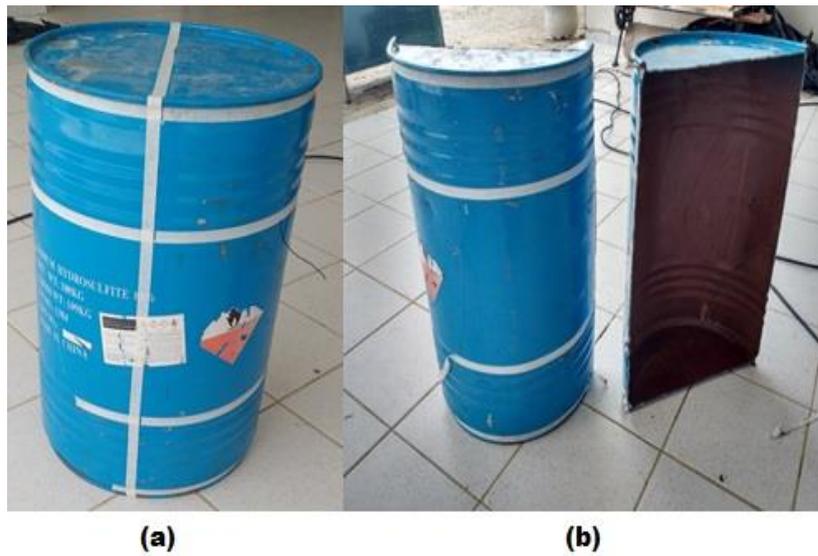


**Figura 40** - Submetido a testes.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

O rotor apresentou bom desempenho sem o gerador, mostrando sensibilidade até quando o vento apresentava baixas velocidades, porém apresentou também muitas vibrações devido à distância das pás a estrutura da turbina, cerca de 66 cm. Já acoplada ao gerador, não teve força suficiente para acioná-lo, necessitando de um torque inicial externo ou de fortes rajadas de vento, no entanto, perdia força rapidamente, tornando o rotor inviável.

A solução encontrada foi substituir as pás do rotor por outras maiores, visando a ampliação da área de varredura e o aumento da relação de aspecto das pás para obter um maior torque mecânico e uma força de arrasto maior. Logo, as pás foram construídas a partir de um tambor de aço de 200 litros, apresentada na Figura 41(a). O processo de confecção das pás é semelhante a anterior. O tambor foi cortado ao meio, como apresentado na Figura 41(b), de cima para baixo, com a ferramenta serra mármore. Foi utilizado também uma lixa apropriada para o material com a finalidade de retirar as partes cortantes produzidas devido a utilização da serra.

As pás têm as seguintes dimensões: 67 cm de altura, 46 cm de diâmetro. Basicamente o dobro das dimensões das pás anteriores.



**Figura 41** - (a) Tambor de Aço de 200 litros, (b) novas pás do protótipo.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

A principal dificuldade na modificação das pás do protótipo, foi de encontrar materiais leves e fáceis de moldar como o PVC, para a fabricação das novas placas de extremidades. A solução encontrada para substituir este material foi utilizar madeira MDF de 4 mm. As novas placas têm diâmetro de 1 m e está representada na Figura 42.



**Figura 42** - Placa de extremidade de madeira MDF.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

As pás foram acopladas ao eixo através de três parafusos fixados de uma pá a outra através da haste de aço galvanizado. O acoplamento entre as pás e as placas, antes realizados por rebites foram substituídos por parafusos. Para esta ligação foram utilizados doze parafusos ao todo, sendo seis para cada pá, onde três parafusos ligam a pá a placa de extremidade de cima e três a placa de extremidade de baixo, como podemos observar na Figura 43(a). Foram adicionadas as placas de extremidades 4 tabuas de 60 cm com o objetivo de melhorar o

posicionamento das placas e reduzir os possíveis efeitos das chuvas sobre elas como apresentado na Figura 43(b).



**(a)** **(b)**  
**Figura 43** - (a) Acoplamento no eixo, (b) tábua.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Após acoplado a estrutura da turbina o rotor apresentou um bom desempenho com e sem o gerador, mostrando sensibilidade a ventos de baixa velocidade sem precisar de um torque de partida externo. O protótipo tem 1,50 metros de altura e pode ser visto na Figura 44.

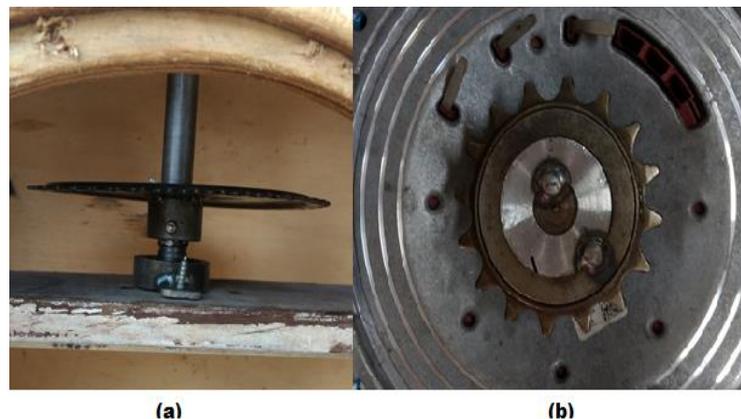


**Figura 44** - Rotor acoplado a estrutura da turbina.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

### 5.2.4 Multiplicador de Velocidade

Segundo Vitorino (2012) o multiplicador de velocidade tem como objetivo transmitir a energia mecânica fornecida pelo eixo do rotor ao gerador sendo necessário para que a velocidade de entrada seja multiplicada afim de se adequar à velocidade necessária para o gerador elétrico.

O sistema multiplicador de velocidade utilizado no protótipo é constituído por duas catracas de bicicleta e tem uma relação de 2:1. A primeira catraca tem 32 dentes, 13 cm de diâmetro e está acoplada a ponta do eixo do rotor como apresentada na Figura 45(a). A catraca menor possui 16 dentes e 7,5 cm de diâmetro, esta foi soldada ao eixo do gerador e está apresentada na Figura 45(b).



**Figura 45** - Sistema multiplicador de velocidade, (a) Catraca maior, (b) catraca menor.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

No protótipo uma corrente de bicicleta interliga o eixo do rotor, como apresentado na Figura 46(a), ao eixo do gerador apresentado na Figura 46(b).

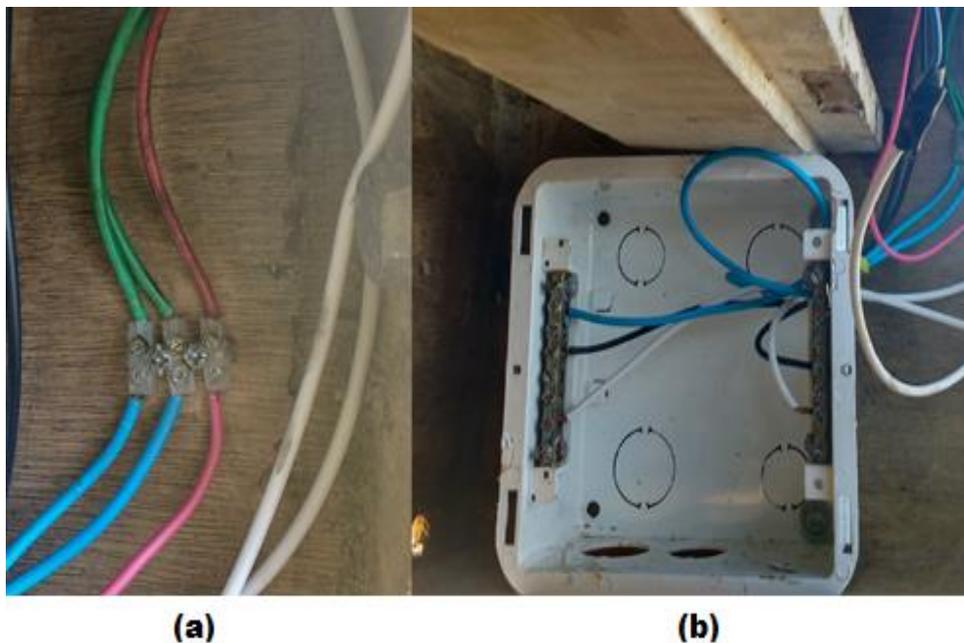


**Figura 46** - Sistema multiplicador de velocidade, (a) Catraca maior, (b) catraca menor.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Esta corrente tem como objetivo interligar o eixo do rotor ao gerador transmitindo a energia mecânica rotacional produzida pelo giro do rotor para que o gerador realize a conversão dessa energia em energia elétrica.

### 5.2.5 Parte Elétrica

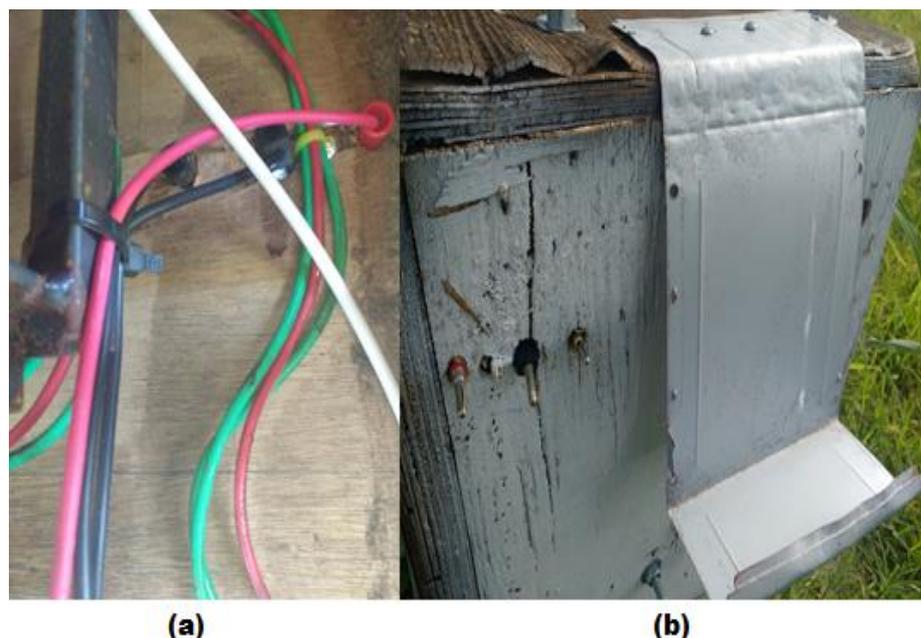
A parte elétrica realizada no protótipo consistiu em conectar uma carga conectada ao gerador com a finalidade de realizar testes e medições. Para conexão e organização dos fios foram utilizados um borne e uma caixa de distribuição apresentados na Figura 47.



**Figura 47** - (a) Borne com três entradas, (b) caixa de distribuição.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Nas três entradas do borne apresentado na Figura 47(a) foi conectado as três fases do gerador. Na saída do conector apenas duas fases foram ligadas a caixa de distribuição para o acionamento da carga, uma conectada ao barramento da esquerda e outro ao barramento da direita, ambas representadas pelos fios azuis.

Para realizar a medição de tensão foram confeccionadas três aberturas ao lado da estrutura e colocado três terminais como apresentado na Figura 48(a) e colocado um suporte para o multímetro na parte externa como apresentado na Figura 48(b). Estes conectores foram colocados em serie com as três fases do gerador.



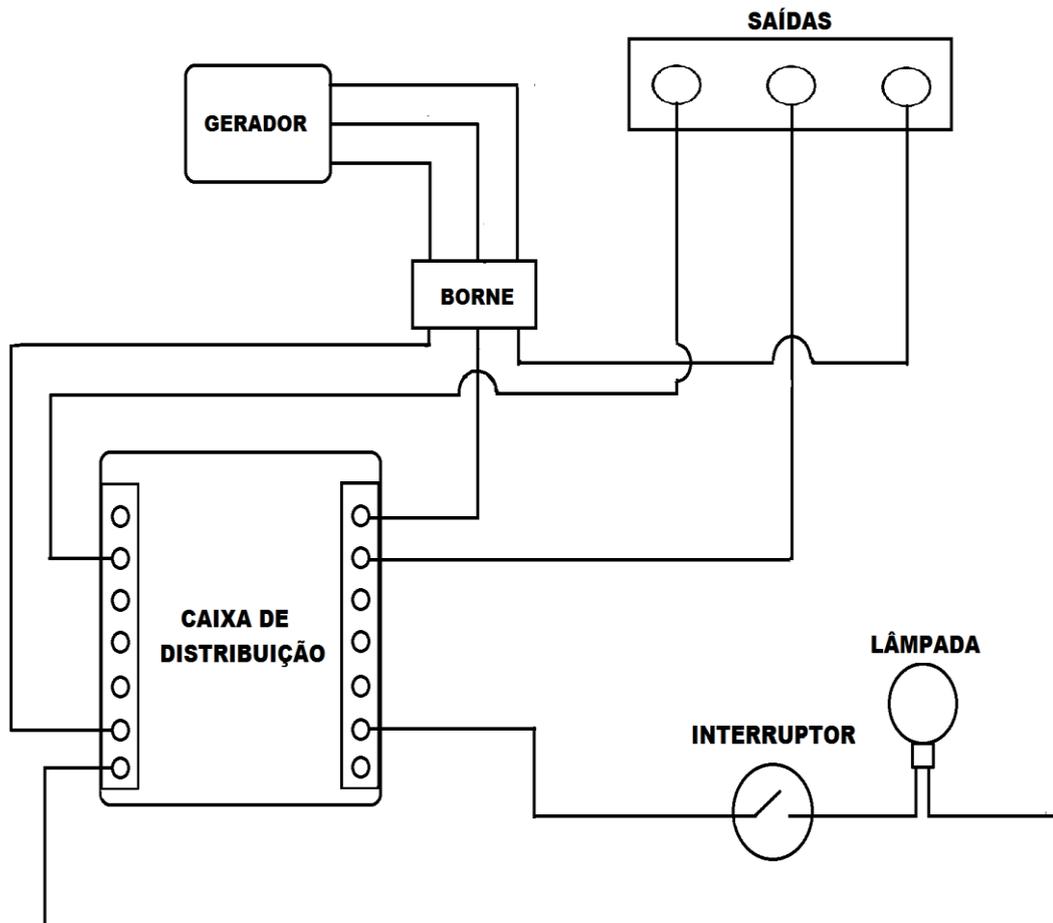
**Figura 48** - (a) Conectores para medir tensão, (b) Suporte do multímetro.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

A carga utilizada foi uma lâmpada de moto apresentada na Figura 49 de 12 V e 5 W, esta foi conectada a um interruptor, no qual este tem a finalidade de acionar e desacionar a lâmpada possibilitando assim realizar medições com carga e sem carga. Ambos apresentados na Figura 49.



**Figura 49** - Lâmpada e interruptor.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

Para acionamento da lâmpada foi conectado uma fase da caixa de distribuição a um terminal do interruptor, o retorno foi conectado a lâmpada, o neutro da lâmpada foi conectado ao outro barramento oposto à da fase. O esquema de ligação da parte elétrica está apresentado na Figura 50.



**Figura 50** - Esquema de ligação da parte elétrica.  
Fonte: Elaborada pelos autores.

### 5.3 MATERIAIS, SERVIÇOS E CUSTOS

Todos os materiais, serviços e custos relatados a seguir, são relacionados ao protótipo em sua versão final. Na Tabela 1 está apresentado apenas os materiais considerados essenciais para a construção do protótipo. Não foi estimado preço de materiais obtidos sem custos.

Para o desenvolvimento do protótipo da turbina do tipo Savonius foram adquiridos os seguintes materiais:

**Tabela 1 - Materiais e custos.**

<b>Componentes</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço unitário</b>	<b>Total</b>
<b>Caixa de som de madeira</b>	1	R\$ 0	R\$ 0
<b>Haste de alumínio</b>	4	R\$ 0	R\$ 0
<b>Vidro de 36 cm</b>	2	R\$ 8,00	R\$ 16,00
<b>Madeira MDF</b>	1	R\$ 45,00	R\$ 45,00
<b>Catraca – 32 dentes</b>	1	R\$ 6,00	R\$ 15,00
<b>Catraca – 16 dentes</b>	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
<b>Corrente de Bicicleta</b>	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
<b>Rolamento de moto</b>	2	R\$ 10,00	R\$ 20,00
<b>Borne – 12 conectores</b>	1	R\$ 7,50	R\$ 7,50
<b>Trilho de portão</b>	1	R\$ 0	R\$ 0
<b>Caixa de distribuição</b>	1	R\$ 0	R\$ 0
<b>Fios</b>	2	R\$ 0	R\$ 0
<b>Tambor de Aço</b>	1	R\$ 0	R\$ 0
<b>Motor gerador</b>	1	R\$ 0	R\$ 0
<b>Interruptor de 1 secção</b>	1	R\$ 0	R\$ 0
<b>Lâmpada pisca de moto</b>	1	R\$ 0	R\$ 0
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 123.5</b>

Fonte: Elaborada pelos autores.

No processo de construção do protótipo, houve a necessidade de desenvolver e adaptar algumas peças. Porém, por falta de estrutura do *Campus* para executar esta parte do projeto, tornou-se necessário contar com o trabalho de dois profissionais, em específico, de um torneiro mecânico e de um marceneiro. A Tabela 2 mostra o custo com esses serviços:

**Tabela 2 - Custos de serviços.**

<b>Serviços</b>	<b>Custo</b>
<b>Torneiro mecânico</b>	R\$ 130,00
<b>Marceneiro</b>	R\$ 10,00
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 140,00</b>

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a montagem do protótipo totalizado gastos de materiais e serviços, o custo foi de aproximadamente R\$ 263,50 (reais). Sendo que alguns materiais utilizados neste projeto,

podem ser reaproveitados ou substituídos, por exemplo, pode-se modificar um alternador de carro e utilizá-lo como gerador. Assim como pode-se trocar a estrutura da turbina reaproveitando materiais.

#### 5.4 RESULTADOS

A análise de comportamento dos protótipos desenvolvidos da turbina de eixo vertical Savonius foi feita entre os meses de janeiro a março de 2018. Tal análise comportamental se deu ao fim de janeiro com o primeiro protótipo (Figura 40). Ao qual pôde-se observar baixo torque de partida e alto índice de vibrações quando não estava acoplado ao gerador.

Em relação ao torque de partida analisou-se o comportamento do projeto na configuração de multiplicação de velocidade de 2:1. O rotor não teve torque suficiente para partir o gerador com a velocidade de vento do local, tendo a necessidade de uma força externa para que este começasse a se movimentar. Ainda assim perdendo sua força facilmente.

Para analisar o torque exercido pela primeira turbina adotou-se o valor do coeficiente de torque para turbinas do tipo Savonius segundo Alé (2012). Desta forma o cálculo do torque se dá conforme a Equação 22.

$$T = \frac{\rho A v^2 r C_t}{2} \quad (22)$$

Comparando com o rotor da segunda turbina conclui-se que o torque da primeira é menor devido ao diâmetro de suas pás. Considerando velocidades de ventos iguais, que a velocidade da ponta de pá ( $\lambda$ ) é igual a 1 e conseqüentemente o seu coeficiente de torque seja de aproximadamente 0,2 conforme Alé (2012).

Em relação as trepidações foram adicionadas 4 hastes de aço galvanizados na estrutura da caixa que sustenta o rotor para tentar minimizar as vibrações decorrentes das forças do vento. Tais vibrações diminuíram drasticamente após inserção destas hastes.

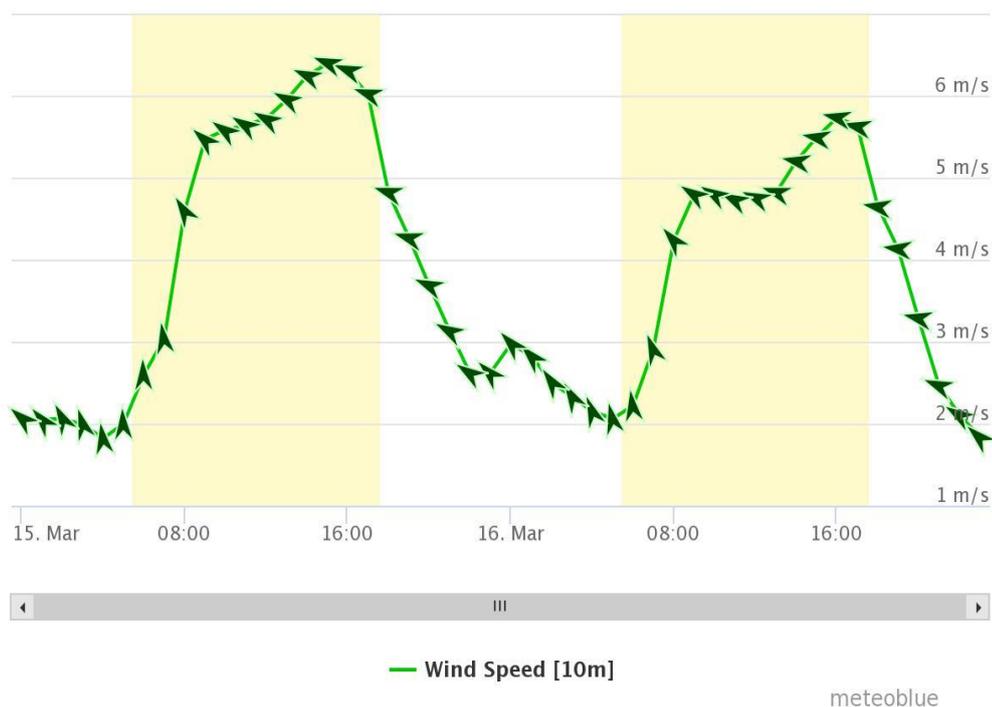
O protótipo final resultou em alguns problemas estruturais devido a diversas situações. Na parte de construção o rotor teve uma pequena inclinação no corte de suas pás devido à pouca experiência em manusear o serra mármore. Após a conclusão da montagem e exposição a testes observou-se que as placas de extremidades projetadas de madeira compensada de 4mm sofreram com a ação climática, mais precisamente a chuva. Ocasionalmente ocasionando curvaturas nas suas estruturas o que pode ter causado interferências no rendimento da turbina. Além disso, houve problemas com o sistema de multiplicação de velocidades. Tal sistema apresentou instabilidade em condições de vento superiores a 10 m/s. Resultando na queda da corrente do

sistema de engrenagens. Observou-se também que esta queda se dava devido as vibrações ocasionadas com o aumento da velocidade de vento.

#### 5.4.1 Potência Estimada e Potência Extraída

Os cálculos das potências estimadas e extraídas foram realizados de acordo com dados de vento coletados no local e dados de vento obtidos no *website* Meteoblue referente aos dias 15, 16 e 19 de março. Coletados em dois períodos durante a tarde e em um único período durante a manhã.

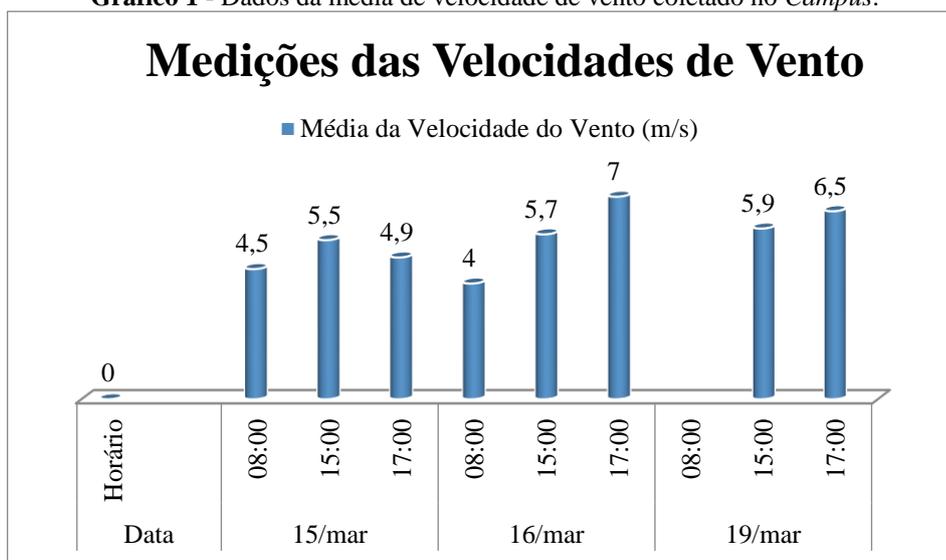
A Figura 51 corresponde aos dados de vento retirados do *website* Meteoblue referente aos dias 15 e 16 de março. Tais dados são representados por uma média horária das velocidades de vento incidentes no decorrer do dia. Além de serem dados referentes à altura de 10 metros.



**Figura 51** - Dados de velocidade de vento dos dias 15 e 16 de março.  
Fonte: [www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com).

Os dados de vento coletados no *Campus* localizado na cidade de João Câmara foram calculados suas médias respectivas aos horários das medições, como mostrado no Gráfico 1.

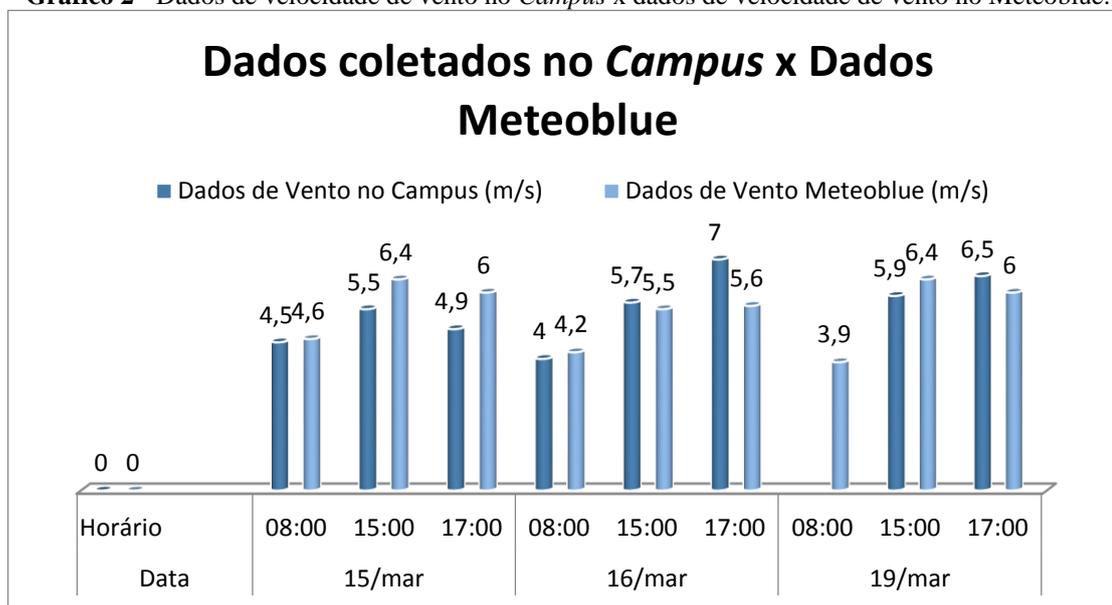
**Gráfico 1** - Dados da média de velocidade de vento coletado no *Campus*.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O Gráfico 2 a seguir demonstra o contraste entre os dados de velocidade de vento coletados no *Campus* versus os dados obtidos no *website* Meteoblue.

**Gráfico 2** - Dados de velocidade de vento no *Campus* x dados de velocidade de vento no Meteoblue.



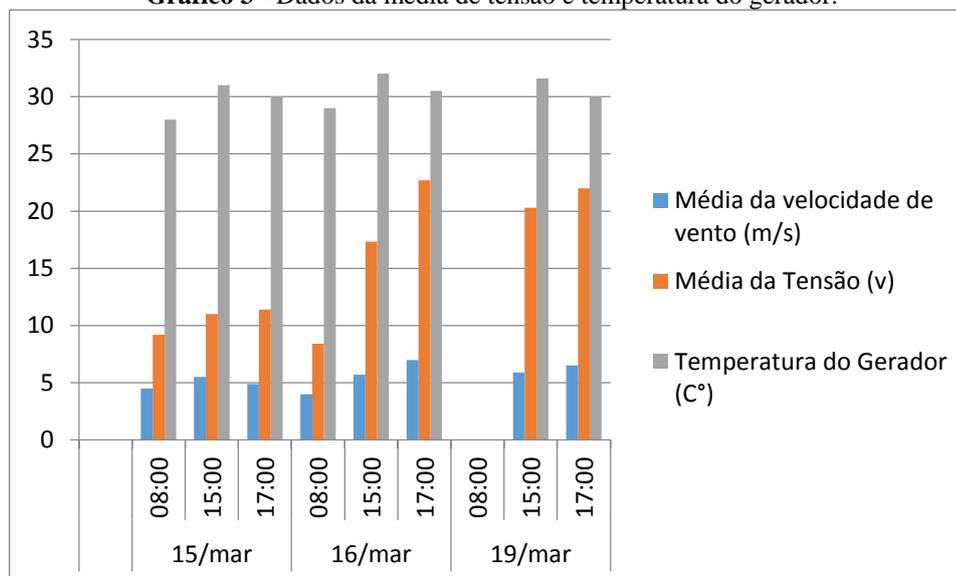
Fonte: Elaborada pelos autores.

Conforme os dados de velocidade de vento obtidos foram realizadas medições de tensão de acordo com cada velocidade de vento e feita uma média conforme os horários de medições. A Tabela 3 e o Gráfico 3 a seguir demonstra a coleta dos dados de tensão e temperatura do gerador.

**Tabela 3** - Dados de média de tensão e temperatura do gerador.

<b>Dia</b>	<b>Hora</b>	<b>Média da velocidade de vento (m/s)</b>	<b>Média da Tensão (v)</b>	<b>Temperatura do Gerador (C°)</b>
<b>15/mar</b>	08:00	4,5	9,2	28
	15:00	5,5	11	31
	17:00	4,9	11,4	30
<b>16/mar</b>	08:00	4	8,4	29
	15:00	5,7	17,33	32
	17:00	7	22,7	30,5
<b>19/mar</b>	08:00			
	15:00	5,9	20,3	31,6
	17:00	6,5	22	30

Fonte: Elaborada pelos autores.

**Gráfico 3** - Dados da média de tensão e temperatura do gerador.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Foram analisados dados do desempenho da turbina com uma lâmpada de moto de 5W de potência e 12V de tensão de trabalho. Conforme os dados coletados foram calculadas as respectivas potências geradas de acordo com cada média de velocidade de vento das medições feitas no *Campus* tanto quanto os dados obtidos no *website* Meteoblue. Comparando os dados de potência extraída do gerador, da potência estimada conforme os dados de vento coletados no local e os dados de potência estimada segundo os dados de ventos obtidos no Meteoblue, conforme demonstra o Gráfico 4.

A potência estimada de uma turbina eólica de eixo vertical pode ser calculada conforme a Equação (23).

$$P_{est} = \frac{\rho AV^3 C_p \eta}{2} \quad (23)$$

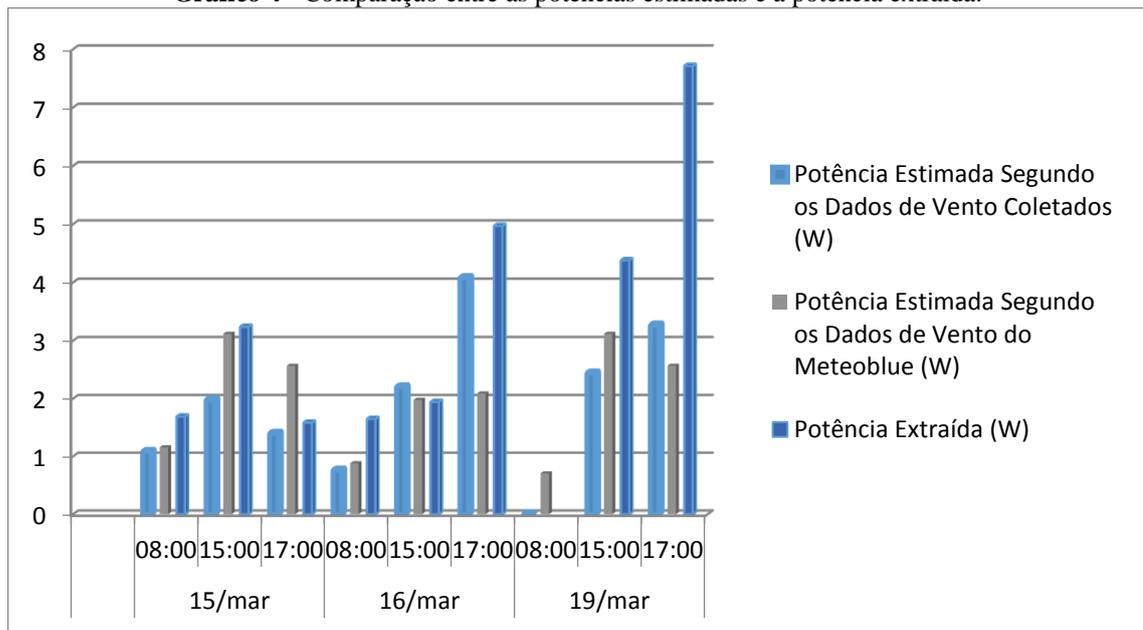
Onde  $P_{est}$  é a potência estimada,  $\rho$  a densidade do ar, que nesta situação adotou-se  $1,25 \text{ Kg/m}^3$ .  $A$  é a área de varredura das pás da turbina dada na Equação (12),  $v$  é a velocidade do vento expressa em  $m/s$ ,  $C_p$  é o coeficiente de potência para turbinas Savonius que é igual a 0,2 segundo Alé (2012). E  $\eta$  é o rendimento do gerador conforme demonstrado na Figura 30.

Podemos calcular a potência extraída da turbina eólica conforme a Equação (24):

$$P_{ex} = I * V \quad (24)$$

O qual  $I$  é a corrente dada em Ampere (A) medida para alimentar a carga e  $V$  é a tensão dada em Volts (V) medida nos terminais de saída do gerador.

**Gráfico 4** - Comparação entre as potências estimadas e a potência extraída.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Como apresentado no Gráfico 4, no dia 19 de março no período das 17:00 horas, os parâmetros relacionados a potência estimada segundo os dados coletados, em relação a potência extraída apresentaram uma discrepância, tal diferença ocorreu devido à falta de simultaneidade dos equipamentos de medição.

Algumas observações foram feitas em relação ao comportamento da turbina. Para partida da turbina sem nenhuma carga conectada são necessárias rajadas de vento entre 6 e 6,5

m/s no decorrer de 5 s para que a turbina consiga sair na inércia. Este mesmo parâmetro quando adicionada a carga muda para velocidades de vento entre 7 e 7,5 m/s.

Outra observação feita foi que a corrente do sistema de multiplicação de velocidade cai com mais frequência quando a carga não está conectada ao gerador. Pois este necessita de mais força para movimentar seu eixo, assim diminuindo as vibrações causadas pelo movimento do rotor.

## **6. CONCLUSÃO**

O desenvolvimento do trabalho possibilitou através da construção de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius submetida as condições de vento da cidade de João Câmara, a realização de uma análise sobre seu comportamento. Além disso, também permitiu a realização de uma pesquisa com base em estudos de caráter científico com a finalidade de otimizar o protótipo sobre as etapas de construção e desenvolvimento.

De modo geral, os dados de velocidade do vento da localidade foram satisfatórios para a implementação do protótipo. Este foi construído de acordo com a disponibilidade de materiais e ferramentas acessíveis obedecendo e utilizando os parâmetros geométricos mais eficientes de acordo com teses e livros em específico a este tipo de turbina.

Submetido as condições de vento da localidade foi possível acender uma lâmpada de 5 W, onde os dados obtidos através das medições de grandezas elétricas comprovam o potencial de geração da cidade e atesta a viabilidade do sistema. Durante seu funcionamento o protótipo apresentou um bom comportamento. No entanto, alguns materiais que o constituíam apresentaram desgastes devido aos efeitos das condições climáticas do local o que influenciou em sua eficiência.

Devido à falta de recursos o protótipo foi construído de acordo com a disponibilidade de materiais, mas dada a importância do assunto, para estudos futuros relacionados ao desempenho energético e eficiência da turbina eólica do tipo Savonius pode ser implementado no protótipo sensores digitais para realização das medições dos parâmetros experimentais, assim como pode ser desenvolvido um sistema de freio para o rotor. Para o aperfeiçoamento do protótipo pode ser substituído os componentes que apresentaram desgastes devido as condições climáticas como as placas de extremidades e a estrutura da turbina por materiais mais resistente.

Apesar do curto prazo e das dificuldades técnicas encontradas em realizar este estudo experimental, como: as condições reais de operação de uma turbina eólica e condições ambientais favoráveis, assim como problemas para confeccionar partes do protótipo entre outros casos, pode-se afirmar que os objetivos propostos foram realmente alcançados.

### **6.1.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros**

No decorrer do projeto pôde-se observar algumas falhas principalmente referente a estrutura da turbina devido aos efeitos do clima. Uma das sugestões seria a troca da madeira compensada utilizada nas placas de extremidades por algum material resistente as ações do tempo, como chuva e sol. E que não seja tão pesado a ponto de prejudicar a aerodinâmica da turbina.

Outra sugestão é referente ao sistema de engrenagens relacionado a incorporação de algum mecanismo para dificultar a queda da corrente em altas velocidades de rotação do rotor. Como por exemplo, o sistema utilizado em corrente de bicicletas de marcha. Também pode-se pensar em algum sistema de freio mecânico quando a velocidade do rotor atingir uma velocidade limite, impedindo que a corrente do sistema caia.

Pode-se também pensar em melhorias na parte eletrônica do projeto ao qual não houve tempo hábil para a dedicação nesse aspecto do trabalho. Podendo ser adicionado um sistema de medição simultânea das grandezas referentes ao projeto. Além de um sistema para retificar e tratar a energia gerada pelo gerador.

Para um estudo mais detalhado do comportamento da turbina, se faz necessário um período maior de coleta de dados referentes as grandezas físicas e elétricas. Além de testes com diferentes geometrias da turbina.

## 7. REFERÊNCIAS

AKWA, João Vicente. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ROTORES EÓLICOS SAVONIUS EMPREGANDO O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/26532>>, acesso em: 14 mar. 2018.

ALÉ, Jorge A. Villar. Turbinas Eólicas de Eixo Vertical. 2012. Disponível em: <[https://www.eventize.com.br/eventize/upload/000388/files/3\\_%20TURBINAS%20EOLICAS%20DE%20EIXO%20VERTICAL.pdf](https://www.eventize.com.br/eventize/upload/000388/files/3_%20TURBINAS%20EOLICAS%20DE%20EIXO%20VERTICAL.pdf)>, acesso em: 18 dez. 2017.

ALMEIDA, Gil Manuel Pereira de. **Estudo do Recurso Eólico: Previsão e Dimensionamento de um Parque Eólico de Média Potência**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas - Energia Eólica. Brasil, 2009. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>, acesso em: 16 out. 2017.

BARROS, A. J. S. e LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de Metodologia**: Um Guia para a Iniciação Científica. 2 Ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BURATTINI, Maria Paula T. de Castro. **Energia**: uma abordagem multidisciplinar. São Paulo: Livraria da Física, 2008. Coordenação e orientação de Claudio Zaki Dib. 112p.

CORONA, Jaime Cámara. **Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo de Turbina Eólica de Eje Vertical Tipo Savonius**. 2016. Disponível em: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9878/>>, acesso em: 16 jan. 2018.

CARDOSO, Josué Marcos de Moura; FERREIRA, Denise Helena Lombardo. Equações matemáticas e conceitos físicos aplicados a uma turbina eólica vertical de pequeno porte. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetinga, v. 2, n. 3, p.42-59, set. 2015. Disponível em: <<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjtor-8kb7XAhUGHJAKHaMfDq4QFggtMAE&url=https://itp.ifsp.edu.br/ojs/index.php/IC/article/download/48/442&usq=AOvVaw2a9RDlsw2VgNJD8rKXF2sq>>, acesso em: 14 nov. 2017.

CERVO, A. L. BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. 5.ed. São Paulo: Prentice

CORONA, Jaime Cámara. **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN MODELO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS**. 2016. Disponível em: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9878/DISE%C3%91O.CONSTRUCCI%C3%93N%20Y%20PRUEBAS%20DE%20UN%20MODELO%20DE%20TURBINA%20E%C3%93LICA%20DE%20EJE%20VERTICAL%20TIPO%20SAVONIUS.pdf?sequence=1>>, acesso em: 16 jan. 2018.

DIAZ, Diego Alejandro Godoy. **ESTUDO DE TURBINA EÓLICA VERTICAL COM ÂNGULO DE PÁ VARIÁVEL**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia Mecânica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em:

<[http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufrj-pem\\_upl//THESIS/16/pemufjrj2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf](http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufrj-pem_upl//THESIS/16/pemufjrj2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf)>, acesso em: 30 jan. 2018.

DIEZ, Pedro Fernández. **Energia Eólica**. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidade de Cantabria. 2005. Disponível

em:<<http://exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo12002.pdf>>, acesso em: 27 mar. 2018.

DESLAURIERS Jean-Pierre. **Recherche Qualitative**. Montreal: McGraw Hill, 1991.

DUTRA, Ricardo Marques. Viabilidade Técnica Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/dissertacao/200102\\_dutra\\_r\\_m\\_ms.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/dissertacao/200102_dutra_r_m_ms.pdf)>, acessado em: 16 out. 2017.

FONSECA, João José Saraiva da. **Metodologia da pesquisa científica**. 2002. Disponível em:

<[http://leg.ufpi.br/subsiteFiles/lapnex/arquivos/files/Apostila\\_-\\_METODOLOGIA\\_DA\\_PESQUISA\(1\).pdf](http://leg.ufpi.br/subsiteFiles/lapnex/arquivos/files/Apostila_-_METODOLOGIA_DA_PESQUISA(1).pdf)>, acesso em: 29 out. 2017.

FONSECA, Rômulo Soares. **Iluminação Elétrica**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1972.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas S.a., 2002.

Disponível em:

<[https://professores.faccat.br/moodle/pluginfile.php/13410/mod\\_resource/content/1/como\\_elaborar\\_projeto\\_de\\_pesquisa\\_-\\_antonio\\_carlos\\_gil.pdf](https://professores.faccat.br/moodle/pluginfile.php/13410/mod_resource/content/1/como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf)>, acesso em: 29 out. 2017.

GODOY DIAS, Diego Alejandro. **Estudo de turbina eólica vertical com ângulo de pá variável**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Mecânica), UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em:

<[http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufrj-pem\\_upl//thesis/16/pemufjrj2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf](http://w2.files.scire.net.br/atrio/ufrj-pem_upl//thesis/16/pemufjrj2012mscdiegoalejandrogodoydiaz.pdf)>, acesso em: 30 jan. 2018.

HAU, Erich. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications and Economics**. Berlin; New York : Springer. 2006, 783 p.

HÉMERY, Daniel; BEBIER, Jean Claude; DELÉAGE, Jean-Paul. **Uma História da Energia**. Brasília: Editora Universidade de Brasília. 1993.

INMET - **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>, acesso em: 29 out. 2017.

KOTHE, Leonardo Brito. **Estudo Comparativo Experimental e Numérico sobre o Desempenho de Turbinas Savonius Helicoidal e de Duplo-estágio**. 2016. 142 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

Porto Alegre, 2016. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/141901/000993090.pdf?sequence=1>>, acesso em: 16 mar. 2018.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos metodologia científica**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Técnicas de pesquisa**: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Eólica**. 2. Ed. São Paulo: Artliber, 2012. 366 p.

MAHMOUD, N. H.; EL-HAROON, A.A; WAHBA, E.; NASEF, M.H. Na Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance. **Alexandria Engineering Journal**. v. 51. Ed 1, p. 19–25. 2012. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/scheme-of-a-single-stage-savonius-rotor-a-elevation-view-b-plan-view\\_fig3\\_257497943](https://www.researchgate.net/figure/scheme-of-a-single-stage-savonius-rotor-a-elevation-view-b-plan-view_fig3_257497943)>, acesso em: 11 mar. 2018.

METEOBLUE. **Arquivo meteorológico João Câmara**. 2017. Disponível em: <[https://www.meteoblue.com/pt/tempo/previsao/semana/jo%C3%A3o-c%C3%A2mara\\_brasil\\_3397315](https://www.meteoblue.com/pt/tempo/previsao/semana/jo%C3%A3o-c%C3%A2mara_brasil_3397315)>, acesso em: 11 mar. 2018.

OLIVEIRA, Adilson de; PEREIRA, Osvaldo Soliano. **Energia Eólica**. São Paulo: Senac, 2012. 213 p.

ÔLO, Carlos David Vaz. **Projecto de uma Turbina Savonius com Utilização de Componentes em Fim-de-Vida**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, [s.l.], 2012. Disponível em: <[https://run.unl.pt/bitstream/10362/8876/1/Olo\\_2012.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/8876/1/Olo_2012.pdf)>, acesso em: 15 fev. 2018.

PAULINO, Rita de Cássia. Rio Grande do Norte possui a maior matriz eólica do mundo. Agência Reguladora de Serviços públicos. --, p.-, 18 maio 2015. Disponível em: <<http://www.arsep.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=54487&ACT=&PAGE=&PARM=&LBL=NOT%20CDCIA>>, acesso em: 16 out. 2017.

PIERRE, Tatiana Dillenburg Saint'. **Arquimedes**. Disponível em: <[http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/linha%20tempo/Arquimedes/pdf\\_LT/LT\\_arquimedes.pdf](http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/linha%20tempo/Arquimedes/pdf_LT/LT_arquimedes.pdf)>, acesso em: 16 out. 2017.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 368 p

RIBEIRO, Thales Sarraf Giunti. **Mecânica aérea**: voando mais alto. 2011. Disponível em: <[http://www.newtonbraga.org.br/arquivos/apostilas/mecanica\\_aerea.pdf](http://www.newtonbraga.org.br/arquivos/apostilas/mecanica_aerea.pdf)>, acesso em: 10 mar. 2018.

SAVONIUS, S. J. The wing-rotor in theory and practice. Helsínquia, Finlândia: 115

Savonius& CO., 1926. Disponível em: <[https://vawt.ro/wp-content/uploads/2016/03/savonius\\_istorie.pdf](https://vawt.ro/wp-content/uploads/2016/03/savonius_istorie.pdf)>, acesso em: 12 mar. 2018.

SIEBERT, Luciano C.; JUNIOR, Osiris C. Estudo da Viabilidade Técnica para Geração de Energia Eólica Aerotransportada em Altas Altitudes. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte**, MG, 20 a 24 de Setembro de 2014. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/cba2014/anais/PDF/1569926671.pdf.%20Acesso%20em:%202016/10/2017>>, acesso em: 16 out. 2017.

SOUZA, Eliziane Olária; FEY, Msc. Vladimir Arthur. **Controle Interno no Processo de Contratação de Empregados numa Fundação de Apoio a Universidade Federal de Santa Catarina**. 51 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências Contábeis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://tcc.bu.ufsc.br/Contabeis291638.PDF>>, acesso em: 29 out. 2017.

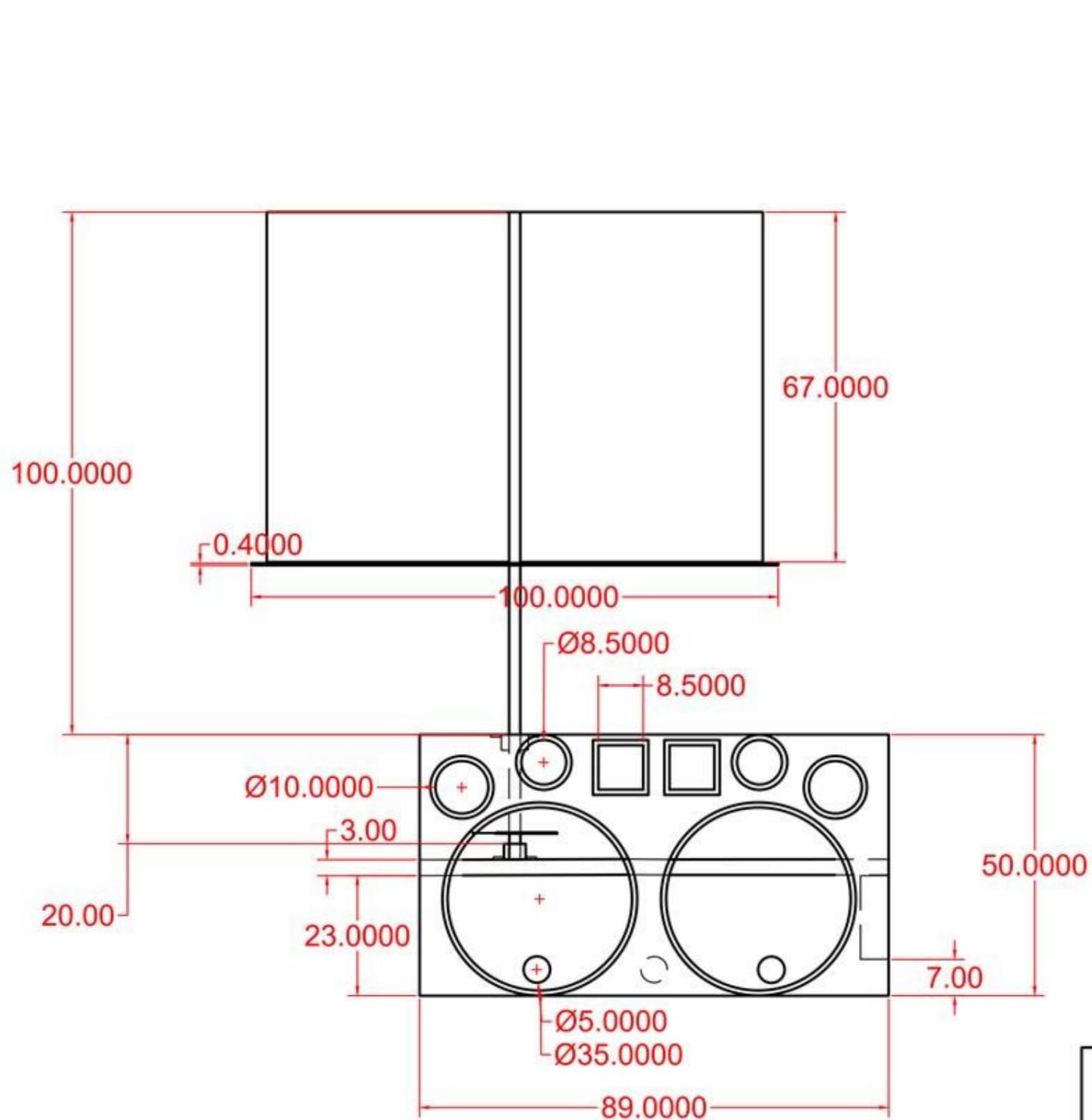
TERCIOTE, Ricardo. **Análise da Eficiência Energética de um Sistema Eólico Isolado**. 2002. 132 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002. Disponível em: <<https://www.feagri.unicamp.br/energia/agrener2002/jdownloads/pdf/0100.pdf>>, acesso em: 16 out. 2017.

TIBOLA, Gabriela. **Sistema Eólica de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência**. 2009. 285 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <[http://www.ivobarbi.com/PDF/dissertacoes/Dissertacao\\_Gabriel\\_Tibola.pdf](http://www.ivobarbi.com/PDF/dissertacoes/Dissertacao_Gabriel_Tibola.pdf)>, acesso em: 27 mar. 2018.

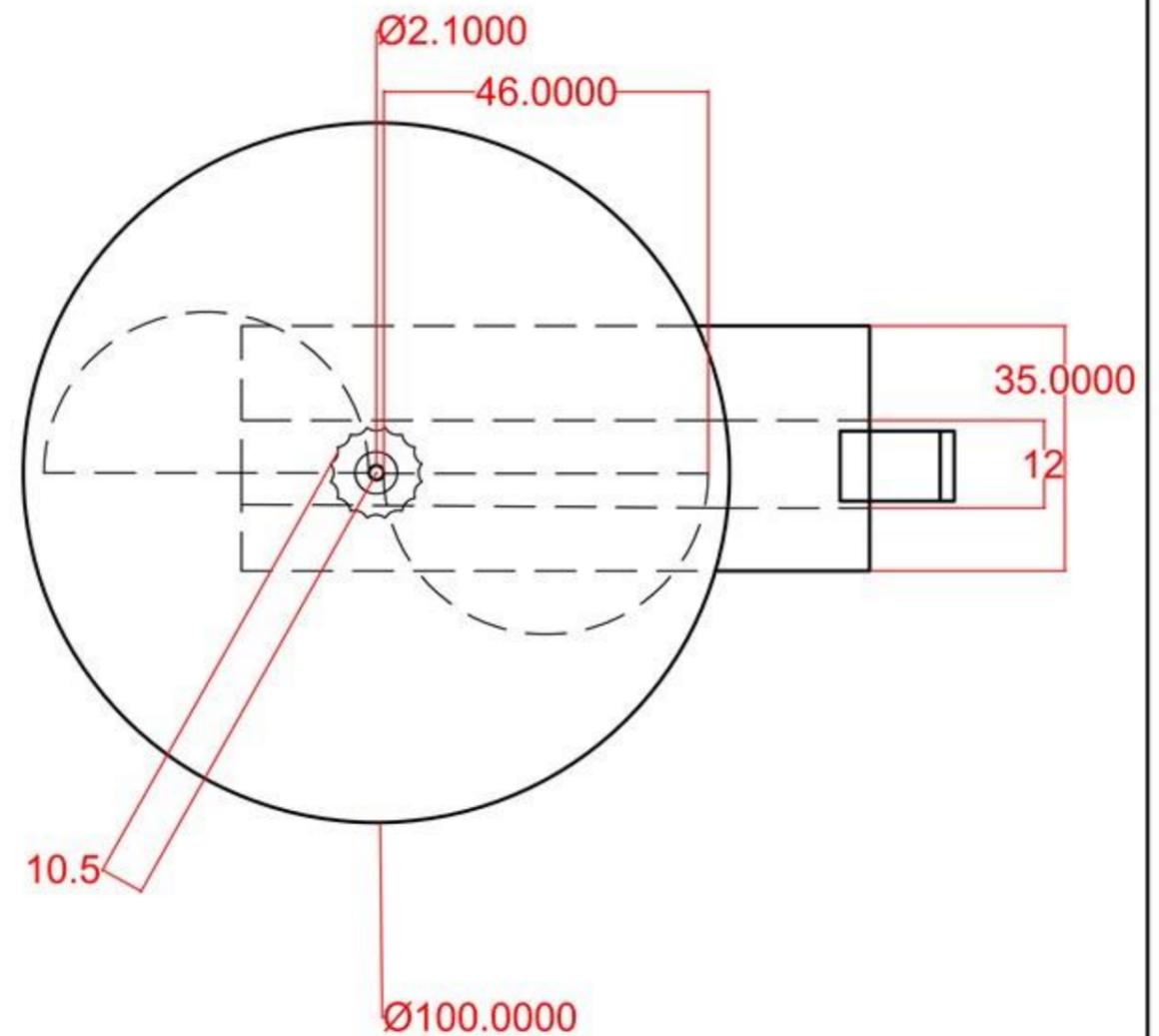
VIEIRA, V. A. **As tipologias, variações e características da pesquisa de marketing**. Revista da FAE: Curitiba, 2002.

VITORINO, Cássia Resende Silva. **Modelagem Dinâmica de Caixa Multiplicadora de Velocidades de Aerogeradores**. 2012. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Disponível em: <[http://bdm.unb.br/bitstream/10483/4149/1/2012\\_CassiaResendeSilvaVitorino.pdf](http://bdm.unb.br/bitstream/10483/4149/1/2012_CassiaResendeSilvaVitorino.pdf)>, acesso em: 16 mar. 2018.

**APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO PROTÓTIPO**



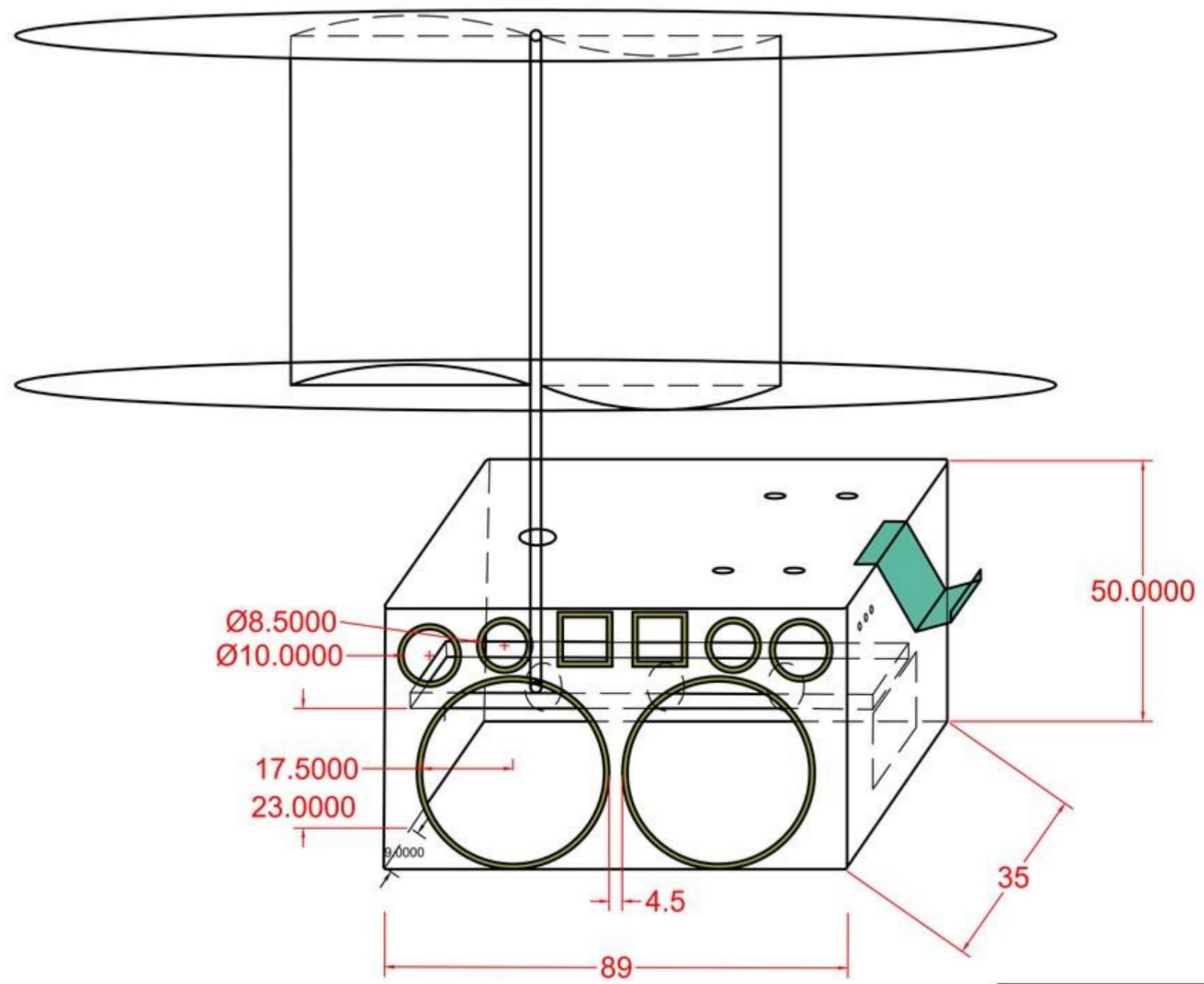
Vista Frontal



Vista Superior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte		
Discentes: Gilson Clementino da Silva Filho; Wagner Silva de Oliveira.		Data: 20/03/2018
Orientador: Dennys Lopes Alves;		Unidade: Escala: Cm 1:1
Coorientador: Gennisson Batista Carneiro;		

**APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO DO PROTÓTIPO**



<p>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte</p>		
<p>Discentes: Gilson Clementino da Silva Filho; Wagner Silva de Oliveira.</p>		<p>Data: 20/03/2018</p>
<p>Orientador: Dennys Lopes Alves;</p>		<p>Unidade: Escala:</p>
<p>Coorientador: Gennisson Batista Carneiro;</p>		<p>Cm 1:1</p>