



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE PERNAMBUCO  
IFPE – CAMPUS CARUARU

**JOSÉ GABRIEL BEZERRA DA GUIA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM MICRO AEROGERADOR  
DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÃO EM AMBIENTE RURAL.**

**Caruaru - PE**

**2023**

**JOSÉ GABRIEL BEZERRA DA GUIA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM MICRO AEROGERADOR  
DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÃO EM AMBIENTE RURAL.**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Mecânica do Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Pernambuco como parte dos requisitos à obtenção  
do título de Engenheiro Mecânico.*

**Orientador: Dr. Igor Cavalcanti da Silveira**

**Coorientador: Dr. Marcos Cezar Lima Cordeiro**

**Caruaru – PE**

**2023**

G943d

Guia, José Gabriel Bezerra da

Desenvolvimento e análise de um micro aerogerador de baixo custo para aplicação em ambiente rural/ José Gabriel Bezerra da Guia; orientação de Igor Cavalcanti da Silveira; coorientação de Marcos Cezar Lima Cordeiro. – Caruaru, 2023.  
51 f.

Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Engenharia Mecânica) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia Mecânica, 2023.

1. Energia eólica – Micro aerogerador. 2. Micro aerogerador – baixo custo. 3. Energia eólica – zona rural. 4. Gerador eólico. 5. Máquinas de fluxo – gerador de potência. 6. Corrente contínua – Gerador. 7. Corrente alternada – Gerador. 8. Engenharia Mecânica - IFPE. I. Silveira, Igor Cavalcanti da. II. Cordeiro, Marcos Cezar Lima. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. IV. Trabalho de Conclusão de Curso. V. Título.

CDD: 621.45

CDU: 621

**JOSÉ GABRIEL BEZERRA DA GUIA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM MICRO AEROGERADOR  
DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÃO EM AMBIENTE RURAL.**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Mecânica do Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Pernambuco como parte dos requisitos à obtenção  
do título de Engenheiro Mecânico.*

Avaliado pela banca avaliadora em: **03 / julho / 2023.**

**BANCA AVALIADORA**

---

**Prof. Dr. Igor Cavalcanti da Silveira**

---

**Prof. Dr. Felipe Augusto Cruz**

---

**Prof. Dr. Marcos Cezar Lima Cordeiro**

---

**Prof. Dr. Alysson Domingos Silvestre**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho inteiramente a Deus, por tudo o que Ele fez, faz e fará por mim. Pois toda a minha graduação foi resultado da sua imensa misericórdia e graça para com minha vida. Obrigado por tudo!*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à Deus por toda saúde, paz e companhia que me proporcionou ao longo da graduação e de toda a vida.

Aos meus pais que me deram todo o amor, conselhos e incentivos ao longo da minha jornada.

Aos meus professores, pelo empenho e dedicação.

A Igor Cavalcanti, meu orientador, pela paciência e suporte no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos da faculdade que trilharam esse caminho junto comigo, ajudando uns aos outros.

E a todos que de alguma forma contribuíram para eu chegar até aqui.

# **DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM MICRO AEROGERADOR DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÃO EM AMBIENTE RURAL.**

## **RESUMO**

A energia eólica é uma fonte renovável e bem conhecida. Apesar de ser atualmente pouco utilizada em relação a outras fontes de energias, como: Uso de carvão, petróleo e gás natural. A energia eólica tem grande importância principalmente no contexto da redução de gases de efeito estufa, pois a utilização de uma fonte de energia limpa (sem emissão de poluentes), ao invés da utilização de uma fonte não renovável (com emissão de poluentes), implica na redução dos índices de emissão de gases de efeito estufa. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (2018), o Nordeste representa 85% do abastecimento eólico para o Brasil. Pernambuco se destaca por ter um amplo território de faixa litorânea e no interior do estado, uma região de alta elevação devido estar localizada no planalto da Borborema, região de um grande potencial devido a força dos ventos serem elevadas em altas altitudes.

Sabendo da potencialidade da região para aplicações no sentido de geração eólica, a proposta deste trabalho foi discutir formas de aproveitamento desse potencial eólico com a aplicação de um protótipo de um micro aerogerador que possuísse as características de ter: baixo custo associado a elaboração do projeto, baixa complexidade de fabricação, uso de materiais recicláveis e uma aplicação prática para auxiliar na redução de custos com energia elétrica para pequenos produtores rurais.

Para a execução do trabalho, ainda em fase de planejamento, foram levantados dados teóricos do comportamento do vento na região em que seria aplicado, além disso estipulados valores de potência teórica gerada pela turbina a partir da área de cobertura das pás. Além da confecção e análise teórica de dados, este trabalho trata dos ganhos financeiros e sociais associados a aplicação de um micro aerogerador em pequenas comunidades rurais. O trabalho apresenta o orçamento total do projeto e suas possíveis aplicações práticas.

Apresentando resultados satisfatórios em relação a potência média gerada e eficiência da turbina, além do custo 80% inferior do protótipo em relação a sistemas eólicos comerciais com a utilização de material de reuso.

**Palavras-chave:** Energia eólica, Micro Aerogerador, Material de reuso.

# **DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A LOW-COST MICRO WIND GENERATOR FOR APPLICATION IN RURAL ENVIRONMENT.**

## **ABSTRACT**

Wind energy is a renewable and well-known source. Although it is currently little used in relation to other energy sources, such as: Use of coal, oil and natural gas. Wind energy is of great importance, mainly in the context of reducing greenhouse gases, since the use of a clean energy source (without pollutant emissions) when replacing the use of a non-renewable source (with pollutant emissions) implies a reduction in the rates of greenhouse gas emissions.

According to the Brazilian Association of Wind Energy (2018), Northeast represents 85% of the supply for the Brasil. Pernambuco stands out for having a wide territory on the coastline and in the interior of the state, a region of high elevation due to its location on the Borborema plateau, a region of great potential due to the strength of the winds being high at high altitudes.

Knowing the potential of the region for applications in the sense of wind generation, the purpose of this work was to discuss ways of taking advantage of this wind potential with the application of a prototype of a micro wind turbine that had the characteristics of having: Low cost associated with the elaboration of the project, low manufacturing complexity, use of recyclable materials and a practical application to help reduce electricity costs for small rural producers.

For the execution of the work, still in the planning phase, theoretical data of the behavior of the wind in the region where the prototype would be applied were collected, in addition to stipulated values of theoretical power generated by the turbine from the coverage area of the turbine blades. In addition to the production and theoretical analysis of data, this work deals with the financial and social gains associated with the application of a micro wind turbine in small rural communities. In addition, the work presents the total budget of the project and its possible practical applications.

Presenting satisfactory results in relation to the average power generated and turbine efficiency, in addition to the 80% lower cost of the prototype in relation to commercial wind systems with the use of reused material.



**Keywords:** Wind energy, Micro Wind Generator, Reuse material.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVO GERAL DO TRABALHO.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1	POTENCIAL EÓLICO, MAPA DOS VENTOS.....	15
2.2	MÁQUINAS DE FLUXO GERADORAS DE POTÊNCIA .....	18
2.2.1	<i>ELEMENTOS CONSTRUTIVOS.....</i>	<i>18</i>
2.2.1.1	<i>O ROTOR.....</i>	<i>19</i>
2.2.1.2	<i>NACELE .....</i>	<i>20</i>
2.2.1.3	<i>GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA .....</i>	<i>20</i>
2.2.1.4	<i>GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA .....</i>	<i>21</i>
2.2.1.5	<i>TORRE DE SUSTENTAÇÃO.....</i>	<i>21</i>
2.3	GERADORES EÓLICOS, TIPOS E CARACTERÍSTICAS .....	22
2.3.1	<i>AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL (TEEH) .....</i>	<i>23</i>
2.3.2	<i>AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL (TEEV).....</i>	<i>24</i>
2.4	CÁLCULO DA POTÊNCIA TEÓRICA.....	25
2.4.1	<i>MODELAMENTO MATEMÁTICO.....</i>	<i>26</i>
2.5	CÁLCULO DE VIABILIDADE - PAYBACK DESCONTADO .....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1	O LOCAL.....	30
3.2	PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO AEROGERADOR.....	30
3.3	LEVANTAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	30
3.4	CONFECÇÃO E MONTAGEM DOS COMPONENTES .....	31
3.4.1	<i>O GERADOR .....</i>	<i>31</i>
3.4.2	<i>MANCAL DE APOIO DO GERADOR .....</i>	<i>32</i>
3.4.3	<i>AS PÁS.....</i>	<i>33</i>
3.4.4	<i>SISTEMA DE TRANSMISSÃO.....</i>	<i>36</i>
3.4.5	<i>LEME.....</i>	<i>37</i>
3.4.6	<i>ESTRUTURA DO NACELE .....</i>	<i>38</i>
3.4.7	<i>MONTAGEM DA TURBINA.....</i>	<i>39</i>

<b>3.4.7.1</b>	<b><i>TORRE DE SUSTENTAÇÃO</i></b> .....	<b>40</b>
<b>3.5</b>	<b>LEVANTAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>40</b>
<b>3.5.1</b>	<b><i>INSTRUMENTOS PARA ANÁLISE DE POTÊNCIA</i></b> .....	<b>41</b>
<b>3.5.1.1</b>	<b><i>MULTÍMETRO</i></b> .....	<b>41</b>
<b>3.5.1.2</b>	<b><i>RETIFICADOR</i></b> .....	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>55</b>

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Dados de vento a 5 m de altura.....	15
Tabela 2 – Relação entre velocidade de rotação e corrente gerada.....	39
Tabela 3 – Relação entre velocidade de rotação e tensão gerada.....	39
Tabela 4 – Dados de entrada, potência teórica, real e eficiência da turbina.....	43
Tabela 5 – Orçamento geral do micro aerogerador.....	45
Tabela 6 – Análise de payback descontado.....	46

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantidade de aerogeradores instalados nos estados brasileiros.....	14
Figura 2 - Mapa do estado de Pernambuco, local de aplicação do Micro aerogerador.....	14
Figura 3 - Ilustração do planalto da Borborema e faixa de altitude.....	14
Figura 4 - Elementos construtivos de uma turbina eólica.....	16
Figura 5 - Identificação do rotor, A – Bomba centrífuga e B- Turbina eólica.....	17
Figura 6 - Tipos de torres, A – Torre treliçada e B- Torre estaiada.....	19
Figura 7 - Turbinas de eixo horizontal TEEH, complexo eólico de Osório-RS.....	21
Figura 8 - Turbinas de eixo vertical TEEV.....	22
Figura 9 - Coeficiente de potência x Relação das velocidades entrada e saída $V_2/V_1$ .....	26
Figura 10 - Estufa para cultivo de flores de LED.....	28
Figura 11 - Motor-estator máquina de lavar.....	28
Figura 12 - Processo de confecção do mancal da turbina.....	29
Figura 13 - Processo de confecção das pás da turbina.....	30
Figura 14 - Processo de confecção da transmissão.....	31
Figura 15 - Dimensões da pá.....	32
Figura 16 - Fixação das pás.....	32
Figura 17- Processo de confecção da transmissão.....	33
Figura 18 - Processo de confecção do Leme.....	34
Figura 19 - Estrutura de suporte do gerador.....	36
Figura 20 - Montagem do micro aerogerador.....	37
Figura 21 - Multímetro digital.....	38
Figura 22 - Ilustração medição da corrente gerada.....	39
Figura 23 - Retificador de onda completa – Em ponte.....	39
Figura 24 - Retificador de onda completa, (b) - Regulador de tensão.....	40
Figura 25 - Distribuição do coeficiente de potência para diversos tipos de rotores.....	43
Figura 26 - Cartilha de montagem do micro aerogerador.....	47

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

<i>M</i>	Mega
k	Quilo
W	Watts
Wh	Watts hora
CRESESB	Centro de referência para energia solar e eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
LAT	Latitude
LON	Longitude
<i>m</i>	Metro
m/s	Metro por segundo
RPM	Rotações por minuto
N	Newton
cm	Centímetro
mm	Milímetro
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
1”	Uma polegada
V	Voltz
A	Ampere
Ah	Ampere-hora
<i>m</i> <sup>2</sup>	Metro quadrado
SKF	Svenska Kullager Fabriken

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O ar é um fluido de baixa densidade que se move rapidamente na forma de vento que gera energia cinética, associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme (CARVALHO, 2003). Os ventos provêm de um fenômeno natural, em que os raios solares ao aquecerem a superfície terrestre causam uma diferença de gradiente de pressão atmosférica, gerando um deslocamento de ar (ANEEL, 2002). A região nordeste tem apresentado resultados satisfatórios quanto ao seu potencial eólico, o estado de Pernambuco figura, atualmente, na sétima posição dos estados brasileiros que mais utiliza aerogeradores como fonte de energia, contando com uma potência instalada de 782 MW (ABEEOLICA, 2018) sendo mais da metade localizada no agreste pernambucano.

Figura 1 – Quantidade de aerogeradores instalados nos estados brasileiros



Fonte: ANEEL, 2020.

Turbinas eólicas são máquinas que extraem a energia cinética do vento por efeitos aerodinâmicos e transformam em energia mecânica, em movimento rotacional. Normalmente estas turbinas são utilizadas para a geração de energia elétrica através de acoplamento com geradores, mas também, podem ser utilizadas em outros sistemas mecânicos. As turbinas eólicas são subdivididas em turbinas de eixo vertical e horizontal, além disso podem ser

classificadas de acordo com seu perfil, tamanho, número de pás, entre outras classificações (CESAR; PAIVA, 2016).

Cada modelo de turbina apresenta suas características, como: Potência, eficiência, velocidade de partida, aerodinâmica, complexidade de fabricação, peso, custo e outros.

Tendo em vista esses aspectos, esse trabalho busca desenvolver um protótipo de geração eólica com dimensões reduzidas, de eixo horizontal e baixo custo, utilizando em sua maioria material de reuso. Fazer o estudo teórico da geração de potência da turbina e propor possíveis aplicações da turbina eólica no meio rural.

## **1.1 OBJETIVO GERAL DO TRABALHO**

Implementar um sistema micro aerogerador de baixo custo em meio rural utilizando material de reuso, visando reduzir o consumo com energia elétrica, de forma auxiliar de uma estufa de flores, durante o período noturno.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Levantar o potencial eólico da região de estudo através de mapa eólico;
- Desenvolver um micro aerogerador de eixo horizontal de baixo custo, utilizando material de reuso;
- Estimar a potência desenvolvida pelo micro aerogerador de forma teórica;
- Levantar os dados experimentais do protótipo, em campo;
- Analisar os custos do projeto;
- Realizar um estudo de Viabilidade econômica
- Analisar aplicações do protótipo no meio rural;

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 POTENCIAL EÓLICO, MAPA DOS VENTOS**

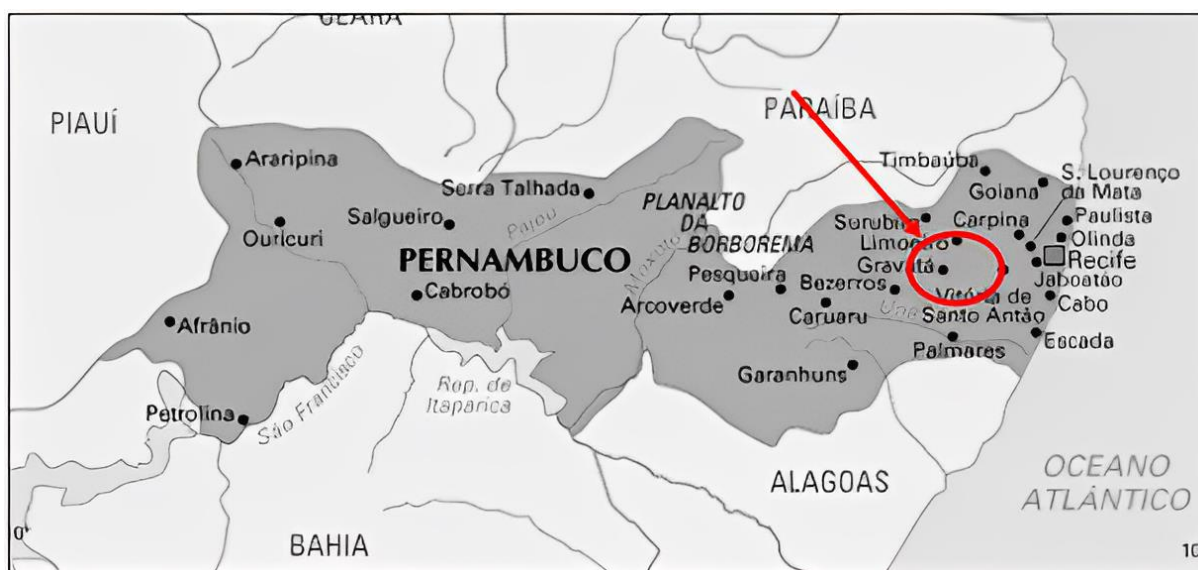
Um dos principais parâmetros que devem ser avaliados em um projeto eólico é o potencial dos ventos na região onde será instalado a turbina eólica. Uma análise própria, usando instrumentos de medição pode se tornar inviável devido ao custo associado e ao tempo que

levaria para o levantamento de dados a respeito da velocidade dos ventos naquela determinada região, pensando nisso, a proposta desse trabalho foi utilizar os dados disponíveis no Mapa eólico disponibilizado pela CRESESB, trata-se de valores mais genéricos a respeito dos dados locais de velocidade do vento variando em relação a distância do solo, estimados em um intervalo de tempo de um ano.

De acordo com (FADIGAS, 2011) a medição exata de uma área extensa a partir de instrumentos é muito custosa. Quando não se tem certeza se o potencial eólico do local será suficiente ou não para a instalação de um gerador. Portanto quando os investimentos são limitados, usam-se fontes de dados que fornecem informações mais gerais, e que podem dar uma boa indicação do potencial eólico do local.

A localidade proposta para a aplicação do projeto, distrito da cidade de Gravatá-PE, Uruçu-Mirim está a LAT: -8,3450°; LON: -35,6036°.

Figura 2 – Mapa do estado de Pernambuco, local de aplicação do Micro aerogerador.

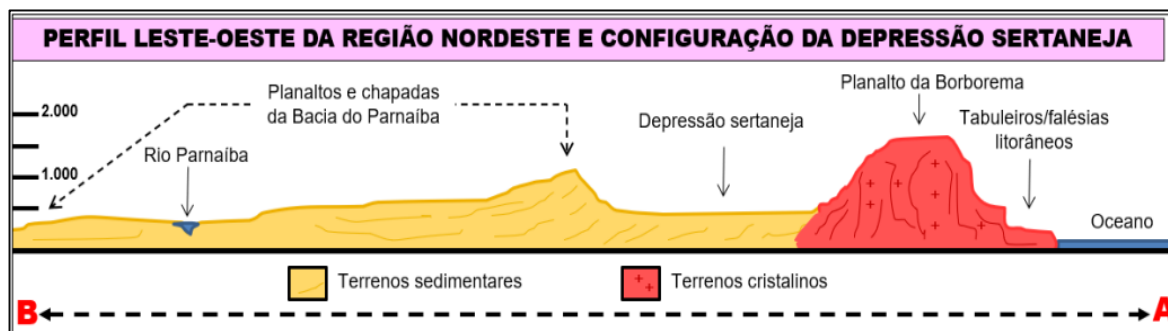


Fonte: Encontra Pernambuco - Mapas

De acordo com (BARROS et al., 2016), Pernambuco tem no interior do estado, uma região de alta elevação devido estar localizada no planalto da Borborema, região serrana que tem aproximadamente 400 quilômetros de extensão, altitude média de 500 metros em relação ao nível do mar e picos que chegam a 1260 metros de altitude, e um grande potencial devido a força dos ventos.



Figura 3 – Ilustração do planalto da Borborema e faixa de altitude.



Fonte: Editora Opirus – Geografia

O CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica), fornece uma série de dados históricos que cobre todo o território nacional acerca das grandezas de velocidade média anual e direção dos ventos para diversas alturas, por meio de equacionamentos e correlações matemáticas, obtivemos os resultados das velocidades dos ventos a 5 m de altura. Essa análise é importante para estimar a potência teórica desenvolvida.

Tabela 1 – Dados de vento a 5 m de altura.

Grandeza	Dados de vento a 5 m de altura				
	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
Velocidade média dos ventos (m/s)	4,482	4,031	4,325	4,568	4,353

Fonte: Cresesb, 2020.

De acordo com (MARQUES, 2004), a velocidade mínima dos ventos para dar partida em uma turbina eólica varia de 2,5 a 5 m/s a depender de aspectos estruturais e aerodinâmicos, como perfil das pás e inércia do rotor, por outro lado ventos muito fortes podem prejudicar o funcionamento da turbina eólica, devido as elevadas velocidades o rotor da turbina eólica rotaciona com velocidades muito elevada e se comporta como um disco, fazendo com que a força distribuída atue sob as pás defletindo-as até a quebra, causando um colapso em seu funcionamento. A partir da referência e da tabela 1, conclui-se que os melhores locais para aplicação de uma turbina eólica sejam locais onde apresente velocidade do vento constante, acima de 4 m/s e que não ultrapasse os 20 m/s.

## **2.2 MÁQUINAS DE FLUXO GERADORAS DE POTÊNCIA**

As máquinas de fluxo são dispositivos que têm por interesse a transformação de energia mecânica em energia de fluido e vice-versa (MACINTYRE, 1997). Dentre elas podemos destacar as bombas, turbinas, compressores e ventiladores. Uma das características comuns entre todos estes equipamentos é a ocorrência contínua de escoamento de fluido (água ou gases), sendo este, necessário para a geração de energia nas turbinas. Podemos dividir as máquinas de fluxo em: Térmicas e hidráulicas, sendo que ambas, por sua vez, dividem-se em motrizes e geratrizes.

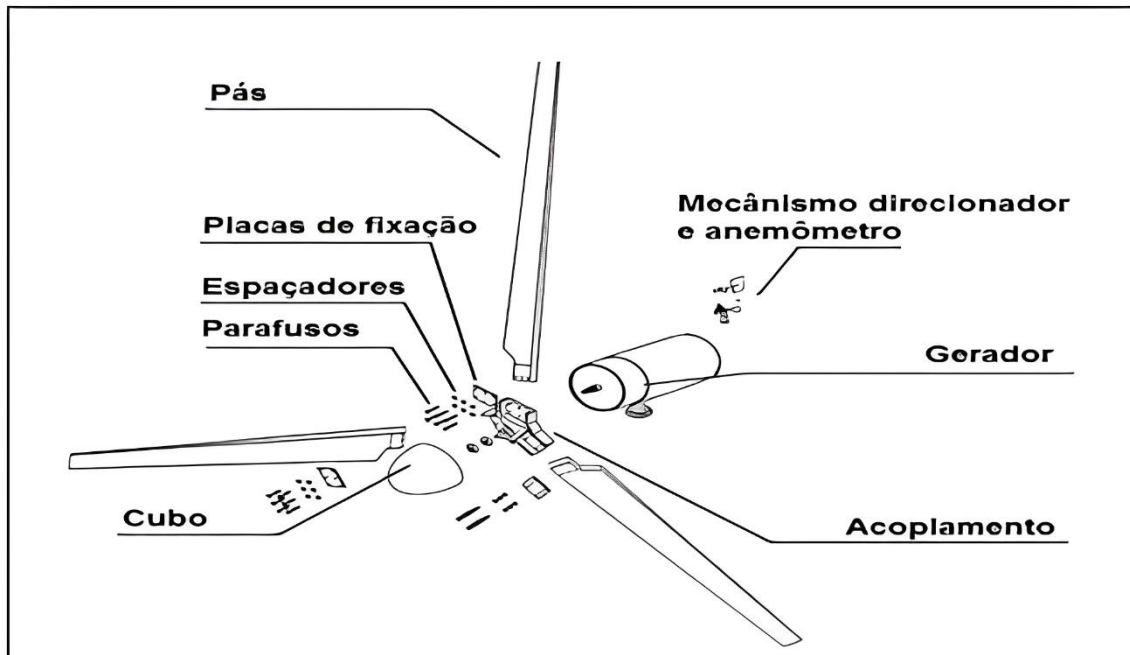
Segundo (MACINTYRE, 1997) nas máquinas geratrizes o trabalho fornecido é transformado em energia de fluido, fato este que provoca o aumento de energia quando o fluido passa pelo equipamento. Dentre elas podemos destacar os ventiladores e as bombas centrífugas.

As responsáveis por gerar potência, também conhecidas como máquinas motrizes são aquelas que transformam a energia contida em um fluxo natural em energia mecânica, que, quando acopladas a um gerador, geram energia elétrica. Como por exemplo, turbinas eólicas e turbinas hidráulicas. Como o foco desse trabalho está voltado para turbinas eólica de pequeno porte, daremos ênfase nos elementos construtivos do tipo motrizes.

### **2.2.1 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS**

As turbinas eólicas têm como uma de suas aplicações sistemas autônomos com carregamento de baterias. Geradores síncronos de ímã permanente vêm sendo utilizados em pequenos sistemas de geração de energia, particularmente em sistemas eólicos. São tipicamente construídos com ímãs fixados ao rotor e enrolamentos trifásicos no estator. Sua corrente alternada é convertida em corrente contínua através de um retificador de onda completa. Esta é uma opção atrativa em aplicações em energia eólica, primeiramente pelo fato de não ser necessária energia externa para excitar o campo magnético, e pelo fato de o atrito mecânico ser menor devido à ausência de escovas no gerador (Lopez, 2007). A topologia do sistema de aerogerador de pequeno porte é ilustrada na figura abaixo:

Figura 4. Elementos construtivos de uma turbina eólica.



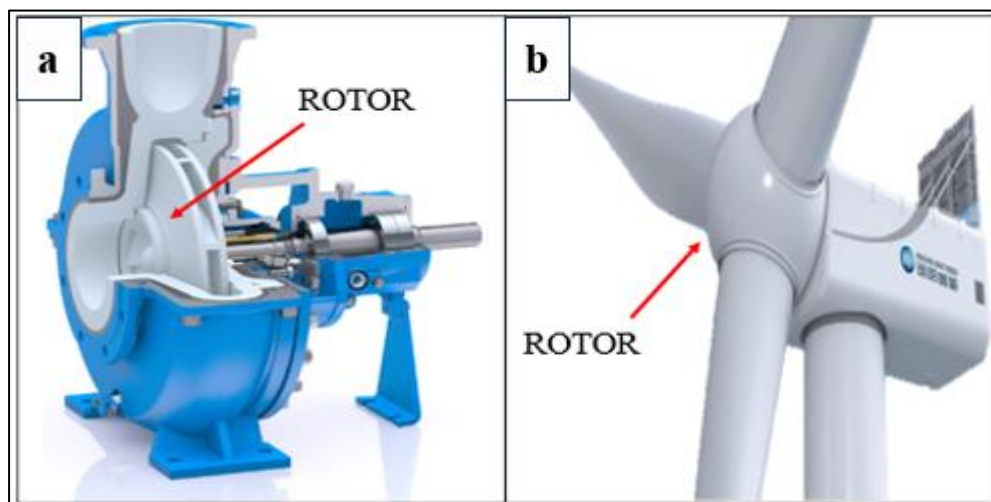
Fonte: Mundo da elétrica – Turbinas eólicas

### 2.2.1.1 O ROTOR

O elemento construtivo principal de uma máquina de fluxo é o rotor, que é órgão principal, onde ficam acopladas as pás, no qual ocorre o intercâmbio de energia cinética cedida pelo fluido e a energia mecânica rotacional da máquina. É constituído por certo número de pás giratórias que dividem o espaço ocupado em canais, por onde circula o fluido de trabalho. Aerodinamicamente projetado para ocupar a área máxima de atuação do fluido, no caso das turbinas eólicas, são em sua maioria fabricados de material leve e resistente, como por exemplo: Fibra de vidro, compósitos ou plástico reforçado.

Outro material frequentemente usado em aerogeradores de pequeno porte é a madeira, sendo muito empregada na fabricação de rotores de pequeno porte, para perfis aerodinâmicos simples, as quais são como as pás em fibra de vidro de baixo custo de produção, forte e resistente à fadiga (Peterson e Clausen, 2004).

Figura 5 Identificação do rotor, (a) – Máquina Geratriz, (b) – Máquina Motriz.



Fonte: Bombas e manutenção; Mundo conectado – Rotores

### 2.2.1.2 NACELE

É o componente da turbina montado em cima da torre de sustentação, responsável por acomodar diversos outros componentes como: caixas de câmbio, geradores, eixos de baixa e alta velocidade, controladores e freios. O nacele geralmente fabricada em fibra ou aço, e tem como função principal proteger os componentes elétricos das atividades climáticas e servir como suporte estrutural.

### 2.2.1.3 GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA

O uso de geradores de corrente contínua para turbinas de pequeno porte é determinado pelo conjunto do sistema. Em locais remotos onde é necessário carregar baterias são utilizados equipamentos geradores de corrente contínua. A maioria dos projetistas escolhem frequentemente sistema de geração por indução para aplicações onde o aerogerador será conectado à rede elétrica (Alé et al, 2004). Durante os anos 30 era comum o uso de conversores de energia mecânica em elétrica para carregar bancos de baterias em corrente contínua (CC). Nestes equipamentos, a corrente elétrica passava diretamente do rotor por escovas rotatórias, este sistema gera atrito o que torna a produção de energia menor em relação aos geradores de

ímã permanente. Geradores de ímã permanente apresentam como vantagem a redução na frequência de manutenção em relação aos geradores que utilizavam escovas (Alé et al, 2004).

#### **2.2.1.4 GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA**

É comum encontrar aerogeradores de pequeno porte construídos usando alternadores automotivos, os quais usam materiais mais eficientes em relação aos geradores CC, onde a corrente passa fora do estator. Os anéis de um alternador comum transportam apenas a corrente suficiente para criar o campo magnético, portanto, não há necessidade de substituir escovas reduzindo custo de manutenção. A saída em corrente alternada é retificada para corrente contínua para carregar baterias. Em alguns casos, a tensão variável corrente alternada (CA) é primeiramente retificada para CC, então é invertido de volta para frequência constante para entregar a energia produzida a rede elétrica. Isso é chamado de sistema elétrico CA/CC/CA (Pereira, 2004).

Apesar de mais eficientes, os alternadores apresentam uma característica negativa em relação aos geradores de CC, os mesmos precisam de altas velocidades rotacionais para dar início na geração elétrica, o que inviabiliza sua aplicação a pequenas turbinas eólicas. Além disso a necessidade de um retificador de CA/CC se for usado sistemas de armazenamento em baterias, ou aplicação de um inversor de frequência se o gerador for ligado diretamente a rede elétrica.

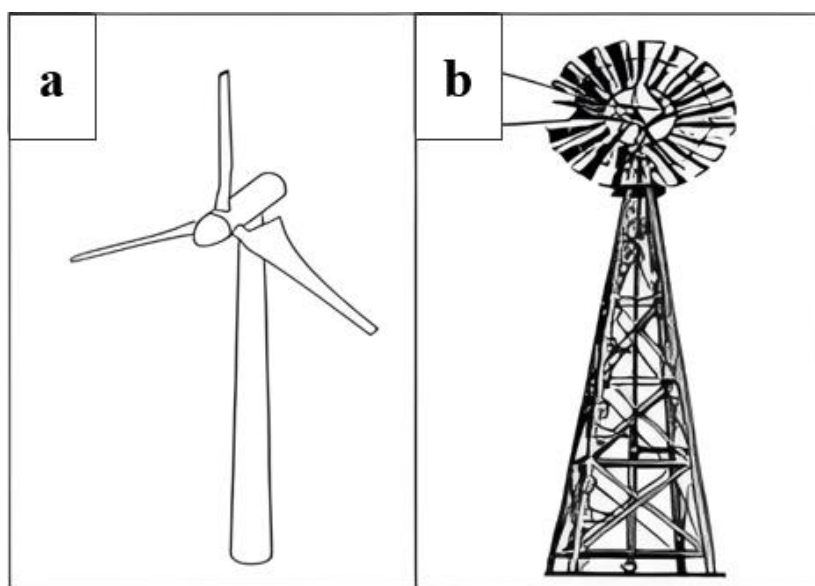
#### **2.2.1.5 TORRE DE SUSTENTAÇÃO**

Para posicionamento do rotor na região de trabalho onde foi realizado a análise do potencial eólico, a 5 m de altura, é utilizado a torre de sustentação. As torres, para turbinas eólicas de pequeno porte, são geralmente colocadas a uma altura mínima que deve ser maior do que o raio do rotor, com o objetivo de eliminar acidentes e evitar colisões. Ao contrário do predomínio de torres autoportantes metálicas para turbinas eólicas comerciais, as do tipo estaiadas tornaram-se mais populares para projetos de pequena dimensão. Torres treliçadas de madeira, são menos onerosas e muitas vezes mais fáceis de instalar do que as autoportantes para uma mesma altura.

A instalação requer apenas ferramentas manuais simples como por exemplo: Martelo, serrote, furadeira etc. Um veículo com guincho, ou sistema de polias para içamento.

Turbinas de pequeno porte são geralmente montadas em mastros de torres que são constituídos a partir de uma variedade de materiais, incluindo madeira, fibra de vidro, concreto e aço tubular. Para as turbinas a partir de 1 kW até 5 kW, postes de transmissão oferecem uma opção barata de torre. São ajustados para diferentes cargas e podem ser dimensionados para as cargas produzidas pela turbina.

Figura 6. Tipos de torres, (a) – Torre de mastro e (b) – Torre treliçada.



Fonte: Marin, I. 2016, adaptado.

### 2.3 GERADORES EÓLICOS, TIPOS E CARACTERÍSTICAS

Existem variações possíveis a serem aplicadas em aerogeradores, desde diferenças bruscas como é o caso das mudanças estruturais (eixo horizontais ou verticais), a utilização ou não de naceles na estrutura. Até diferenças não tão visíveis, como tipo de gerador utilizado, controle aplicado ou até mesmo mudanças como o desuso das caixas de engrenagens. Cada aerogerador com suas particularidades, em relação a aerodinâmica, eficiência, velocidade de partida, potência e outros. Nesse estudo daremos ênfase as diferenças estruturais entre os modelos de turbinas de eixo horizontal e eixo vertical.

### 2.3.1 AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL (TEEH)

A versatilidade desse tipo de estrutura figura 6 (a), permite que sejam usadas para aplicações de pequenas, médias e grandes potências, operando com maior potência por unidade de área na captação de ventos, e em sua maioria com um rendimento final superior ao modelo de eixo vertical (FADIGAS, 2011).

A turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) tem como uma de suas aplicações sistemas autônomos com carregamento de baterias. Geradores síncronos de ímã permanente vêm sendo utilizados em pequenos aerogeradores. São tipicamente construídos com ímãs fixados ao rotor e enrolamentos trifásicos no estator.

A CA gerada é convertida em CC através de um retificador de corrente. Esta é uma opção atrativa em aplicações em energia eólica, primeiramente pelo fato de não ser necessária energia externa para excitar o campo magnético, e também pelo fato de o atrito ser menor devido à ausência de escovas no gerador (Alé e Lopez, 2004).

Em muitos aspectos, as turbinas eólicas de pequeno porte se assemelham com as de grande porte. Um dos aspectos estruturais que as tornam diferentes, além da dimensão, é a necessidade de um leme na calda do equipamento para direcioná-lo a direção em que o vento está escoando no momento.

O aerogerador de três pás devido ao salto tecnológico alcançado por essas estruturas é capaz de gerar com maior rendimento, durabilidade e manutenibilidade, com vantagens econômicas. No Brasil esse tipo de estrutura é a mais usada em parques eólicos, a figura 7 mostra a instalação do complexo eólico na cidade de Osório no Rio Grande do Sul, composto por aerogeradores de três pás, o complexo já foi o maior parque eólico da América Latina. Atualmente, segundo o Global Wind Energy Council (GWEC) o maior parque eólico da América Latina é o parque Lagoa dos Ventos localizado no município de Lagoa do Barro-PI.

Entretanto, aerogeradores de três pás apresentam como desvantagem a dificuldade de realização do balanceamento, sendo necessário equipamentos precisos que trabalhem com angulação de 120°.

Como um dos enfoques desse trabalho é a montagem utilizaremos como base o modelo de seis pás, uma vez que requer equipamentos com baixa precisão para realizar a angulação de 60° entre as pás e tem melhor estabilidade dinâmica quando em funcionamento, devido a sua distribuição de massa mais uniforme e ter melhor balanceamento.

Figura 7. Turbinas de eixo horizontal (TEEH), complexo eólico de Osório-RS.



Fonte: Jornal do comércio – Meio ambiente.

### **2.3.2 AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL (TEEV)**

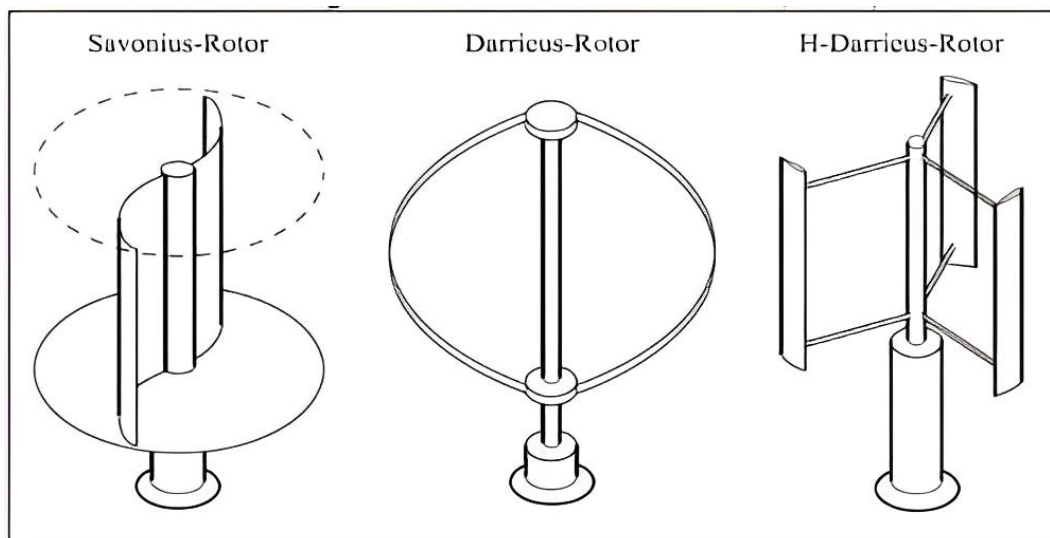
Mesmo com menos popularidade esse tipo de estrutura está em constante desenvolvimento sendo objeto de estudos em nações com grande poder econômico como é o caso de Alemanha e França (GWEC, 2016). Entre as principais vantagens de utilização da TEEV se destacam, o fato de aerogeradores de eixo vertical não precisar de mecanismos que ajustem a posição do rotor, pois a estrutura vertical é capaz de receber ventos de todas as direções. Outro fator vantajoso é a capacidade de alocação dos componentes principais do aerogerador em solo, o que traz facilidade de instalação, medição ou qualquer tipo de manobra necessária (FADIGAS, 2011).

Embora mesmo com os componentes em solo, a manutenção nesse tipo de aerogerador não é simples, pois é necessária a remoção dos rotores para tal atividade. Mesmo recebendo incidência dos ventos de todas as direções a potência eólica que incidem sobre esses aerogeradores são menores do que nas turbinas de eixos horizontais, entre os modelos mais populares estão o modelo Darrieus, Savonius, eixo vertical tipo H e eixo vertical tipo V (BIANCHI, 2007).

As principais vantagens das TEEV são o torque de partida alto e simplicidade em sua construção, tendo como desvantagem principal, a incapacidade de o rotor suportar níveis altos dos ventos (JHONSON, 2001).



Figura 8. Turbinas de eixo vertical (TEEV).



Fonte: Emule, A. 2017.

Apesar da quantidade de projetos iniciados visando à penetração no mercado das TEEV, poucos permaneceram, pois segundo alguns testes, máquinas desta natureza não eram competitivos em termos de custos com turbinas de eixo horizontal (Alé et al, 2004). Portanto, existe um número limitado de fabricantes que produzem as TEEV ao redor do mundo.

## 2.4 CÁLCULO DA POTÊNCIA TEÓRICA

O principal componente de uma turbina eólica é o rotor, que transforma a energia cinética, contida no ar que se move, em energia mecânica rotacional. A extração ocorre a partir de uma corrente de ar em movimento, girando as pás do gerador de energia eólica.

Segundo Betz (*apud* HAU, 2013) a aplicação das leis da fluidodinâmica, a energia mecânica extraída a partir de uma corrente de ar que passa através de uma dada área da secção transversal é limitada a uma determinada proporção ( $C_p$ ). Além disso, ele descobriu que a extração ótima de energia realizada é obtida para uma determinada razão entre a velocidade do fluxo de ar (velocidade do vento não perturbado à frente da turbina) e a velocidade de escoamento por trás da turbina.

Apesar da teoria de Betz assumir um conversor de energia sem perdas em um fluxo de ar sem atrito, seus resultados são bastantes úteis para a realização de cálculos aproximados, mas o seu verdadeiro significado consiste no fato de que ele fornece uma base física para a

compreensão e operação de geradores de energia eólica. Por esta razão, neste trabalho utilizaremos os conceitos básicos para a determinação do “limite de Betz” aplicado a um micro aerogerador caseiro.

#### 2.4.1 MODELAMENTO MATEMÁTICO

Usando a equação da força exercida por um fluido, a força que o ar exerce no conversor segundo Betz (*apud* HAU, 2013) pode ser expressa como:

$$F = \dot{m} (V_1 - V_2) \quad (\text{I})$$

Onde:

F: Força [N];

$\dot{m}$ : Fluxo de massa do ar [kg/s];

$V_1$ : Velocidade do fluido na entrada[m/s].

$V_2$ : Velocidade do fluido na saída[m/s].

E, considerando o ar como fluido incompressível.

A energia necessária para isso é:

$$P = Fv' = \dot{m} (V_1 - V_2)v' \quad (\text{II})$$

Onde:

P: Potência [W];

F: Força [N];

$v'$ : Velocidade do fluxo [m/s].

Assim, a potência mecânica extraída do fluxo de ar pode ser obtida a partir da variação de energia cinética antes e depois do conversor, do impulso e da velocidade do fluxo. A equivalência das equações (II) com a variação de energia cinética produz a relação para a velocidade do fluxo  $v'$ :

$$\frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) = \dot{m} (V_1 + V_2) v' \quad (\text{III})$$

Considerações:

$V_2$ : Velocidade do fluido na saída [m/s], é um valor muito próximo de zero, assim, obtemos velocidade de fluxo como sendo a média relativa entre as velocidades de entrada e saída:

$$v' = \frac{1}{2} (V_1 - V_2) \quad (\text{IV})$$

Onde:

$\dot{m}$ : Fluxo de massa do ar [kg/s];

$V_1$ : Velocidade do fluido na entrada[m/s].

$V_2$ : Velocidade do fluido na saída[m/s].

$v'$  : Velocidade do fluxo [m/s].

Logo, temos o fluxo de massa ar que passa pela turbina como:

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2} \rho A (V_1 - V_2) \quad (\text{V})$$

Onde:

$\rho$ : Massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

A: Área de entrada do fluxo [m<sup>2</sup>].

A potência mecânica do conversor pode ser escrita como:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 = \frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2) (V_1 - V_2) \quad (\text{VI})$$

Onde:

$P$ : Potência [W];

$\rho$ : Massa específica [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$A$ : Área de entrada do fluxo [ $\text{m}^2$ ].

$V_1$ : Velocidade do fluido na entrada[m/s].

$V_2$ : Velocidade do fluido na saída[m/s].

$v'$ : Velocidade do fluxo [m/s].

De modo a fornecer uma referência para esta potência, que é comparada com a potência da corrente de ar livre que flui através da mesma área transversal  $A$ , pode-se escrever:

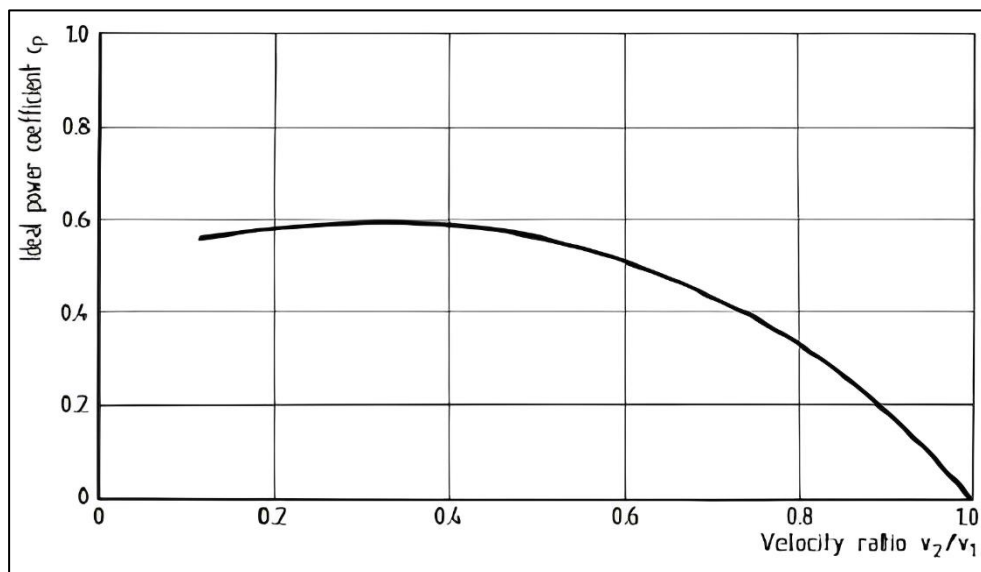
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (\text{VII})$$

A relação entre a potência mecânica extraída pelo conversor e a do fluxo de ar é chamada de coeficiente de potência -  $C_p$ :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2) (V_1 - V_2)}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (\text{VIII})$$

O coeficiente de potência  $C_p$  representa o percentual de potência disponível do vento que pode ser extraído pela turbina eólica. Se esta inter-relação é representada graficamente, como apresentado na figura 9, naturalmente uma solução analítica pode também ser facilmente encontrada, para o gráfico obtido abaixo verifica-se que o coeficiente de potência atinge um máximo a uma certa proporção de velocidade segundo Betz (*apud* HAU, 2013).

Figura 9. Coeficiente de potência x Relação das velocidades entrada e saída  $V_2/V_1$ .



Fonte: Hau, 2013.

## 2.5 CÁLCULO DE VIABILIDADE - PAYBACK DESCONTADO

O estudo de viabilidade de um projeto é apresentado no sentido de fornecer informações para o empreendedor escolher se irá ou não aceitar os riscos e as possibilidades associadas à abertura de um novo empreendimento.

Segundo Dolabela (1999), um bom negócio é fruto da identificação de uma oportunidade e seu posterior estudo de viabilidade, a fim de tomar uma decisão satisfatória que proporcione avanços na empresa.

Nesse estudo será abordado apenas uma ferramenta para análise de viabilidade, o *payback* descontado, que conforme Nogueira (2007) consiste em determinar o número de períodos necessários para recuperar o capital investido. O qual avalia a atratividade de um investimento.

Complementando, de acordo com Rasoto et al. (2012) o *Payback* descontado demonstra o tempo necessário para que os benefícios do projeto recompensem o montante investido, ou seja, para que as entradas de caixa se equiparem ao que foi aplicado, podendo ser apontado como risco para o projeto.

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo destina-se ao entendimento do modo de como o trabalho foi construído, começando com uma breve caracterização do local de aplicação do projeto, dos seus aspectos geográficos, e pôr fim a execução do trabalho em si, abordando a metodologia, as ferramentas e técnicas utilizadas.

#### **3.1 O LOCAL**

O local escolhido para realização dos testes e a implementação do protótipo foi o distrito de Mandacaru, pertencente ao município de Gravatá, agreste pernambucano. Tal escolha foi devido a boa localização geográfica em relação a geração eólica, e a velocidade dos ventos. Sendo vizinho a um parque eólico e a uma região que predomina a agricultura familiar, o local escolhido atende as demandas do projeto de boa localização geográfica em relação a potencial eólico e aplicação do protótipo em um meio rural.

#### **3.2 PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO AEROGERADOR**

O local se destaca por ser um dos principais produtores de flores do estado. O desenvolvimento das flores está diretamente ligado com a quantidade de luz e calor emitida sob sua superfície, dessa forma, os agricultores usam artifícios que promovem uma aceleração do período de desenvolvimento das flores, trata-se de deixar as flores recebendo luz natural durante o dia, proveniente da luz solar, e a noite, luz artificial proveniente de lâmpadas elétricas através de uma estufa.

Tendo em vista essa necessidade, os produtores rurais locais apresentam um elevado consumo de energia elétrica para manter ativada as estufas que aquecem sua plantação durante o período noturno. Sabendo disso a proposta desse trabalho é aplicar o micro aerogerador em uma pequena propriedade rural produtora de flores que está situada nesse vilarejo.

#### **3.3 LEVANTAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

O levantamento de consumo médio e valor da fatura foi realizado com base na estrutura que a propriedade rural tem instalada. Esse levantamento foi realizado tendo como referência a quantidade de lâmpadas que a estufa possui e em seu consumo médio.

A área compreendida conta com um terreno de dimensões 10 x 15 m e com 20 lâmpadas de led 10 W distribuídas uniformemente conforme ilustração:

Figura 10. Estufa para cultivo de flores com iluminação artificial – Lâmpadas de LED.



Fonte: Autor, 2023.

Desconsiderando as perdas e dissipação de energia concluímos que o consumo da estufa é de 200 Wh de potência. Para esse trabalho em questão, não levamos em consideração a configuração de instalação das lâmpadas, quantidade aplicada, tipo e luminosidade requerida pela plantação.

### **3.4 CONFEÇÃO E MONTAGEM DOS COMPONENTES**

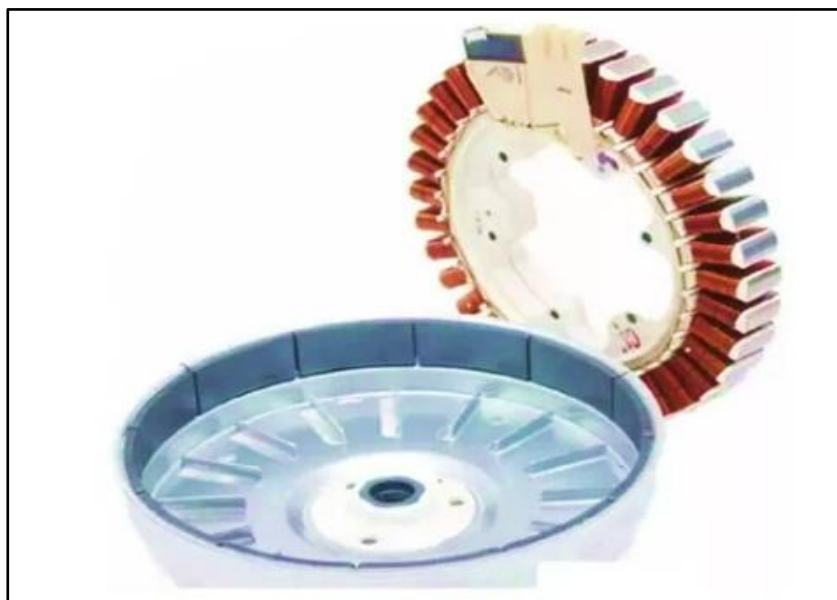
Tendo em vista que o propósito desse trabalho é a elaboração de um protótipo de baixo custo, a reutilização de componentes para a confecção desse protótipo é a forma encontrada de produzir um micro aerogerador de baixo custo e consequentemente acessível para a comunidade atendida nesse trabalho.

#### **3.4.1 O GERADOR**

O gerador escolhido para a confecção do projeto foi um motor de máquina de lavar do tipo lava e seca da marca Samsung, trata-se de um motor-estator (refugo de uma máquina de lavar doméstica), movido por eletroímãs e que a nível de geração elétrica, foi o que melhor

correspondeu em relação aos valores de corrente gerada em comparação a outros modelos, como por exemplo, o motor da lava e seca marca LG.

Figura 11. Motor-estator máquina de lavar.



Fonte: SSR PARTS – Lava e seca.

Para micro aerogeradores que trabalham com velocidade média de 60 RPM o motor de máquina de lavar tem ganhado notoriedade devido a sua capacidade de geração de energia elétrica a baixas rotações, que figura em torno de 9 A, outro gerador de baixo custo e comumente achado como sucata é o alternador veicular. No entanto esse não é aplicável devido a sua velocidade de trabalho, em torno de 1000 RPM.

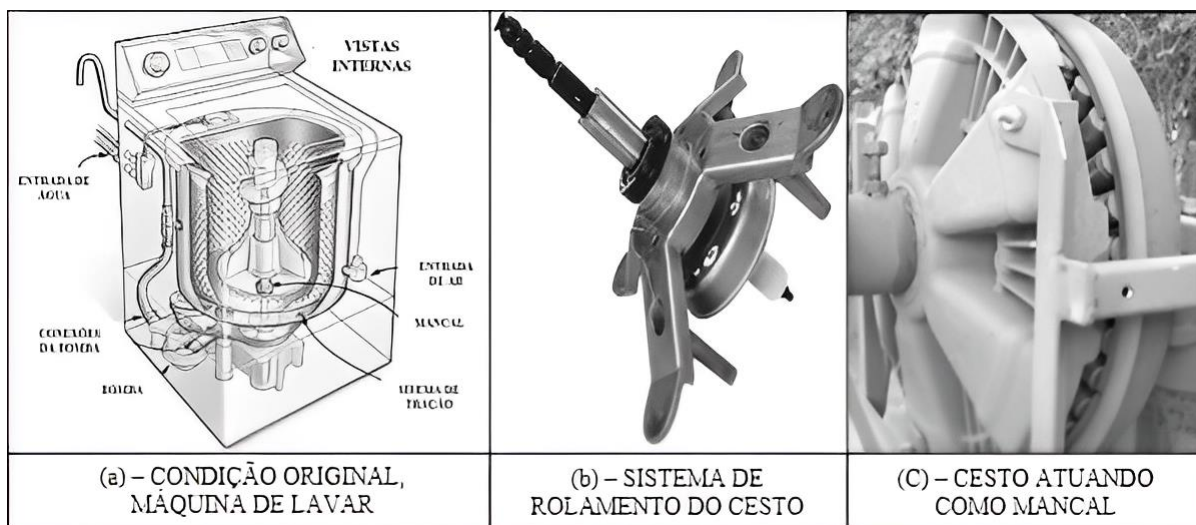
### 3.4.2 MANCAL DE APOIO DO GERADOR

Tendo em vista que o conjunto motor, eixo e cesta da máquina de lavar estão acoplados e há transmissão de força do motor para o cesto em forma de movimento giratório, usamos o próprio cesto da máquina de lavar como mancal para o eixo de movimento das pás da turbina eólica.

A figura 12, detalha o processamento que foi submetido o cesto da máquina de lavar para se tornar compatível ao mancal que irá acoplado o eixo da turbina eólica.



Figura 12. Processo de confecção do mancal da turbina



Fonte: Electrolux – Manual de instruções, adaptado.

A figura 12, ilustra os componentes antes e após ser feita a separação mancal da máquina de lavar da carcaça e do cesto. Nesse processo, inicialmente, tínhamos a máquina de lavar de acordo com a figura 12 (a), a partir dela cortamos o cesto metálico e a carcaça plástica utilizando uma serra circular, feito isso, o acabamento na parte plástica que sustenta o mancal foi realizada com lixa rotativa visando evitar partes cortantes. A figura 12 (c) mostra o resultado, o cesto plástico que contém o mancal, já com o eixo das pás, rotor e estator acoplado ao mancal.

### 3.4.3 AS PÁS

Como aerodinâmica não é o foco principal desse trabalho, o material para confecção das pás do micro aerogerador foi levado em consideração apenas a resistência ao esforço de deflexão pela força dos ventos e o custo associado ao material. As pás foram confeccionadas com material PVC, reutilizando tubulação hídrica de descarte de construção civil, a tubulação usada foi de 250 mm de diâmetro, e cortada no perfil de acordo com a figura 13.

A figura 13, detalha o processo de fabricação das pás: O tópico (a) mostra inicialmente a tubulação de 250 mm de diâmetro que usamos para a confecção das pás sendo realizado o processo corte do tubo no perfil proposto utilizando serra circular, o tópico (b) mostra a medição da espessura da tubulação de 5,6 mm utilizada para a confecção das pás e o tópico (c) mostra o acabamento das pás.

Figura 13. Processo de confecção das pás da turbina

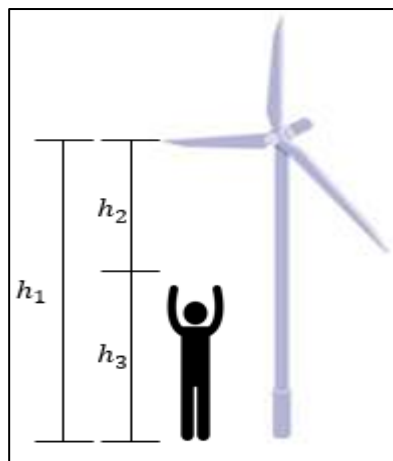


Fonte: Autor, 2023.

O comprimento das pás foi determinado de acordo com alguns critérios de segurança, tendo em vista que a torre de sustentação teve seu comprimento determinado através da análise de altura do potencial eólico, que anteriormente ficou definido em 5 m de altura ( $h_1$ ), as pás tinham que ser projetadas de forma que não oferecessem risco para as pessoas que transitassem abaixo do mastro de sustentação.

Levando em consideração que uma pessoa adulta alta e com os braços totalmente levantados alcançaria no máximo uma altura de 3,5 m de altura ( $h_3$ ), o projeto das pás não poderiam ultrapassar um comprimento de 1,5 m ( $h_2$ ), para atender esse critério de segurança, conforme mostra a figura 14.

Figura 14. Ilustração das alturas



Fonte: Autor, 2023.

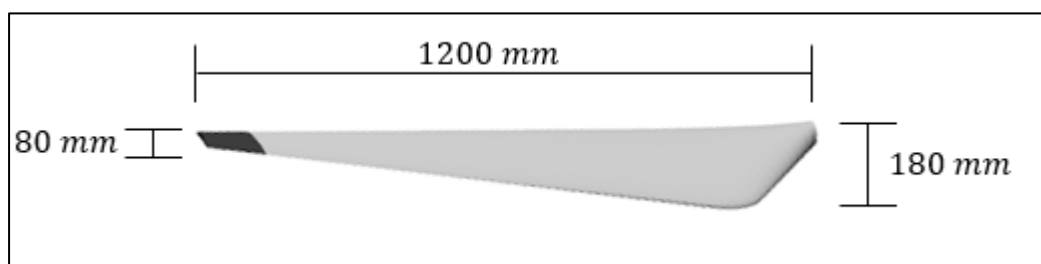
O comprimento das pás foi determinado de acordo com os critérios de segurança visto acima na figura 14.

Além do critério de segurança já mencionado, foram realizados alguns experimentos com o intuito de verificar a deflexão das pás, variando o comprimento das mesmas e mantendo a mesma espessura e material. Fabricamos, inicialmente três modelos de pás, com: 1500 mm, 1300 mm e 1200 mm.

Nesse experimento tivemos o resultado insatisfatório para as pás acima de 1200 mm, pois a deflexão gerada pelo vento fazia com que as pás colidissem com a torre, podendo vir a causar a quebra das mesmas. Como a distância entre a torre e as pás já estavam definidas pelo eixo que reutilizamos da máquina de lavar, a solução por esse trabalho proposta foi reduzir o comprimento das pás até chegar em um valor cuja deflexão não atingisse a torre.

O comprimento ideal das pás de forma que não houvesse deflexão suficiente para atingir a torre foi de 1200 mm conforma imagem abaixo:

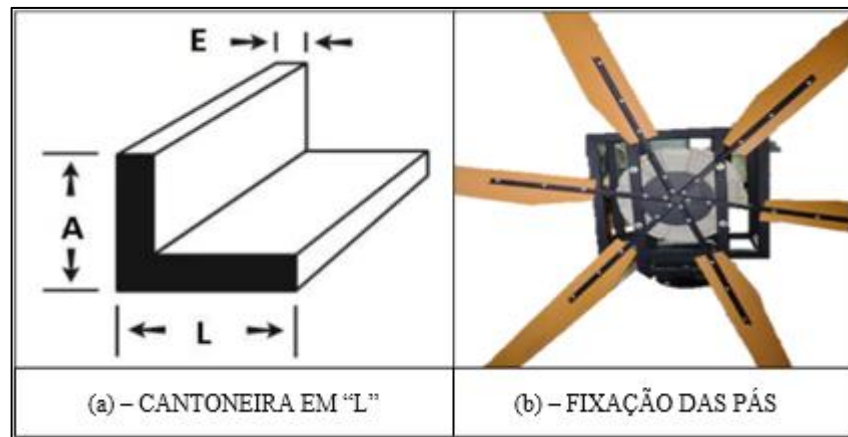
Figura 15. Dimensões da pá



Fonte: Autor, 2023.

As foram fixadas por parafusos e porcas a cantoneiras de 3/4" de altura e largura "A" e "L", e 1/8" de espessura "E" como mostrado na figura 16, por sua vez as cantoneiras foram soldadas na base do eixo de rotação que está diretamente ligado ao rotor do gerador, conforme figura abaixo:

Figura 16. Fixação das pás



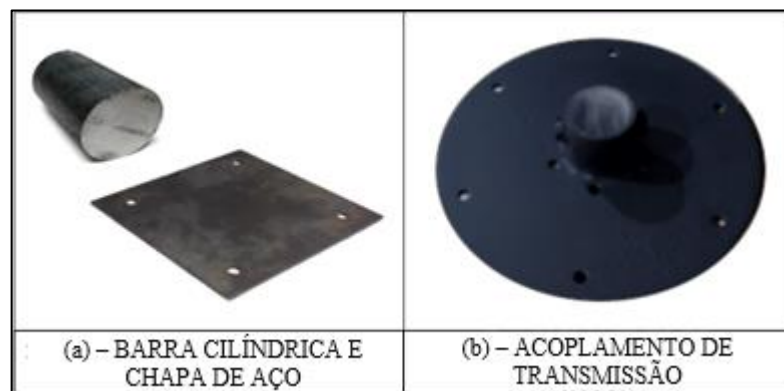
Fonte: Autor, 2023.

O comprimento estabelecido das pás foi de 1200 mm, e comprimento da cantoneira de 300 mm.

### 3.4.4 SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Foi utilizado um eixo retirado do conjunto de força da máquina de lavar, o qual é responsável por transmitir o movimento do motor para o “braço” do equipamento em questão. O eixo possui duas extremidades: uma delas se encaixa perfeitamente no que antes era o motor da máquina de lavar, agora utilizado como gerador na turbina; a outra extremidade foi equipada com um mecanismo de encaixe para ser acoplada às cantoneiras com as pás, como demonstrado na figura 17.

Figura 17. Processo de confecção da transmissão



Fonte: Autor, 2023.

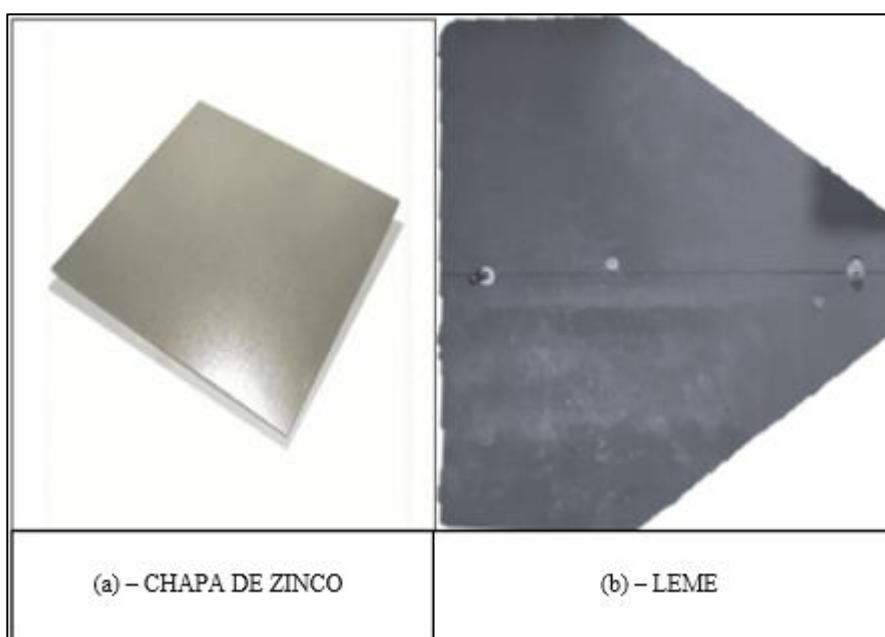
O conjunto anel de fixação e bucha de acoplamento foi obtido através do processo de usinagem de um chapa de aço de 20 x 20 cm e soldado a bucha que por sua vez foi confeccionada a partir de uma barra de aço cilíndrica de aço de 12,7 mm de diâmetro, conforme a figura 17.

Após o processo de usinagem da barra cilíndrica e da chapa de aço descritas acima, foi realizado a união das peças através do processo de soldagem por eletrodo revestido, resultando o componente final, exposto na figura 17 (b).

### 3.4.5 LEME

O leme foi confeccionado a partir de uma chapa de zinco de 1500 x 1500 mm com espessura de 2 mm, essa chapa foi cortada de acordo com o perfil da figura abaixo:

Figura 18. Processo de confecção do Leme



Fonte: Termo Vale – Produtos. Adaptado.

Para obtenção desse perfil mostrado na figura 18, a chapa de zinco passou pelo processo de corte com a utilização de serra circular, lixamento para arredondamento dos cantos vivos, e pintura para proteção contra corrosão.

O perfil do Leme foi definido a partir do torque necessário para girar a turbina em relação ao seu eixo de sustentação. Tendo em vista que o rolamento usado para o movimento angular da turbina foi um rolamento do fabricante SKF de 25 mm de diâmetro interno, 47 mm de diâmetro externo e 12 mm de largura (Designação 6005-2ZNR), com uma força axial aproximadamente de 500 N atuando no rolamento o torque necessário para girar a turbina é de 156 N.m de acordo com a *SKF Bearing Calculator*, que é uma calculadora fornecida pelo próprio fornecedor de rolamentos.

A partir desse torque resistivo, chegamos em um valor aproximado da área necessária para o Leme.

De acordo com a equação (X), a área necessária para o leme é:

$$A = \frac{T}{\rho V^2 d} \quad (X)$$

Onde:

T: Torque resistivo [N.m];

$\rho$ : Massa específica do ar [ $\text{kg/m}^3$ ];

A: Área do Leme [ $\text{m}^2$ ];

d: Distância do leme para o eixo de rotação da turbina [m].

Para o valor da velocidade do ar adotamos a velocidade média do ar no local a ser aplicada a turbina que é 4,35 m/s, a massa específica do ar a temperatura de 20°C e 1 ATM é 1,21  $\text{kg/m}^3$  e a distância entre o eixo de movimentação da turbina e o leme para o nosso protótipo é 3,5 m. Aplicando esses valores na equação (X) obtemos um valor aproximado de 1  $\text{m}^2$ .

### 3.4.6 ESTRUTURA DO NACELE

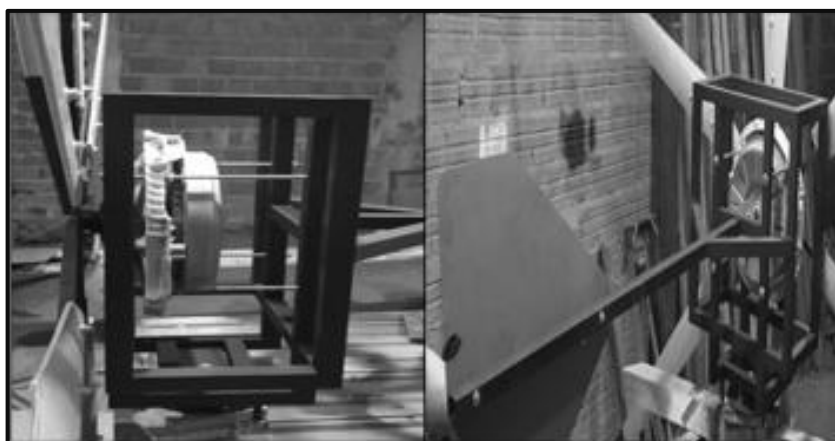
Possui como função primária dar sustentação a turbina eólica, e servir de suporte e proteção para o sistema: Gerador e transmissões. De forma análoga, o Nacele é o esqueleto do projeto, tendo em vista a carga que essa estrutura tem que suportar, com o peso dos componentes mais a força exercida pelos ventos, construímos a estrutura usando uma chapa de aço de 30 x 30 mm com espessura de 1,8 mm, comercialmente conhecido como Metalon 30 por

30. Material facilmente encontrado em serralharias e recicláveis, por ser amplamente utilizado na fabricação de portões.

Apesar de agregar peso ao protótipo, esse material tem um baixo custo quando comparado com outros aços estruturais, tendo em vista que o peso associado a estrutura não influencia na eficiência da turbina e que o objetivo principal do trabalho é o uso de materiais de baixo custo, esse foi o material escolhido para a fabricação.

Na parte inferior do Nacele foi fixado uma barra de aço através do processo de soldagem de para servir de eixo, esse eixo está acoplado em um disco com um rolamento permitindo que a turbina faça o movimento de rotação em relação ao seu próprio eixo, permitindo que o leme trabalhe direcionando a turbina para o fluxo de ar. Por sua vez esse disco foi fixado a estrutura onde a turbina foi instalada. A figura 19 mostra o Nacele utilizado na confecção do micro aerogerador.

Figura 19. Estrutura de suporte do gerador



Fonte: Autor, 2023.

### 3.4.7 MONTAGEM DA TURBINA

Todo o projeto foi pensado de forma que possibilitasse a montagem, desmontagem e transporte da turbina de forma prática. Foi mantido o encaixe por ajuste de alguns componentes que faziam parte do sistema original (máquina de lavar). Os componentes que foram acrescentados ao longo do projeto, optamos por fixação por parafuso com porcas para facilitar a desmontagem e a manutenção, evitando ao máximo o uso do processo de soldagem durante o projeto.

### 3.4.7.1 TORRE DE SUSTENTAÇÃO

Como torre de sustentação do micro aerogerador utilizamos blocos de andaimes de ferros, essas peças de andaimes são comumente utilizadas em áreas rurais para sustentação de caixa de água, tendo em vista essa possibilidade somente adaptamos a turbina, limitando seu movimento de rotação entre seu próprio eixo em apenas 45 graus, de forma que não haja colisão com a caixa de água e nem permita o giro completo da turbina no próprio eixo causando a ruptura dos cabos que fazem a ligação elétrica do gerador e que passa pela torre de sustentação.

Nesse caso, específico, utilizamos a estrutura com uma altura a 5 metros em relação ao solo, para usar como parâmetro os dados obtidos pelo mapa eólico a essa mesma altura.

A figura 20 mostra a montagem do micro aerogerador sendo instalado em campo, no local de realização dos testes e o acoplamento aos andaimes a uma altura de 5 metros em relação ao solo.

Figura 20. Montagem do micro aerogerador



Fonte: Autor, 2023.

## 3.5 LEVANTAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS

Após a conclusão da montagem e instalação do micro aerogerador em campo, procedemos com o levantamento dos dados experimentais para estimar as possíveis aplicações do protótipo. Como o foco desse trabalho é a geração de energia elétrica de forma auxiliar e de



baixo custo demos foco em experimentos que medissem a potência elétrica gerada pela turbina, os experimentos realizados não levam em consideração aerodinâmica e eficiência das pás. Outra consideração realizada nos experimentos é que, pensando em uma possível aplicação do projeto em um sistema *off-grid* todos os testes foram realizados com o gerador alimentando um retificador, conseqüentemente os dados de tensão e corrente obtidos foram na saída do retificador, ou seja, todos os valores são obtidos em corrente contínua. Dessa forma, obtendo a potência real da turbina (W), utilizando equipamentos de medição.

### 3.5.1 INSTRUMENTOS PARA ANÁLISE DE POTÊNCIA

#### 3.5.1.1 MULTÍMETRO

Segundo Alberto (2003), o osciloscópio e o multímetro são, possivelmente, os dois equipamentos mais utilizados na análise de circuitos e na medição de grandezas elétricas.

O multímetro, por ter maior portabilidade e facilidade de utilização, pode medir diversas grandezas elétricas, designadamente, diferenças de potencial, intensidades de corrente e resistências elétricas, grandezas estas que também podem ser medidas utilizando voltímetros, amperímetros e ohmímetros, respectivamente. Contudo, o multímetro mede apenas o valor de grandezas constantes ou o valor eficaz de grandezas periódicas, pelo que não permite acompanhar a sua evolução temporal, como faz o osciloscópio.

Figura 21. Multímetro digital.

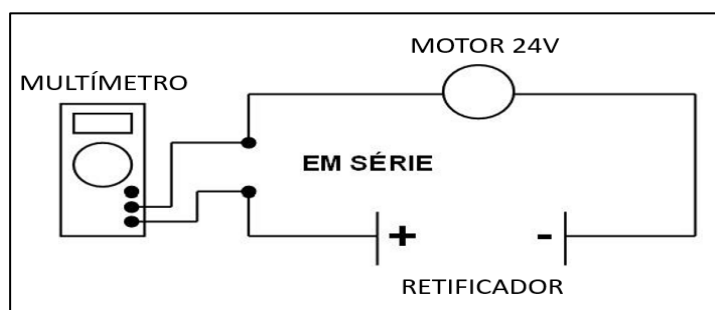


Fonte: Bau da eletrônica – Ferramentas de medição.

Nesse trabalho utilizaremos o multímetro digital para medir a corrente e tensão gerada pelo aerogerador, tanto em corrente alternada na saída do gerador, quanto em corrente contínua na saída do retificador. O multímetro foi utilizado na escala CC- 200 V, para medições na saída do retificador acoplando seu cabo vermelho (positivo) na saída positiva do retificador e o cabo preto do multímetro (comum) no GND (negativo) do retificador.

Para a medição da corrente utilizamos uma carga resistiva na saída do retificador, um motor de corrente contínua de 24 V. Posicionando o multímetro e o motor de 24 V conforme ilustração abaixo:

Figura 22. Ilustração medição da corrente gerada.



Fonte: Hardware livre – Eletrônica. Adaptado.

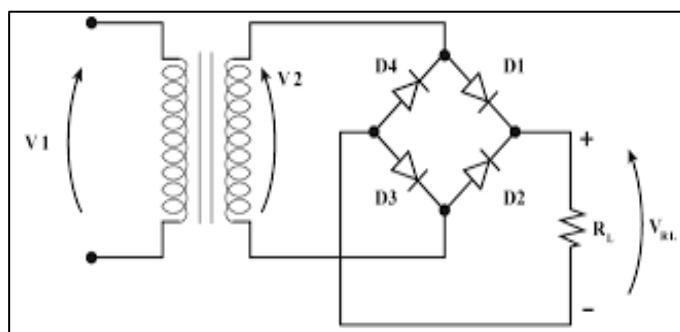
### 3.5.1.2 RETIFICADOR

O retificador é o elemento que converte a corrente alternada advinda de uma fonte de alimentação em corrente contínua em sua saída, utilizando um circuito eletrônico, esse processo de conversão de correntes é chamado de retificação. O retificador é de fundamental importância para sistemas de geração elétrica *offgrid*, tendo em vista que a alimentação dos sistemas de acumuladores elétricos (baterias), é obtida por corrente contínua e tensão de 12 V.

Existe várias opções de retificadores disponíveis, desde retificadores mais simples, denominados retificadores de meia onda, onde basicamente o circuito elétrico consiste em um transformador, um diodo e uma carga resistiva.

Existem também os retificadores de onda completa ou retificadores em ponte, conforme figura abaixo:

Figura 23. Retificador de onda completa – Em ponte.

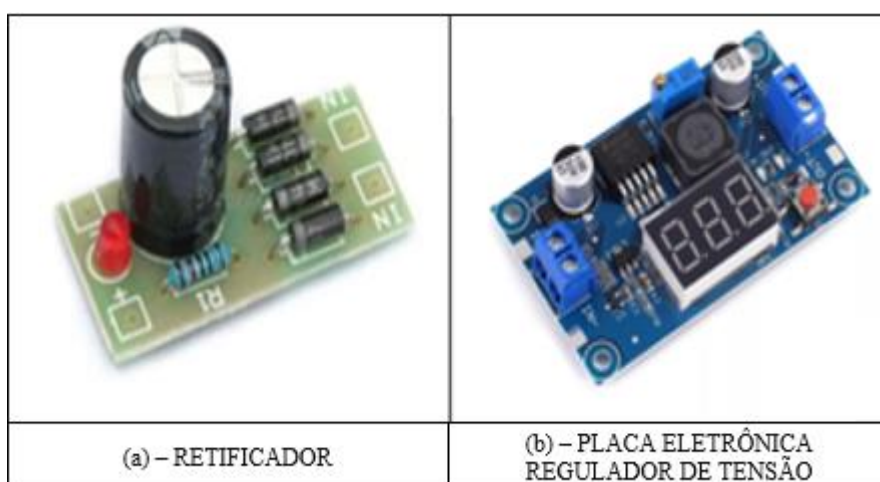


Fonte: Eletrônica digital – Retificadores.

O retificador de onda completa tem basicamente o mesmo princípio de funcionamento do retificador de meia onda, a diferença operacional é que o retificador de onda completa aproveita também o ciclo negativo da tensão de entrada, essa conversão de tensão é realizada através da polarização de dois diodos que realizam a passagem de corrente pela resistência sempre no mesmo sentido acarretando uma tensão de saída sempre positiva.

Para utilização em projetos aerogeradores é necessário além do retificador, um regulador de tensão, que na saída permita que as cargas não ultrapassem o limite de 14 V durante a carga da bateria. Pensando nisso é necessário a associação do regulador de tensão modelo ajustável LM2596 na saída do retificador. A figura abaixo mostra o conjunto utilizado:

Figura 24. (a) - Retificador, (b) – Placa eletrônica com regulador de tensão.



Fonte: Bau da eletrônica – Componentes.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CORRENTE CONTÍNUA GERADA

Tendo em vista que o valor da corrente elétrica é uma variável que está relacionada a velocidade de rotação da turbina.

Os dados obtidos estão destacados conforme tabela 2, mostrada abaixo:

TABELA 2 – Relação entre velocidade de rotação e corrente gerada.

<b>ANÁLISE DA GERAÇÃO – RPM X CORRENTE</b>	
<i>VELOCIDADE MÉDIA DE ROTAÇÃO (RPM)</i>	<i>(A)</i>
50	8,1
45	7,3
40	6,1
35	5,7

Fonte: Autor, 2023.

### 4.2 TENSÃO GERADA POR CORRENTE CONTÍNUA

Para medição da tensão gerada, utilizamos um multímetro digital com os terminais ligados a saída do conversor, tendo em vista que o valor de tensão elétrica gerada é uma variável que está relacionada a velocidade de rotação da turbina, os dados obtidos estão destacados conforme tabela abaixo:

TABELA 3 – Relação entre velocidade de rotação e tensão gerada.

<b>ANÁLISE DA GERAÇÃO - RPM X TENSÃO</b>	
<i>VELOCIDADE MÉDIA DE ROTAÇÃO (RPM)</i>	<i>(V)</i>
50	26
45	21
40	17
35	16

Fonte: Autor, 2023.

Para sistemas *off grid* e carga de baterias, o sistema de geração teria que possuir em sua saída um regulador de tensão para manter a tensão constante entre 13,8 e 14,4 V a fim de não danificar o sistema de acumuladores de carga, com uma tensão de 26 V ligado diretamente ao sistema de acumuladores geraria superaquecimento das baterias, gerando sobrecarga e falha precipitada.

Para que não viesse a ocorrer esse problema, foi utilizado uma placa com regulador de tensão LM2596, mantendo a alimentação das baterias sempre constante.

### 4.3 POTÊNCIA TEÓRICA x POTÊNCIA GERADA

De acordo com a equação (VII) foi determinado a potência teórica da turbina, já os valores reais, medidos em campo de tensão e corrente, presentes na tabela 2 e 3, determinaram a potência real. A partir desses dois dados de potência teórica e potência real conseguimos definir a eficiência da turbina, conforme tabela abaixo:

TABELA 4 – Dados de entrada, potência teórica, real e eficiência da turbina.

DESCRIÇÃO	VALOR	UNIDADE
Área de varredura das pás	7,1	$m^2$
Massa específica do ar	1,29	$kg/m^3$
Velocidade do ar na entrada	4,34	m/s
Potência Teórica	373,1	W
Potência Real	110,93	W
Eficiência da Turbina	29,7	%

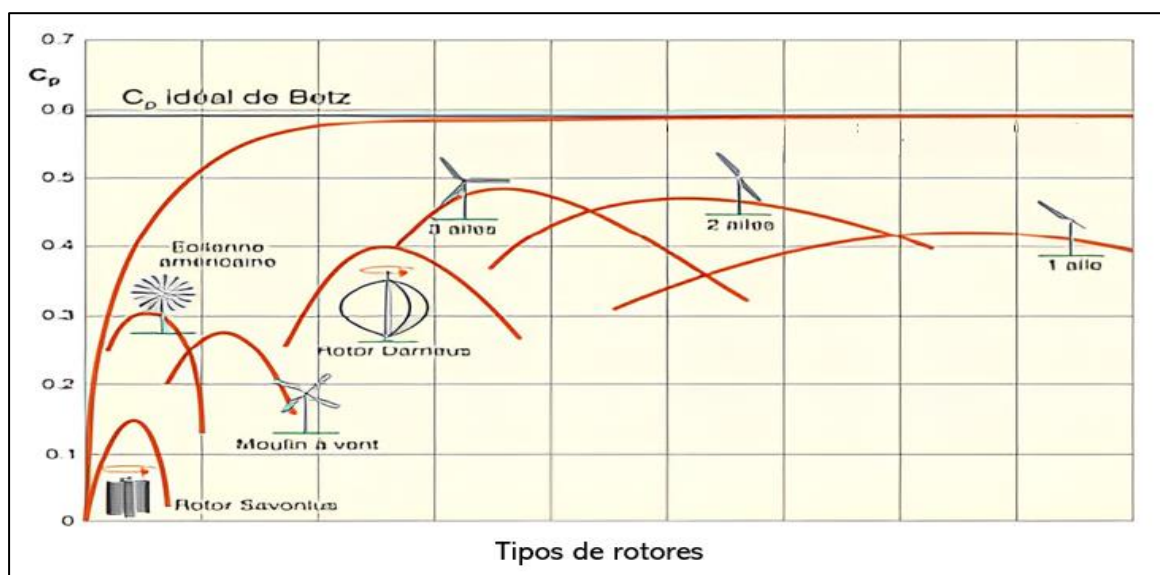
Fonte: Autor, 2023.

A potência gerada pelas turbinas eólicas representa apenas uma fração de toda a potência contida no vento. Essa quantidade aproveitada é quantificada pelo Coeficiente de Potência,  $C_p$ , também denominada de eficiência.

Como mostrado anteriormente na figura 9, o físico alemão Albert Betz, em 1928, formulou a lei Betz, demonstrando que o máximo físico da utilização da energia cinética do vento reside nos 59,3%. A sua teoria sobre o design das pás, que otimiza o coeficiente de potência, continua ainda hoje a ser a base da construção dos equipamentos

Na prática, entretanto, segundo Sharma & Patel (2015), as turbinas eólicas modernas apresentam um rendimento menor, em torno de 50%. Devido a perdas associadas ao sistema de geração. A figura 25 mostra a relação de eficiência da turbina ( $C_p$ ) em função do tipo de rotor:

Figura 25. Distribuição do coeficiente de potência para diversos tipos de rotores



Fonte: Fellipo, 2014. Adaptado.

Podemos observar na figura 25, que para turbinas de múltiplas pás, do tipo Emolino Americano, que é o perfil de rotor que mais se aproxima do estudo em questão, temos valores de eficiência ( $C_p$ ) próximos ou abaixo de 30%.

Tendo em vista que o valor de eficiência obtido para a turbina objeto de estudo foi de 29,7%, conforme a tabela IV, podemos concluir que está dentro da faixa de valores esperados para sua categoria.

#### 4.4 CUSTOS PARA CONFECCÃO DO PROJETO

Tendo em vista que a reutilização de componentes para a confecção desse protótipo é a forma encontrada de produzir um micro aerogerador de baixo custo e consequentemente acessível para a comunidade atendida nesse trabalho.

Foi realizado o levantamento médio da precificação dos componentes isolados. Tendo em vista que trata-se de um estudo acadêmico, todos os processos de fabricação do protótipo foram realizados dentro dos laboratórios do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de

Pernambuco, campus Caruaru, não havendo a necessidade de gastos adicionais para elaboração da turbina (gastos com mão de obra), todos os processos de fabricação, tal como: Soldagem, furação, corte e montagem foram realizados pelos próprios estudantes da instituição.

O orçamento geral dos custos para elaboração do projeto está descrito de acordo com a tabela 5:

TABELA 5 – Orçamento geral do micro aerogerador.

<i><b>DESCRIÇÃO</b></i>	<i><b>QTD</b></i>	<i><b>VALOR UNITÁRIO</b></i>	<i><b>VALOR TOTAL</b></i>
Motor Lava-Seca SAMSUNG®	1	R\$ 150,00	R\$ 150,00
tubulação de PVC diâmetro de 250 mm comprimento de 1,5 m	1	R\$ 75,00	R\$ 75,00
Barra cilíndrica de aço diâmetro de 1 ½ comprimento de 12 cm	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
Chapa de aço 3/8 - 20x20 cm	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Cantoneira "L" 5/4 por 1/8 - 2 m	1	R\$ 36,00	R\$ 36,00
Chapa de aço "metalon" 30x30 mm - 6 m	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Parafusos sextavado 8 x 20 mm	40	R\$ 0,7	R\$ 28,00
Retificador	1	R\$ 11,00	R\$ 12,00
Regulador de tensão LM2596	1	R\$ 22,00	R\$ 22,00
Bateria automotiva 180 Ah reutilizada	1	R\$ 200,00	R\$ 200,00
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>R\$ 600,00</b>

Fonte: Autor, 2023.

Tendo em vista que um micro aerogerador convencional encontrado no mercado com potência média real de 150 W tem um valor médio de R\$2.500,00. O protótipo fabricado, utilizando materiais de reuso, apresenta um custo bem abaixo do estipulado pelo mercado, mostrando-se viável em relação ao custo.

Os valores associados a esse orçamento podem sofrer variações dependendo das regiões de compra dos materiais.

#### 4.5 ANÁLISE DE APLICAÇÕES DO PROJETO

São inúmeras as oportunidades de aplicações de uma turbina eólica, tendo em vista que esse trabalho é relacionado ao meio rural, destacaremos as principais aplicações dentro desse campo de atuação.

Foram analisadas as necessidades dos pequenos produtores rurais do distrito de Uruçumirim, Gravatá-PE. Entre elas se destacam bombeamento de água de reservatórios e barragens,

sistema de iluminação noturna para flores (estufa), iluminação noturna para celeiro de animais, de aquecimento de água para uso doméstico. Todas essas aplicações podem ser supridas total ou parcialmente através do uso da turbina eólica do estudo em questão.

A turbina é aplicada em um sistema off grid com o objetivo de alimentar uma bateria que, por sua vez, fornecerá energia para uma estufa durante o período noturno. Com base nos dados mencionados no tópico 3.3, constatou-se que o consumo médio da propriedade rural, considerando o uso da estufa equipada com lâmpadas de LED é de aproximadamente 200 Wh. É importante ressaltar que o funcionamento das estufas é necessário apenas durante a noite, no intervalo das 18:00 às 5:00, totalizando 11 horas de consumo.

O sistema em questão é composto por uma bateria automotiva de 180 Ah, responsável por armazenar a energia gerada pelo micro aerogerador. Com base em cálculos realizados, verificou-se que essa bateria, quando utilizada com o consumo de 200 Wh, apresenta uma autonomia de aproximadamente 10 horas e 48 minutos.

A duração da bateria é suficiente para atender ao tempo de trabalho necessário, assegurando o funcionamento adequado da estufa durante o período noturno. Diante dessa demanda, o sistema proposto é capaz de supri-la adequadamente.

No entanto para essa aplicação a bateria teria que se encontrar totalmente carregada no início do turno de iluminação, tendo em vista as tabelas 2 e 3 que relatam a tensão e corrente geradas pela turbina, temos que a corrente média gerada a uma tensão de 12 V é aproximadamente 7 A, onde podemos afirmar que para o carregamento completo de uma bateria de 180 Ah, o sistema de geração levaria 24 horas. Logo concluímos que o sistema somente poderia ser usado com o intervalo de 24 horas. Tal fato, implica em uma redução de gastos com consumo em 50%.

Tendo em vista a economia de 50% em relação ao tempo de uso da estufa para iluminação artificial das flores, a redução em dinheiro na conta de energia paga pelo proprietário será de aproximadamente R\$45,00 por mês, totalizando uma economia anual de aproximadamente R\$540,00.

Tendo esses valores como referência e realizando uma análise de *payback* descontado para a aplicação, essa análise de viabilidade é amplamente utilizada para determinar o período de retorno financeiro do projeto, a partir dessa análise conseguimos determinar após quantos meses o projeto conseguirá dar um retorno financeiro positivo em economia de energia para a aplicação proposta pelo trabalho.

Temos que o tempo médio de retorno para o investimento do projeto será dado de acordo com a tabela 6, descrita abaixo:



Tabela 6 – Análise de payback descontado

Tempo (Mês)	01	02	03	04	05	06	07	08
<b>Investimento Inicial</b>	R\$600,00							
<b>Retorno</b>	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00
<b>Acumulado</b>	R\$555,00	R\$510,00	R\$465,00	R\$420,00	R\$375,00	R\$330,00	R\$285,00	R\$240,00
Tempo (Mês)	09	10	11	12	13	14	15	16
<b>Investimento Inicial</b>								
<b>Retorno</b>	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00	R\$45,00
<b>Acumulado</b>	R\$195,00	R\$150,00	R\$105,00	R\$60,00	R\$15,00	R\$30,00	R\$75,00	R\$120,00

Fonte: Autor, 2023.

Com base na tabela 6, podemos concluir que o *payback* do projeto será em 13 meses, aproximadamente. O período destacado em vermelho, do mês 01 ao 13 seriam os períodos em que o projeto ainda não teria retorno financeiro, apresentando um valor acumulado negativo, e reduzindo ao longo do tempo.

Os itens destacados com linha tracejada cinza, do mês 13 ao 14 seria o período de transição, onde o projeto sairia da condição de acumulado negativo e passa a contribuir positivamente, e o a partir do mês 14, com os valores positivos destacados na cor verde, efetivamente o projeto traria retorno financeiro positivo em relação à economia de energia elétrica.

#### 4.6 CONTRIBUIÇÃO SOCIAL DO PROJETO

Além da redução do custo com energia elétrica mencionados no tópico anterior, podemos destacar os ganhos sociais que estão relacionados ao desenvolvimento de um micro aerogerador elaborado por estudantes dentro do centro de ensino.

O presente trabalho foi tema do um projeto de extensão, envolvendo 2 discentes e 2 docentes do curso de engenharia mecânica do Instituto Federal de Pernambuco - Campus Caruaru. Proporcionando o aprofundamento em temas relacionados a energias renováveis e turbinas eólicas e a vivência no planejamento, fabricação, instalação, testes e análises de um projeto de aplicação real.

Durante a elaboração do projeto, foi confeccionado uma cartilha com o intuito de auxiliar na montagem de um micro aerogerador, a ideia foi expandir o conhecimento relativo à preparação e montagem do projeto visando tornar mais acessível e pedagógico a metodologia de elaboração do aerogerador.

Podemos observar na figura 24, anexada ao trabalho, a cartilha de preparação e montagem do aerogerador, trata-se de um levantamento dos itens necessários, modo de preparação e montagem, o manual segue uma orientação através de um passo a passo que a pessoa deve seguir para confecção do protótipo.

## **5 CONCLUSÃO**

Ao iniciar o trabalho de pesquisa, constatou-se que a energia eólica é uma fonte de energia renovável de grande importância, sendo de grande relevância na região do Nordeste. Diante disso, a pesquisa teve como objetivo analisar o comportamento de um micro aerogerador de baixo custo, propondo possíveis aplicações. Desenvolveu-se um aerogerador de eixo horizontal, com materiais de reuso, no qual foram analisados os custos do projeto, a viabilidade econômica e as aplicações no meio rural.

Os resultados encontrados nesse trabalho podem ser considerados positivos, pois conseguiu-se desenvolver o micro aerogerador, além disso, foi possível estimar a potência mecânica extraída pelo conversor e a do fluxo de ar e estimar a potência elétrica gerada.

Concluimos que a potência média gerada pela turbina de 110,93 W, e 29,7%, está dentro da faixa de eficiência esperada para esse perfil de rotor e atende a expectativa de redução de custos com energia elétrica em uma estufa de cultivo de flores, localizada em meio rural.

Em relação aos custos, podemos afirmar que o valor médio gasto na confecção do projeto ficou em torno de 80% mais barato em relação aos valores de projetos comerciais. Esse impacto positivo na redução de custos de fabricação em relação a sistemas comercializados é fator fundamental na expansão de aplicações do projeto.

Quanto aos custos associados ao projeto, destacam-se o gerador e a bateria. Esses componentes foram adquiridos com valor muito abaixo do mercado pelos seguintes aspectos:

O motor da lavadora que atua como gerador pode ser facilmente encontrado no mercado em sucata de máquinas de lavar que apresentaram defeito em componentes eletrônicos, como placas, controladores ou no eixo de movimentação. Cuja manutenção não é viável e a revenda dos itens sobressalentes são efetuados de forma separada. A bateria também apresenta custo inferior ao preço de mercado. Tendo em vista que a bateria para acionamento de lâmpadas em série não necessita de corrente elevada de partida, e que pode trabalhar com tensão e corrente constantes, pode ser aplicado a esses casos sucatas de baterias que não são mais suficientes para dar partida veicular, mas que ainda apresentam condições para mantimento de uma carga resistiva constante. Nesse caso, encontramos no mercado muitas alternativas de baterias automotivas que não servem mais para aplicação em automóveis, mas que são perfeitamente aplicáveis a sistemas de armazenamento para sistemas de geração de energia.

A respeito dos ganhos com economia em energia elétrica, a análise de *payback* descontado evidenciou que o investimento é viável, e os ganhos financeiros relacionados a redução de custo com energia elétrica seriam notados após 13 meses do início da funcionabilidade do projeto, aplicado em meio rural, reduzindo o consumo energético de uma estufa de flores.

Além do conhecimento adquirido em ambiente institucional, uma das propostas do projeto foi expandir esse conhecimento de forma didática através de uma cartilha, ensinando o passo a passo de como montar um micro aerogerador, exibindo o material necessário para a montagem, possíveis locais onde seria possível encontrar esse material e o custo com cada um deles. Sendo assim, tornando o conhecimento público e acessível, principalmente a comunidade.

O futuro desse estudo está relacionado com a replicação desse projeto para outras comunidades vizinhas, além do incentivo a pesquisa e desenvolvimento de novos projetos. Além de estimular pessoas e estudantes a buscar novas aplicações e aprimoramento do projeto inicial.

Para futuros trabalhos, também seria interessante estudos voltados a utilização de micro aerogerador de baixo custo associado a rede de abastecimento energético, sistema *on grid* visando redução de custos com componentes armazenadores de energia e a análise do tempo de vida útil de sistema de acumuladores de eletricidade (baterias automotivas) aplicadas a armazenamento de sistemas de geração eólica.

## 6. REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Associação Brasileira de Energia Eólica (2018)**. Disponível em: <ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica (abeeolica.org.br)>. Acesso em 10 dez. 2022.

ALBERTO, C. **Medição de grandezas elétricas utilização do osciloscópio e multímetro** – Manual de física para laboratórios. Departamento de física FCTUC. 2003.

ALÉ, J. A.V., 2004. **“Desenvolvimento de Turbina Eólica de Eixo Vertical”**, Projeto Finep FNDCT/CT-ENERG.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Brasília. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em 28 de nov. 2022.

**Bau da eletrônica – Ferramentas – Multímetro digital**. Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/ferramentas/instrumentos-de-medicao/multimetro-digital> Acesso em 04/05/2023.

BARROS, Jocilene *et al.* **A REGIÃO NATURAL PLANALTO DA BORBOREMANOSEMIÁRIDO DO RIO GRANDE DONORTE.** ., [S. l.], p. 1-12, 14 jul. 2016.

BIANCHI, Fernando D. **Wind Turbine Control System**. Springer, 2007.

**Bombas e manutenção e mundo conectado – rotores**. Disponível em: <http://bombasmanutencao.blogspot.com/>. Acesso em 28/03/2023.

CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza, Imprensa Universitária, 146p. 2003

CESAR, Eduardo; PAIVA, Giuseppe. **PROJETO AERODINÂMICO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL (TEEV) PARA AMBIENTES URBANOS**. 2016. Dissertação (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, [S. l.], 2016.

CRESESB. **Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de S. Brito**. 2020.

DOLABELA, Fernando. **O segredo de Luísa**. São Paulo: Cultura Editores Associados, 1999.

**Editora opirus – geografia**. Disponível em: <http://www.editoraopirus.com.br/uploads/df/materiais/geografia/df-geografia-luiz-gustavo-5f440ad48c29b.pdf>. Acesso em 24/03/2023.

**Eletrônica digita – retificadores**. Disponível em: <http://eletronica-analogica2015.com> Acesso em 04/05/2023.

**Electrolux – manual de instruções.** Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://images.colombo.com.br/produtos/787688/787688\_1490209298819.pdf. Acesso em: 04/04/2023.

EMULE, Albert. **Projeto gerador elétrico eólico 12v 500 watts.** Salvador: Albert Emule, 2017. Color.

**Encontra pernambuco – mapas.** Disponível em: https://www.encontrapernambuco.com.br/mapas/mapa-de-pernambuco.htm. Acesso em 24/03/2023.

FADIGAS, Inácio de Sousa. **Difusão do Conhecimento em Educação Matemática sob a perspectiva das Redes Sociais e Complexas.** 2011. PhD Thesis. Tese de Doutorado, Salvador.

FELLIPO, Caio. **Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal.** 18p. Trabalho de pós graduação (Engenharia mecânica), 2014. Rio de Janeiro.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC. **Global wind report 2015: annual market update.** Bruxelas: GWEC, 2016. 76p. Disponível em: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report\_April-2016\_22\_04.pdf. Acesso em: 15 dez. 2022.

HAU, Erich. **Wind Turbines**, 3rd ed. Springer, 2013.

**Hardware livre – Eletrônica.** Disponível em: hardwarelivreus.org/tutoriais/2014/12/10/basico\_de\_eletronica\_parte\_2/. Acesso em: 08/06/2023.

JOHNSON, Gary L. **Wind Energy Systems: Eletronic Edition.** Manhattan, 2001.

**Jornal do comércio – meio ambiente.** Disponível em: https://www.jornaldocomercio.com/\_conteudo/especiais/meio\_ambiente/2021/06/795377-parques-eolicos-gauchos-geram-mais-de-1-milhao-de-ativos-de-carbono.html. Acesso em 30/03/2023.

MARIN, L. **análise integral de rotores eólicos verticais através da modelagem por tubos de corrente**, 13p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia mecânica). Cornélio Procópio, 2016.

MACINTYRE, Archibald. **BOMBAS E INSTALAÇÕES DE BOMBEAMENTO.** 2. ed. [S. l.: s. n.], 1997.

MARQUES, JEFERSON. **TURBINAS EÓLICAS: MODELO, ANÁLISE E CONTROLE DO GERADOR DE INDUÇÃO COM DUPLA ALIMENTAÇÃO.** 2004. Dissertação de

mestrado (Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, [S. l.], 2004.

**Mundo da elétrica – turbina eólica.** Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/energia-eolica-como-funciona/>. Acesso em 24/03/2023.

NOGUEIRA, E. **Análise de investimento**. In: BATALHA, M. O. (Coord). Gestão agroindustrial. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2007. p. 205-266.

PEREIRA, M. Monticelli. **Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante**. Juiz de Fora. 2004. 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG - Brasil.

PETERSON, P.; CLAUSEN, P. D. Timber for high efficiency small wind turbine blades. **Wind Engineering**, 2004, 28.1: 87-96.

RASOTO, A.; GNOATTO, A.A.; OLVEIRA, A.G.; ROSA, C.F.; ISHIKAWA, G.; CARVALHO, H.A.; LIMA, I.A.; LIMA, J.D.; TRETIN, M.G.; RASOTO, V.I.; **Gestão financeira: enfoque em inovação**. 2012. Disponível em: Acesso em: 17 fev. 2019.

**SSR Parts – Lava e seca**. Disponível em: [www.ssrparts.com.br/lava-e-seca-samsung/motor](http://www.ssrparts.com.br/lava-e-seca-samsung/motor). Acesso em: 08/06/2023.

**Termo Vale – Produtos**. Disponível em: [www.termovale.com.br/pt-br/chapa-de-aco-galvanizada-050 mm](http://www.termovale.com.br/pt-br/chapa-de-aco-galvanizada-050-mm). Acesso em: 08/06/2023.

## 7. ANEXOS

Figura 26. Cartilha de montagem do micro aerogerador – Página (1 – 15)



## APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS DO PROJETO

### ❑ Origem da iniciativa

Tendo em vista a carência das comunidades rurais cultivadoras de flores no agreste de Pernambuco, a iniciativa nasceu num projeto de extensão do IFPE *Campus* Caruaru com o objetivo de propor uma fonte auxiliar de geração de energia elétrica por meio de um micro aerogerador de baixo custo.

### ❑ Local de realização

Distrito de Uruçu-Mirim, Gravatá, Pernambuco

### ❑ Público alvo atendido

Comunidade de cultivadores rurais do povoado

### ❑ Objetivos da extensão

Dentre os objetivos técnicos da extensão, tinha-se a finalidade de analisar o potencial eólico da

região, selecionar o tipo adequado de turbina eólica para o projeto, realizar um acompanhamento contínuo dos níveis de consumo de energia na produção de flores da comunidade e por fim fornecer um parecer final de viabilidade e divulgar à comunidade interna e externa as experiências adquiridas.

### ❑ Pessoas envolvidas

Discentes: José Gabriel Bezerra da Guia e Lucas Felipe de Vasconcelos;  
Docentes orientadores: Marcos César de Lima Cordeiro e Igor Cavalcanti da Silveira.



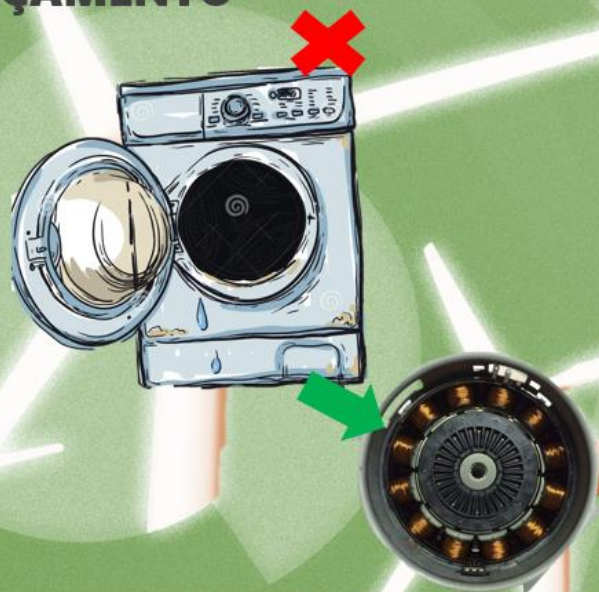
## LISTA DE MATERIAIS E ORÇAMENTO

### ❑ Materiais para aquisição

Tendo em vista que a acessibilidade da confecção é um ponto de bastante relevância, muitos componentes são providos de doação e reaproveitamento. Sendo assim, cerca de R\$ 300,00 foram despendidos para a aquisição e mão-de-obra de componentes. São eles:

### ❑ Motor Lava-Seca (Máquina de Lavar)

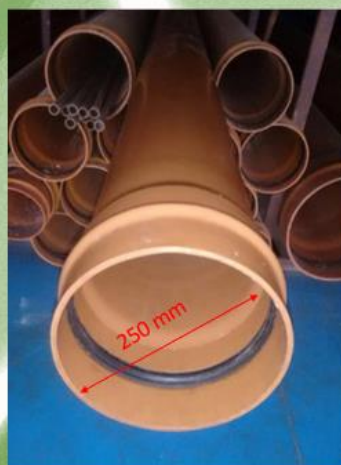
O coração do projeto, o motor irá atuar como o nosso gerador de energia elétrica. É recomendado por questões de eficiência, utilizar um motor do tipo eletro-ímã. Procurar motores cujo a baixa rotação produza uma corrente de saída a níveis de 8~9 A (ampère). Para o nosso projeto o motor lava e seca da SAMSUNG® foi o que melhor performou para a aplicação.  
Valor médio: R\$ 120,00 ~ R\$ 150,00



## LISTA DE MATERIAIS E ORÇAMENTO

### ❑ Tubulação de PVC 250 mm

Para a confecção das pás será necessário fazer cortes na tubulação. Com espessura de 5,5 mm. Esse tubo não é utilizado para encanações convencionais, sendo muito utilizado para concretagem.





## LISTA DE MATERIAIS E ORÇAMENTO

### ❑ Cantoneira em 'L' 5/4 na chapa 1/8

As cantoneiras vão fazer a união das pás no anel de fixação.

Preço médio ..... R\$ 16,00/metro

### ❑ Chapa de aço 20x20 cm com 3/8 esp.

A chapa de aço será utilizada na fabricação do anel de fixação.

Preço médio ..... R\$ 15,00~R\$20,00



## LISTA DE MATERIAIS E ORÇAMENTO

### ❑ Tarugo cilíndrico de aço

Tarugo de 12 a 15 cm de comprimento com diâmetro de 1 ½ será usado como bucha de acoplamento no anel de fixação.

Preço médio ..... R\$ 12,00/peça

### ❑ Tubo perfil quadrado 30x30 mm

A estrutura de sustentação do rotor será confeccionada a partir de tubos de metalon, assim como a extensão (haste) que irá acoplar o leme.

Preço médio.....R\$ 50,00/metro



## LISTA DE MATERIAIS E ORÇAMENTO

### ❑ Chapa de aço 18 40x40 cm

A partir da chapa poderá ser feito o corte do leme.

Preço médio.....R\$ 42,00/chapa

### ❑ Fuso roscado com porca e arruela 5/8"

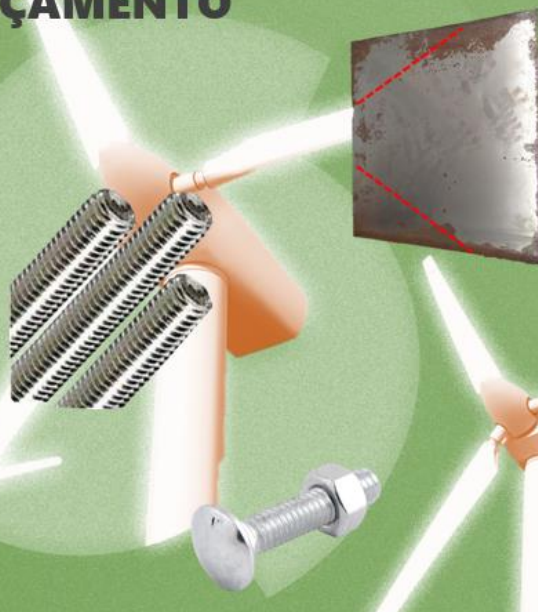
Servirá de sustentação para o rotor dentro da gaiola de fixação.

Preço médio.....R\$ 25,00/metro

### ❑ Parafusos cabeça francesa + porca

Acoplamento das pás no anel, cantoneiras-pás, e outras junções.

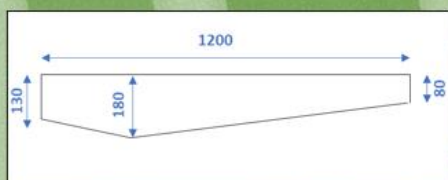
Preço médio.....R\$ 1,00/unidade



## CONFEÇÃO DAS PARTES MÓVEIS

### ❑ Pás rotativas

Foram confeccionadas seis pás (06) a partir do corte do perfil em uma tubulação de PVC de 250 milímetros. Após o corte e acabamento das bordas, é necessário fazer o balanceamento das mesmas por meio de uma balança para garantir a estabilidade da rotação.





## CONFECÇÃO DAS PARTES MÓVEIS

### ❑ Eixo das pás

Esse componente foi adquirido junto ao conjunto do rotor da máquina de lavar. Será interessante para o seu projeto se certificar que o eixo venha no acoplamento para não ser necessário confeccionar. Contudo, ainda foi feita uma adaptação na ponta do eixo para facilitar o acoplamento – que pode ser por um parafuso passante ou chavetas.



## CONFECÇÃO DAS PARTES MÓVEIS

### ❑ Cantoneiras de acoplamento

Foram cortadas seis (06) cantoneiras (perfil em 'L' 5/4 na chapa 1/8) de 35 cm. Cada uma vai acoplada a uma pá por meio de três (03) parafusos e acoplada ao anel de fixação por meio de dois (02).

Foi criada uma angulação de 5° a 10 cm da base para ajuste de rotação.



## CONFECÇÃO DAS PARTES MÓVEIS

### ❑ Anel de fixação e bucha de acoplamento

A partir do corte circular da chapa de aço 20x20 cm foi confeccionado o anel de fixação. Após o corte, foram feitas furações para acoplar as cantoneiras.

A bucha de acoplamento foi torneada a partir do tarugo de aço de 12 cm. Com uma espessura de 1,5 cm de parede e um furo passante para permitir o acoplamento do eixo. Fixada ao anel por meio de soldagem.



## CONFECÇÃO DAS PARTES FIXAS

### ❑ Gaiola do rotor (fusos de sustentação)

Para fixar o rotor foi colocado quatro (04) roscas passantes que sustentam o rotor. Os fusos atravessam os perfis de metalon de canto a canto e para isso foi necessário perfurar a cesta. Presos por porcas auto-travantes.





## MONTAGEM

### ❑ Montagem das pás nas cantoneiras

A fixação é feita através de parafusos roscados cabeça francesa. Cada pá é fixada a sua cantoneira por meio de três parafusos

### ❑ Montagem das pás no anel de fixação

A fixação é feita através de parafusos roscados cabeça francesa. Cada pá é fixada ao anel por meio de dois parafusos, as furações são espaçadas em 60°.

## MONTAGEM

### ❑ Acoplamento bucha

A fixação é feita através de parafusos roscados cabeça francesa. Cada pá é fixada a sua cantoneira por meio de três parafusos

### ❑ Montagem das pás no anel de fixação

A fixação é feita através de parafusos roscados cabeça francesa. Cada pá é fixada ao anel por meio de dois parafusos, as furações são espaçadas em 60°.