



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - IEDS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**ESTUDO PRELIMINAR DE VIABILIDADE DE MICROGERAÇÃO EÓLICA E  
FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL EM REDENÇÃO**

Carlos Antônio Pinheiro da Silva Junior

Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro  
Orientador

**ACARAPE – CE – BRASIL**

**ABRIL DE 2021**

**CARLOS ANTÔNIO PINHEIRO DA SILVA JUNIOR**

**ESTUDO PRELIMINAR DE VIABILIDADE DE MICROGERAÇÃO EÓLICA E  
FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL EM REDENÇÃO**

Projeto apresentado como requisito para Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

**Professor: Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro**

**ACARAPE – CE – BRASIL**

**ABRIL DE 2021**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Silva Junior, Carlos Antônio Pinheiro da.

S578e

Estudo preliminar de viabilidade de microgeração eólica e fotovoltaica residencial em Redenção / Carlos Antônio Pinheiro da Silva Junior. - Redenção, 2021.  
69f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro.

1. Energia eólica - microgeração. 2. Potencial. 3. Geração Distribuída. I. Título

CE/UF/Dsibiuni

CDD 333.79

---

**CARLOS ANTÔNIO PINHEIRO DA SILVA JUNIOR**

**ESTUDO PRELIMINAR DE VIABILIDADE DE MICROGERAÇÃO EÓLICA E  
FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL EM REDENÇÃO**

Projeto apresentado como requisito para Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro  
UNILAB - IEDS

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Cáceres Coaquira  
UNILAB - IEDS

---

Prof. Me. Humberto Ícaro Pinto Fontinele  
UNILAB – IEDS

## **DEDICATÓRIA**

Em primeiro lugar a Deus, que me deu forças para chegar ao final dessa caminhada. Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, familiares, amigos e todos os outros que me apoiaram, incentivaram e que acreditaram que eu seria capaz de chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores porque vocês representam a sabedoria e agradecer a vocês é o mínimo, pois são vocês que nos ensinam, educam, formam e orientam de tal forma que nos dão asas para o futuro. Meu agradecimento especial ao meu orientador que me incentivou nos momentos em que me senti perdido, auxiliou na escolha do tema, e foi sempre solícito quando lhe contatei.

Aos meus pais que nunca mediram esforços para me auxiliar nessa caminhada me oferecendo uma estrutura que permitiu me dedicar aos estudos e chegar ao fim dessa caminhada.

Aos meus colegas de curso que estiveram comigo nos momentos de alegria, de angústia e nas noites em claro preocupado com alguma avaliação.

Aos meus colegas de estágio que me deram apoio reduzindo a minha quantidade de demandas para que pudesse me dedicar mais ao TCC.

Ao meu chefe que me auxiliou com seu conhecimento tirando dúvidas sempre que o consultava.

## RESUMO

O desenvolvimento dos países proporcionou a crescente demanda para o consumo de energia no mundo todo. Porém, houve uma pressão da sociedade para que fossem criadas usinas que utilizassem fontes alternativas de energia. Entre elas estão as usinas eólicas. Assim, neste trabalho foi desenvolvido um estudo da viabilidade de uso de gerador eólico para microgeração na cidade de Redenção, levando em consideração outras formas de geração distribuída mais consolidadas como a geração fotovoltaica. O estudo tem como base a literatura disponíveis sobre o tema e estudos realizados a cerca deste tipo de geração de energia. Com o objetivo de comparar os custos de sistema tendo, vento como energia primária em relação aos custos atrelados a outros tipos de geração distribuída.

**Palavras-chaves:** Eólica, microgeração, energias renováveis, potencial, geração distribuída, turbina de eixo vertical.

## **ABSTRACT**

The development of countries has led to a growing demand for energy consumption worldwide. However, there was pressure from society to create plants that use alternative sources of energy. Among them are the wind farms. Thus, in this work a study was carried out on the feasibility of using a wind generator for microgeneration in the city of Redenção, considering other more consolidated forms of distributed generation such as photovoltaic generation. The study is based on the available literature on the topic and studies carried out on this type of power generation. In order to compare system costs with wind as the primary energy in relation to costs linked to other types of distributed generation.

**Keywords:** Wind, microgeneration, renewable energies, potential, distributed generation, vertical axis turbine.

## LISTA ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação da ação dos ventos no planeta.....	3
Figura 2: Comportamento dos ventos nas diversas superfícies.....	5
Figura 3: Comportamento dos ventos com a altura.....	6
Figura 4: Moinho de vento persa.....	8
Figura 5: Moenda manual.....	9
Figura 6: Aerogerador Darrieus.....	10
Figura 7: Aerogerador Savonius.....	11
Figura 8: Turbina eólica de múltiplas pás.....	11
Figura 9: Aerogerador dinamarquês.....	13
Figura 10: Evolução do potencial de energia eólica instalada (MW).....	14
Figura 11: Variedades de turbinas de eixo vertical.....	15
Figura 12: Variedades de turbinas de eixo horizontal.....	16
Figura 13: Emissões de CO <sub>2</sub> Evitadas em 2019.....	17
Figura 14: Potencial eólico brasileiro para altura de 30 m.....	20
Figura 15: Potencial eólico brasileiro para altura de 50 m.....	21
Figura 16: Potencial eólico brasileiro para altura de 120 m.....	22
Figura 17: Potencial eólico para região nordeste.....	23
Figura 18: Localização do empreendimento a ser estudado.....	25
Figura 19: Potencial eólico para redenção.....	26
Figura 20: Fatura de energia da UC.....	27
Figura 21: Turbina de eixo vertical.....	28
Figura 22: Gráfico da curva de potência VAWT.....	30
Figura 23: Turbina de eixo horizontal.....	34
Figura 24: Gráfico da curva de potência HAWT.....	36
Figura 25: Irradiação média local.....	38
Figura 26: Modelagem do Sistema.....	39
Figura 27: Dados da simulação.....	40
Figura 28: Estimativa de geração x Consumo.....	40
Figura 29: Estimativa de geração x consumo mês a mês.....	41
Figura 30: Diagrama de perdas do sistema.....	41
Figura 31: Diagrama de ligação Ongrid gerador eólico.....	42
Figura 32: Preço unitário VAWT.....	43
Figura 33: Preço unitário Inversor.....	43
Figura 34: Preço unitário HAWT.....	45

Figura 35: Preço Kit Gerador Solar .....	47
Figura 36: Gráfico de retorno do investimento x Anos (VAWT) .....	49
Figura 37: Gráfico de retorno do investimento x Anos (HAWT) .....	50
Figura 38: Gráfico de retorno do investimento x Anos (SOLAR) .....	51
Figura 39: Gráfico comparativo de investimento .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela do fator $\alpha$ para diferentes tipos de superfícies .....	7
Tabela 2 – Especificações do Aerogerador de eixo vertical.....	29
Tabela 3 – Especificações do Aerogerador de eixo horizontal.....	35
Tabela 3 – Comparativo de Custos Sistemas.....	48
Tabela 4 – Cálculo de retorno do investimento cenário 1 Gerador VAWT .....	48
Tabela 5 – Cálculo de retorno do investimento cenário 2 Gerador HAWT .....	49
Tabela 6 – Cálculo de retorno do investimento cenário 3 Gerador Fotovoltaico.....	50

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica

CDI - Certificado de Depósito Interbancário

DPS – Dispositivo de proteção contra surtos

HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine (Turbina de eixo Horizontal)

MME – Ministério de Minas e Energia

VAWT – Vertical Axis Wind Turbine (Turbina de Eixo vertical)

VPL - Valor presente líquido

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
2. OBJETIVOS .....	2
2.2 Objetivos específicos .....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
3.1 Energia eólica .....	3
3.2. Os ventos .....	4
3.2.1 Comportamento do vento com a altura.....	6
3.3 História da energia eólica .....	7
3.4. A eólica no brasil .....	13
3.5 Tipos de turbinas eólicas .....	14
3.6 Vantagens da energia eólica .....	16
3.7 Desvantagens da energia eólica .....	17
3.8 Atlas do potencial eólico brasileiro .....	18
3.8.1 Potencial eólico brasileiro .....	19
3.8.2 Potencial eólico para região nordeste .....	23
4. ESTUDO DE CASO .....	25
4.1 Potencial eólico para área de redenção .....	25
4.2 Demanda da UC.....	27
4.3 Dimensionamento de sistema eólica residencial .....	27
4.3.1 Utilizando Turbina VAWT.....	28
4.3.1.1 Turbina selecionada.....	28
4.3.1.2 Definindo a altura da instalação .....	31
4.3.1.3 Produção esperada .....	31
4.3.2 Utilizando turbina HAWT .....	33
4.3.2.1 Turbina selecionada.....	33
4.3.2.2 Produção esperada .....	37
4.4 Dimensionamento do sistema fotovoltaico.....	38
4.4.1 O sistema .....	38
4.4.2 A geração .....	39
5. COMPARATIVO DE CUSTOS DE INSTALAÇÃO .....	42
5.1 Custo de instalação com VAWT .....	42
5.1.1 Aerogerador VAWT .....	42
5.1.2 Material CA .....	44

5.1.3 Mão de obra .....	44
5.2 Custo de instalação com HAWT .....	45
5.2.1 Aerogerador HAWT .....	45
5.2.2 Material CA .....	45
5.2.3 Mão de obra .....	46
5.3 Custo de instalação com sistema solar .....	46
5.3.2 Material CA .....	47
5.4 Comparativo retorno de investimento .....	48
6. CONCLUSÃO.....	52
6.1 Trabalhos futuros .....	52
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A produção de energia no mundo tem se caracterizado predominantemente por grandes usinas termelétricas, hidrelétricas e nucleares (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS DO BRASIL, 2018). Os impactos desses tipos de usinas são as mais variadas, desde poluição do ar, inundações de grandes áreas, até catástrofes ocasionadas por vazamento de material radioativo.

A energia produzida pelas grandes hidrelétricas, mesmo sendo considerada uma fonte renovável (responsável por 16,6% da produção mundial), grandes porções de terra são inundadas para a formação da represa. Isso possibilita que a usina passe por um longo período de seca. Porém, com as constantes secas que tem ocorrido no Brasil nos últimos anos, o sistema elétrico nacional tem sofrido com isso, tendo em vista que nosso país é altamente dependente desse matriz energética. Não obstante, alguns desastres de engenharia ocorreram durante a história. Um dos mais recentes ocorreu na Usina hidrelétrica de Xepian-Xe Nam Noy em 2018, onde o rompimento da barragem da usina que começaria a operar em 2019, deixou 6.000 pessoas sem residência, além de 26 mortos e 130 desaparecidos.

As usinas termelétricas são fontes de energia que utilizam a queima de combustíveis fósseis para transformar em energia elétrica. Essas usinas são responsáveis pela produção de 65,6% de toda a energia produzida no mundo em 2015, de acordo com os dados divulgados pelo Ministério de Minas e Energias do Brasil (2018). Segundo Ernani Sartori (2008) este processo de queima sempre é acompanhado de produção de gases tais como CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Estes gases são os responsáveis pelo efeito estufa, chuvas ácidas e outros problemas ambientais e de saúde a população.

As usinas nucleares segundo IEA 2020 responsáveis por 10,2% de toda a energia elétrica produzida no mundo, geram grandes problemas ambientais devido a dificuldade no manejo dos rejeitos radioativos gerados na queima do urânio utilizado para alimentar os reatores, essas usinas geram receio na poluição devido ao histórico de acidentes que ocorreram no mundo, como nos casos de Chernobyl, na Ucrânia, e o de Fukushima, no Japão.

Uma solução que tem se apresentado frente a essas fontes de energia, são as fontes de energia renováveis. Solar, maremotriz, biocombustíveis e a eólica têm ganhado destaque no mundo da produção de energia. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, de 2010 a 2019 a oferta de energia interna, do tipo renovável, passou de 6,4% para 18 %.

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por finalidade realizar um comparativo da viabilidade de uso de aerogeradores para microgeração no contexto da cidade de Redenção.

### 2.2 Objetivos específicos

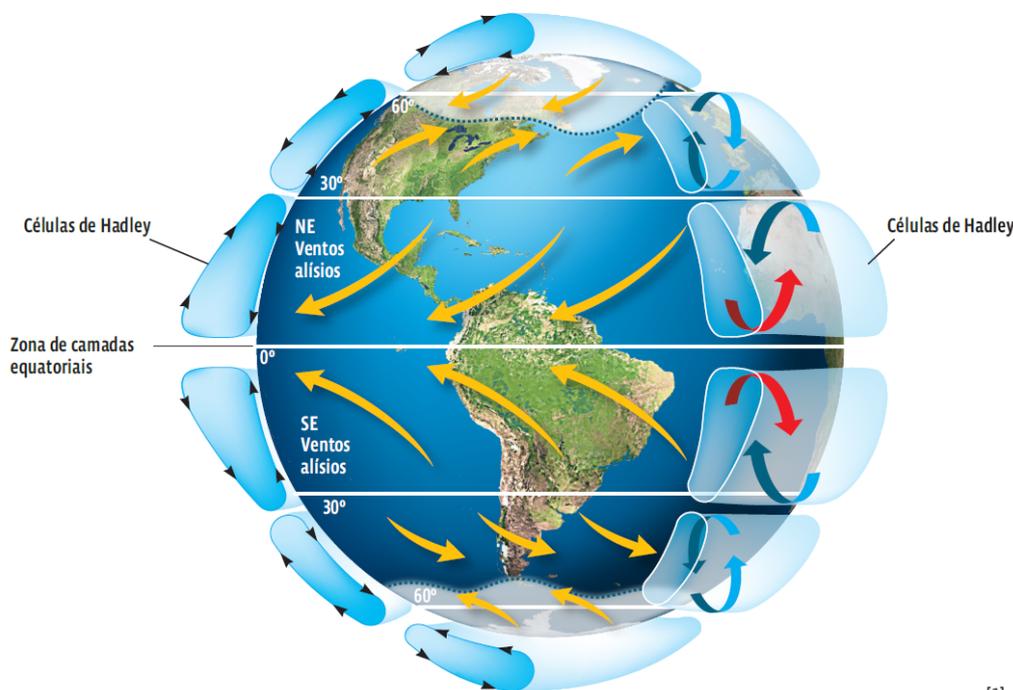
- Realizar uma revisão bibliográfica.
- Realizar o comparativo com outras alternativas de microgeração.
- Concluir sobre a viabilidade preliminar da implantação do parque.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Energia eólica

A energia eólica é uma forma indireta de energia solar e está associada à energia cinética dos ventos. Esse movimento da massa de ar ocorre por conta do aquecimento desigual da superfície terrestre pela energia radiante do sol onde, numa região mais quente, o ar se aquece e se expande, diminuindo a densidade e a pressão em níveis de menor altitude, enquanto numa região mais fria o ar se resfria e se contrai aumentando a densidade e a pressão naquele local. Dessa forma, o movimento da massa de ar se dará do local frio para o local quente, ou seja, da maior pressão para a menor pressão. Esse efeito, somado às condições geográficas dos locais e à força inercial de Coriolis gera a movimentação dos ventos no nosso planeta (Figura 1). (Alves, Kauê 2018)

Figura 1: Representação da ação dos ventos no planeta



[1]

Fonte: Conhecimento Científico

Uma estimativa da energia eólica total disponível ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (CRESESB, 2008)

### 3.2. Os ventos

Por conta do aquecimento desigual da Terra, zonas de diferentes pressões são criadas na atmosfera, gerando os ventos. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera pode ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra (CRESESEB, 2008)

As regiões tropicais (que recebem os raios solares quase que perpendicularmente) são mais aquecidas que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar frio que se desloca das regiões polares. Esse deslocamento das massas de ar que determina a formação dos ventos.

No planeta existem locais onde os ventos nunca se cessam, devido aos mecanismos que os produzem estarem sempre presente. São basicamente o aquecimento na região tropical e o resfriamento na região polar. São os chamados ventos constantes ou planetários e podem ser classificados das seguintes formas (CRESESEB, 2008):

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-alísios: ventos que sopram do Equador para os polos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os polos.
- Polares: ventos frios que sopram dos polos para as zonas temperadas.

Devido a inclinação da Terra em aproximadamente  $23^\circ$  em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, ocorrem variações sazonais na incidência de radiação solar recebida na superfície terrestre, resultando em variações sazonais na duração e na intensidade dos ventos. Dessa forma, os “ventos periódicos” ou “ventos continentais” surgem. Desses ventos se formam as brisas e monções, sendo esses últimos ventos periódicos que mudam de direção aproximadamente a cada meio ano. De uma forma geral, esses ventos sopram numa determinada direção em uma estação do ano, para soprar no sentido contrário em outra estação, as brisas são ventos periódicos que sopram do continente para o mar durante a noite e do mar para o continente durante o dia. Esse fenômeno ocorre por conta da diferença na capacidade de cada superfície em refletir, emitir e absorver o calor emitido pelo Sol.

Durante o dia, como o continente tem uma capacidade maior de refletir os raios solares que o oceano, o ar é aquecido por esses raios refletidos, aumentando sua temperatura e fazendo com que a pressão sobre o continente seja maior do que a pressão do ar sobre o oceano, criando uma diferença de pressão que gera o vento do oceano para o continente, também chamado de brisa marítima. Porém, durante a noite, a temperatura do continente cai mais rapidamente do que a temperatura do oceano,

abaixando a temperatura do ar e criando uma brisa contrária à brisa que ocorre durante o dia. Como a diferença de temperatura entre a terra e o mar durante a noite costuma ser menor do que a diferença durante o dia, a brisa terrestre que ocorre à noite costuma ter uma intensidade menor do que a brisa marítima do dia (CRESESB, 2008).

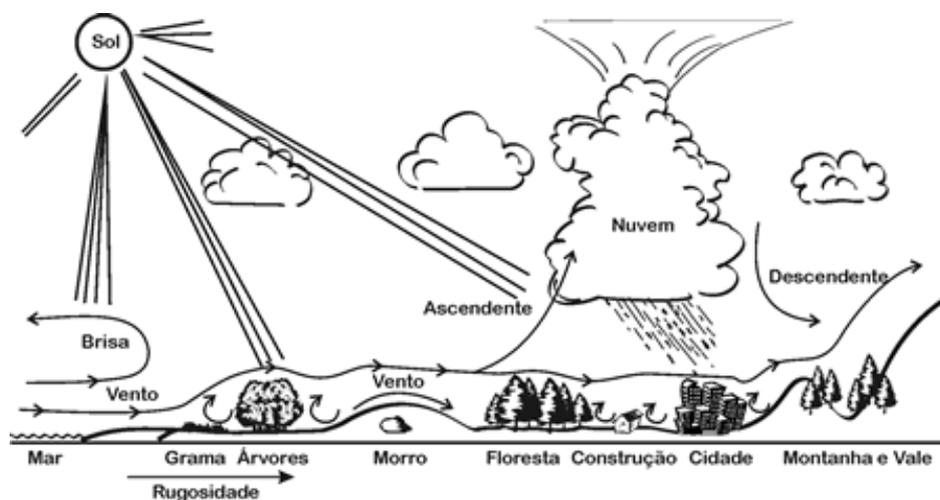
Além dos ventos já citados, existem também os chamados “ventos locais”, que são muito mais dependentes das condições locais do ambiente onde ocorrem. Normalmente se dão por variações geográficas no ambiente onde são encontrados.

Inúmeros fatores podem alterar o comportamento dos ventos ao longo do tempo. Dentre os principais fatores de influência no comportamento dos ventos, destacam-se (CRESESB, 2008):

- Variação da velocidade do vento com a altura;
- Obstáculos nas áreas próximas;
- Rugosidade do terreno (caracterizado pelas construções, vegetação, utilização da terra etc.);
- Relevo, que pode causar a aceleração ou desaceleração do escoamento do ar.

Além desses e outros fatores alteram o comportamento dos ventos (Figura 2), os ventos podem variar sua velocidade de forma significativa em apenas alguns metros.

Figura 2: Comportamento dos ventos nas diversas superfícies

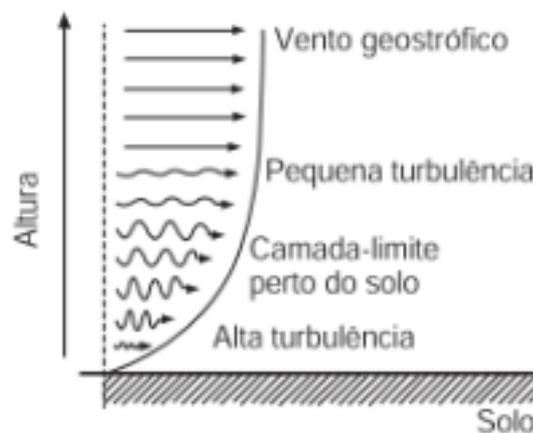


Fonte: CRESESB

### 3.2.1 Comportamento do vento com a altura

O atrito do ar em movimento com a superfície terrestre resulta em uma força horizontal contrária a direção do fluxo de ar, resultando em uma redução da velocidade do vento próximo a superfície. Esta força contrária a direção do fluxo de ar reduz com o acréscimo da altura, tornando-se desprezível a partir de determinada altura, chamada de camada limite de acordo com a Figura 3. (FADIGAS, 2011)

Figura 3: Comportamento dos ventos com a altura



Fonte: FADIGAS (2011)

Uma das formas de determinar a velocidade do em alturas distintas é através do perfil exponencial, como lei da potência (FADIGAS, 2011) descrita na Equação 1.

$$V = V_r \left( \frac{H}{H_r} \right)^\alpha \quad (1)$$

Onde:

$V$  = Velocidade na altura  $H$  (m/s)

$V_r$  = Velocidade do vento na altura de referência (m/s)

$H$  = Altura desejada (m)

$H_r$  = Altura de referência (m)

$\alpha$  = expoente da lei de potência no local

O expoente  $\alpha$  refere-se a características inerentes ao terreno e à cobertura do solo, seu valor de acordo com os dados presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela do fator  $\alpha$  para diferentes tipos de superfícies

<b>DESCRIÇÃO DO TERRENO</b>	<b>Fator n</b>
<b>Superfície lisa, lago ou oceano</b>	<b>0,10</b>
<b>Gramma baixa</b>	<b>0,14</b>
<b>Vegetação rasteira (até 0,3 m), árvores ocasionais</b>	<b>0,16</b>
<b>Arbustos, árvores ocasionais</b>	<b>0,20</b>
<b>Árvores, construções ocasionais</b>	<b>0,22-0,24</b>
<b>Áreas residenciais</b>	<b>0,28-0,40</b>

Fonte: FADIGAS (2011)

### 3.3 História da energia eólica

A força dos ventos é utilizada a milhares de anos, deste que se percebeu que ela poderia movimentar certos corpos, utilizando da força aerodinâmica de arrasto sobre placas ou velas, para produzir trabalho, seja na moagem de grãos, bombeamento de água ou para movimentar barcos. (Energês, 2020)

Os primeiros moinhos de vento eram bastante rudimentares, como pode ser visto na Figura 4, tendo eixo vertical, devido, talvez, a sua facilidade de desenvolvimento e acoplado em edificações. Esse tipo de mecanismo tinha como função a moagem de grãos ou bombeamento de água. (Energês, 2020)

Figura 4: Moinho de vento persa



Fonte: Solaripedia

Segundo BATISTA (2013), os chineses utilizavam moinhos de rotor vertical com velas nas pás para aproveitar a força de arrasto que o vento exercia sobre as velas, com o intuito de elevar água para irrigar os campos de arroz.

Máquinas eólicas acionadas por força de sustentação, possivelmente, foram introduzidas e disseminadas na Europa pelas Cruzadas, no século XI. Contudo é fato que no século XIV, na Holanda, a evolução técnica e de capacidade em potência dessas máquinas eólicas já era amplamente utilizado (BRITO, S. S, 2008).

Na Holanda, do século XIV, estas máquinas já apresentavam grande evolução tecnológica, capacidade de potência e eram amplamente difundidas como fonte geradora de energia mecânica. Nos séculos seguintes houve uma grande expansão na sua utilização, sendo utilizadas na fabricação de papel, na produção de óleos vegetais e até em projetos de drenagem (FERREIRA JÚNIOR, 2016).

Considera-se que o período escravocrata na colonização da América teve um papel inibidor na migração desta tecnologia para a América (Figura 5).

“Com o surgimento da máquina a vapor, iniciou-se o declínio do uso da energia eólica na Holanda.” (CHESF-BRASCEP, 1987)

Figura 5: Moenda manual



Fonte: Fafich UFMG

“No final do século XIX, com o desenvolvimento de sistemas de transformação e distribuição da eletricidade, a energia eólica convertida anteriormente em energia mecânica [...] passou a ser convertida em energia elétrica.” (BATISTA, 2013).

O ressurgimento da aplicação das máquinas eólicas em larga escala deu-se nos EUA, no século XIX, após a abolição da escravidão. Disseminando cata ventos de múltiplas pás para bombeamento d’água em áreas áridas daquele país. Essas máquinas eólicas chegaram a ser produzidas industrialmente em escala de centenas de milhares de unidades/ano, o que possibilitou preços acessíveis e o acesso de grande parte da população a essa tecnologia. (AMARANTE et al. 2001)

Na Escócia, em 1887, o professor James Blyth, do Colégio de Anderson, Glasgow, desenvolveu o primeiro moinho de vento utilizado para a produção de energia elétrica, numa torre de 10 m de altura montado no jardim de sua casa em Marykirk. A energia gerada carregava acumuladores que serviam para iluminar sua casa de campo. Apesar do evidente sucesso na geração de energia elétrica o invento de Blyth não evoluiu, por ser economicamente inviável. (MME, 2014).

Outro moinho de vento projetado e construído para geração de energia foi em Cleveland, Ohio (USA), entre os anos de 1887 e 1888, por Charles F. Brush. Contava com um rotor de 17m de diâmetro, 144 lâminas, sobre uma torre de 18 m de altura para gerar uma potência 12 kW. (MME – Ministério de Minas e Energia, 2014).

Entre os anos de 1891 e 1918, na Dinamarca foram instalados 100 aerogeradores de rotor horizontal com potência entre 30 kW e 35 kW. (BATISTA, 2013 apud MANWELL 2002)

No ano de 1926, G. J. M. Darrieus desenvolveu e patenteou seus estudos sobre aerogeradores de eixo vertical, que faz uso das forças de sustentação exercidas nas pás para propulsão do rotor. Os aerogeradores com essa configuração são nomeados como aerogeradores tipo Darrieus um exemplo deste gerador é mostrado na Figura 6.

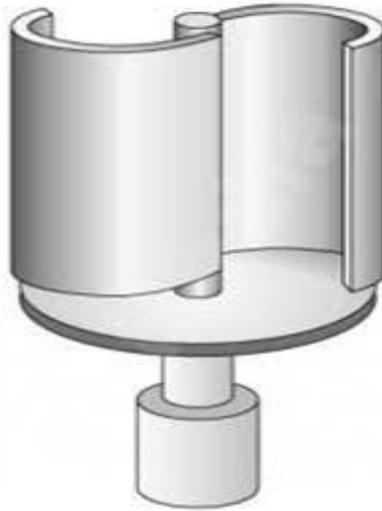
Figura 6: Aerogerador Darrieus



Fonte: Evolução AALP

No ano de 1929, S.J. Savonius desenvolve e patenteia seus estudos sobre aerogeradores de eixo vertical. Este aerogerador aproveita as forças de arrasto exercidas nas pás (Figura 7) geralmente côncavas, para propulsão do rotor. Os aerogeradores com essa configuração são nomeados como de aerogeradores tipo Savonius.

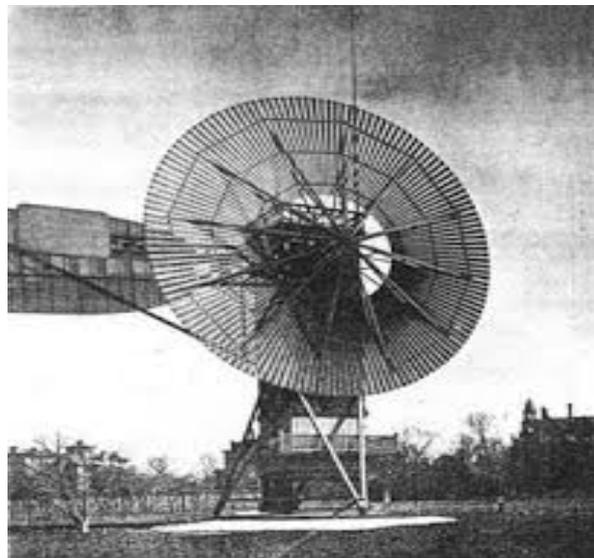
Figura 7: Aeroerador Savonius



Fonte: Slideshare

O primeiro aerogerador de grande potência foi desenvolvido em 1944. Esse equipamento possuía potência superior a 1 MW e ficava no estado de Vermont nos Estados Unidos (Figura 8), e abastecia algo em torno de 1.000 casas. Porém o projeto foi descontinuado devido a problemas de manutenção em tempo de Segunda Guerra Mundial (BRITO, S. S, 2017).

Figura 8: Turbina eólica de múltiplas pás



Fonte: Ministério de Minas e Energia

A utilização de cata-ventos de múltiplas pás, destinados ao bombeamento d'água, desenvolveu-se de forma efetiva, em diversos países, principalmente nas suas áreas rurais. Acredita-se que, desde a segunda metade do século XIX, mais de 6 milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos para o bombeamento d'água em sedes de fazendas isoladas e para abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas (CHESF-BRASCEP, 1987).

Visando a geração de energia elétrica, nos Estados Unidos, passou-se a utilizar pequenos aerogeradores para carregar baterias, o que facilitou o acesso à energia elétrica dos habitantes do meio rural. Segundo Amarante, et al (2001) “Entre 1930 e 1960, dezenas de milhares desses aerogeradores foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países. Ao longo das décadas de 1950 e 1960 a produção desses aerogeradores foi gradualmente desativada, à medida que as redes elétrica passaram a atender o meio rural.

O século XX, como visto, foi caracterizado por importantes trabalhos e estudos teóricos e práticos relacionados à conversão de energia eólica em energia elétrica, mas segundo Batista (2013) “sempre acompanhadas de pouco interesse por parte da indústria, visto que, as fontes não renováveis eram economicamente e financeiramente mais atrativas”. A crise energética de 1973, que originou num aumento dos preços dos combustíveis fósseis e o crescente medo de sua extinção fizeram com que, ressurgisse o interesse e desenvolvimento de meios renováveis de obtenção energia elétrica, sejam elas eólicas, solares, geotérmicas, biomassas etc.

A geração de energia elétrica mais próxima aos locais de consumo se torna cada vez mais importante, uma vez que surge a necessidade de uma distribuição mais eficiente, inteligente e que atenda às necessidades sempre crescentes. Os aerogeradores de eixo verticais apresentam uma série de vantagens se comparados aos de eixo horizontais, como por exemplo: ocupa menor espaço, menor quantidade de componentes, logo, menor custo de manutenção e de produção, ruídos quase inaudíveis, instalação mais próxima ao solo, baixa vibração e não necessitam de alinhamento com o vento. (BATISTA, 2013) ,como desvantagens podemos apontar: menor desempenho quando comparado a turbinas de eixo horizontal, torres de sustentação baixas, diminuindo o aproveitamento de maiores velocidades de vento.

Segundo (Hau, 2006) Os dinamarqueses investiram em aerogeradores de pequeno porte para geração de energia elétrica, na década de 70. Pequenas e médias empresas que fabricavam maquinário

agrícola começaram a desenvolver rotores eólicos de pequeno porte. Esses aerogeradores representavam uma pequena parcela da produção energética daquele país, contudo alguns fazendeiros começaram a formar cooperativas com o intuito de adquirir esses equipamentos com menor preço, construir plantas maiores, operar em plantas comunitárias e obter uma regulamentação legal de seu governo (apud Rahmeier, 2015, p.19) (Figura 9).

Figura 9: Aerogerador dinamarquês



Fonte: Energy Environ

Segundo o Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Energias Renováveis, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada na Dinamarca, no ano de 1976 (Rahmeier, 2015). Tal pioneirismo deve ser encarado como um bom exemplo de como iniciar, desenvolver e ampliar uma atividade de conversão energética em pequena escala.

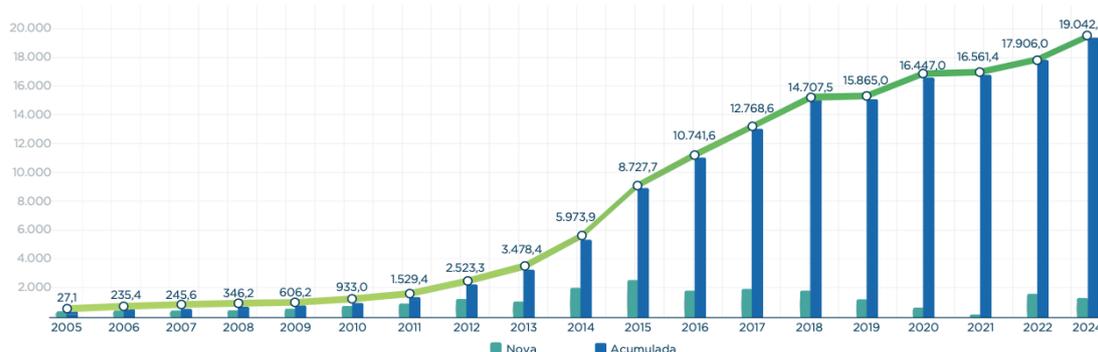
### 3.4. A eólica no Brasil

A geração de energia elétrica através da força dos ventos vem se expandindo de forma acelerada ao longo das últimas duas décadas, atingindo a escala de gigawatts gerados. Um dos limitadores para um crescimento, ainda maior, dos empreendimentos eólicos no Brasil é a falta de dados consistentes e confiáveis, sendo grande parte destes dados mascarados por influências aerodinâmicas de obstáculos, rugosidade e relevo. (FERREIRA JÚNIOR, 2016)

Avanços recentes da capacidade computacional, de simulações baseadas nas leis físicas de interação entre as diversas variáveis meteorológicas, juntamente com os já consolidados bancos de dados meteorológicos e registros anemométricos, torna possível superar barreiras e conhecer o real potencial eólico brasileiro. (AMARANTE, 2001)

O potencial eólico brasileiro, para exploração energética, tem sido objeto de estudo desde a década de 1970 e vem revelando um potencial a ser explorado muito grande. A exploração da energia eólica passou a ter relevância no Brasil no ano de 2006, quando o país atingiu a marca de 235,4 MW de potência instalada e deste então tem crescido com projeção de atingir o patamar de cerca de 20GW em 2024. (ABEEólica, 2018) (Figura 10).

Figura 10: Evolução do potencial de energia eólica instalada (MW)



Fonte: ABEEólica, 2018

No Brasil é estimado que o potencial de geração de energia eólica seja cerca de 500 gigawatts (GW), de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), energia suficiente para atender o triplo da demanda atual de energia do Brasil. O número é mais de três vezes superior ao atual parque nacional gerador de energia elétrica, incluindo todas as fontes disponíveis, como hidrelétrica, biomassa, gás natural, óleo, carvão e nuclear. Em dezembro de 2018, a capacidade de geração instalada somou 162,5 GW, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Desse total, as usinas eólicas responderam por 14,2 GW, equivalente à capacidade instalada da usina de Itaipu, de 14 GW – quantidade suficiente para abastecer 22 milhões de residências. A energia gerada com a força dos ventos ocupa o quarto lugar na matriz de energia elétrica nacional.

### 3.5 Tipos de turbinas eólicas

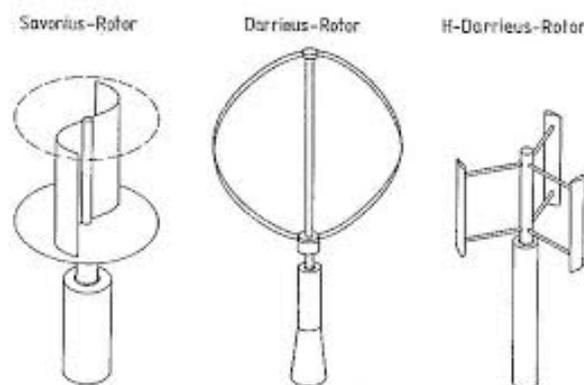
No início uso da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos, tais como as de eixo horizontal e eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono, dentre outras. Com o passar do tempo, foi estabelecido o projeto de turbinas eólicas com as seguintes

características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não- flexível.

O engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius desenvolveu modelo Savonius em 1922, contendo duas pás em formato de meio cilindro dispostas lado a lado, em posições contrárias e ligadas a um eixo vertical. Essas turbinas são movidas por forças de arrasto causadas pelo ar, girando o eixo central. (Rahmeier, 2015). As turbinas Savonius costumam possuir baixos rendimentos se comparada às outras turbinas.(Novelli, 2015)

O Francês G. J. M. Darrieus desenvolveu modelo Darrieus em 1931, sendo formado por duas ou três pás, de perfis aerodinâmicos. A turbina é usada para a geração de energia elétrica e apresenta o maior rendimento entre as turbinas de eixo vertical. Seu funcionamento se dá através das forças de sustentação gerando um alto torque de partida. Esse modelo apresenta variações do perfil que utilizam as pás nas posições verticais conforme Figura 11. (Rahmeier, 2015).

Figura 11: Variedades de turbinas de eixo vertical



Fonte: Adaptado de Costa, 2018 .

As Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal como na Figura 12 são as mais utilizadas e as que conseguem melhores rendimentos. Possuem até três pás e quando possuem mais, são chamadas de aerogeradores de múltiplas pás. O torque no rotor desse tipo de aerogerador é gerado pelas forças de sustentação do ar. (Novelli, 2015)

Figura 12: Variedades de turbinas de eixo horizontal



Fonte: Portal energia

### 3.6 Vantagens da energia eólica

A utilização da energia eólica comporta numerosas vantagens face às energias tradicionais, dentre as vantagens o uso de aerogeradores causa impactos mínimos em relação aos gerados pelas termelétricas, hidrelétricas, nucleares etc., a saber:

- As usinas eólicas não promovem queima de combustível fóssil, nem geram subprodutos que contaminam o ar, o solo e ou a água;
- Em média, cada MW instalado são gerados 15 postos de trabalho. Atualmente o Brasil tem 10 GW instalado;(ABEEólica, 2016)
- É inesgotável;
- Parques eólicos não emitem gases de efeito estufa.

Sendo uma fonte energética com baixíssimo impacto de implantação, a geração eólica não emite CO<sub>2</sub> em sua operação, fazendo dela uma ótima opção para substituir as fontes que emitem gases de efeito estufa. Segundo a ABEEólica No ano de 2019 o total de emissões evitadas foi de

22,85 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, o equivalente à emissão anual de cerca de 16 milhões de automóveis.

O gráfico da Figura 13 mostra quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas no ano de 2019, no qual se atingiu a marca de 22,85 milhões de toneladas. (ABEEólica, 2019)

Figura 13: Emissões de CO<sub>2</sub> Evitadas em 2019



Fonte: ABEEólica, 2019

### 3.7 Desvantagens da energia eólica

Apesar das vantagens no uso de energia eólica para a produção de energia elétrica, este tipo de aproveitamento energético apresenta algumas desvantagens e impactos significativos, principalmente no uso de grandes aerogeradores, parques e usinas eólicas.

Em parques eólicos as turbinas precisam resguardar determinadas distâncias uma das outras, de modo a não ocorrer problemas causados no escoamento do vento, como o efeito esteira. Mas, vale acrescentar que já existem sugestões para reaproveitamento deste imenso espaço, como por exemplo, o uso para atividade agrícola.

Um outro impacto ambiental são os ruídos emitidos pelas turbinas em um parque eólico. Devido a isto, esses parques não podem ser instalados muito próximos às áreas urbanas. O ruído é audível e atinge níveis de decibéis acima do recomendado pela OMS, causando poluição sonora. Esse ruído é decorrente do movimento das hélices em contato com o fluxo de ar e do movimento dos

mecanismos dos aerogeradores. Segundo (Tolmasquim,2003) “As habitações mais próximas deverão estar no mínimo a 200 metros de distância das turbinas”.(apud Rahmeier, 2015.)

As imensas hélices provocam certas sombras e reflexos que não são bem-vistos pela população. Além disso, as estruturas interferem na estética das paisagens naturais.

Quando há por perto receptores e transmissores de ondas de rádio, TV e micro-ondas, as hélices refletem parte da radiação eletromagnética. Desta forma a onda refletida atrapalha o sinal destes dispositivos.

### 3.8 Atlas do potencial eólico brasileiro

Com base no atlas do potencial eólico brasileiro que cobre todo o território nacional e tem por objetivo fornecer informações para capacitar tomadores de decisão na identificação de áreas adequadas para aproveitamentos eólico-elétricos. (Atlas, 2001)

Publicado pela primeira vez em 2001 o Atlas concebia apenas informações para a altura de 50m, o que na época era suficiente, pois a tecnologia de aerogeradores da época coincidia com as informações disponibilizados. Este sem dúvida foi um marco importante para o desenvolvimento da energia eólica no país. Com o passar dos anos o Brasil experimentou um incremento significativo no mercado eólico, além de experimentar um desenvolvimento tecnológico na área, tornando o antigo atlas defasado para as novas tecnologias. Assim o então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, através da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - Setec e da Coordenação Geral de Tecnologias Setoriais - CGTS, tomou a iniciativa de promover a atualização do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, considerando alturas superiores a 50 metros e as novas tecnologias disponíveis comercialmente. (Atlas, 2013)

Dentre os diversos modelos numéricos utilizados pelo CPTEC para previsão do tempo, o modelo de mesoescala Brams (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) foi escolhido para estimar a velocidade e a direção do vento em todo o país, para as alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 metros. Tal escolha foi baseada tanto no fato deste modelo ser o resultado da consolidação de várias adaptações do modelo Rams (Regional Atmospheric Modeling System) para as condições climáticas brasileiras, quanto na existência de muitos meteorologistas que o utilizam para previsão do tempo em todo o Brasil. Como o modelo Brams apresenta melhores resultados para simulações realizadas com base numa grade de 5 km x 5 km, escolheu-se esta

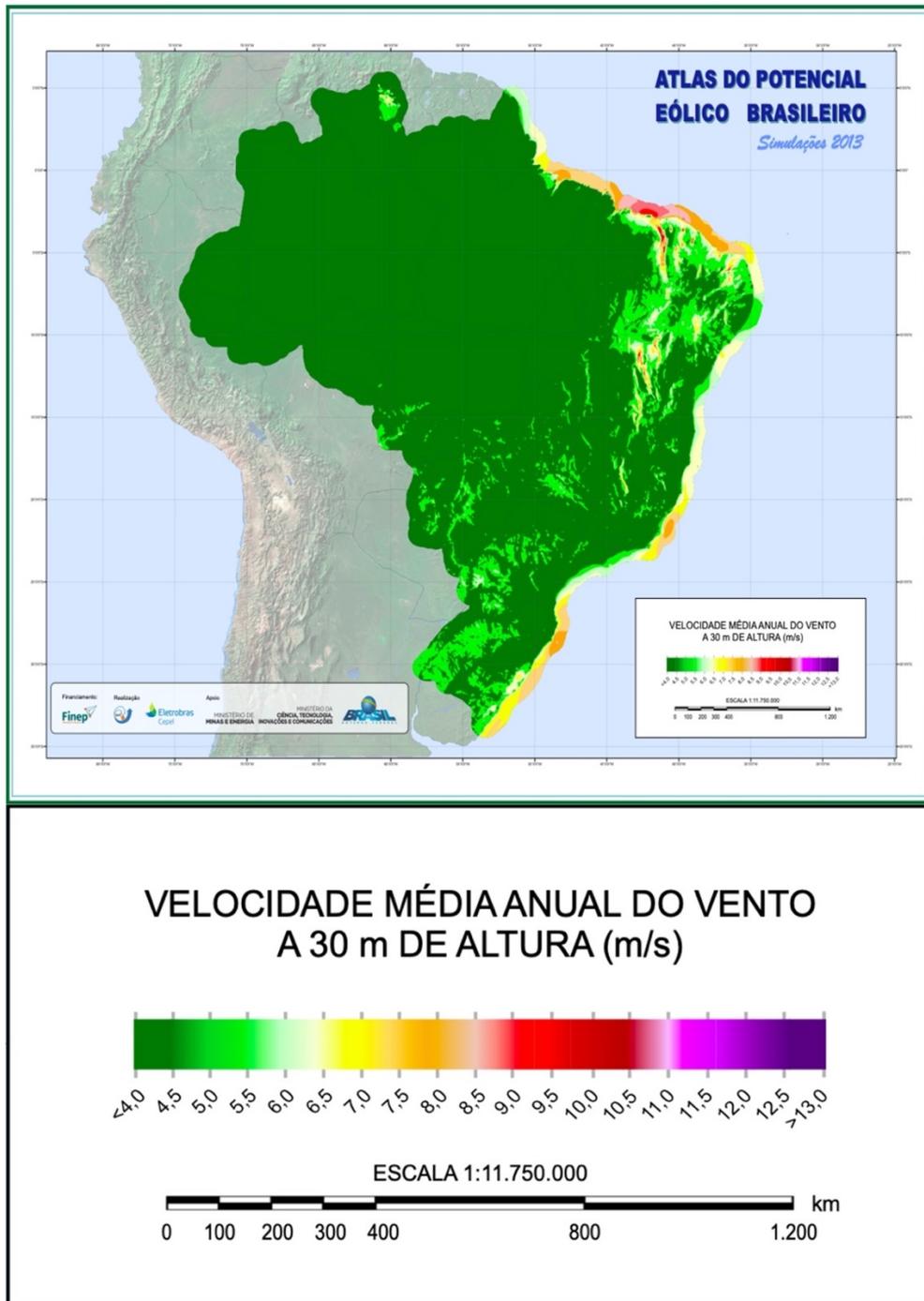
resolução para a elaboração do Atlas, que será utilizado como base para o estudo que será realizado. (Atlas, 2013)

### 3.8.1 Potencial eólico brasileiro

Segundo (CCEE,2014) o Brasil, além de ser rico em recursos hídricos, também possui um grande potencial eólico. Atualmente, o Brasil ocupa a 13ª posição no ranking dos países produtores de energia eólica, com 3,1 GW de potência eólica instalada. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o território brasileiro tem um potencial eólico de 300 GW, estando mais da metade do potencial concentrada na Região Nordeste do país. Na atualidade apenas 0,5% do potencial é aproveitado para geração de energia elétrica (apud Rahmeier, 2015).

A fim de explicitar o potencial brasileiro utiliza-se dados fornecidos pelo atlas eólico simulação 2013 referente às alturas de 30, 50 e 120 m, conforme pode ser observado nas Figuras 14, 15 e 16, respectivamente.

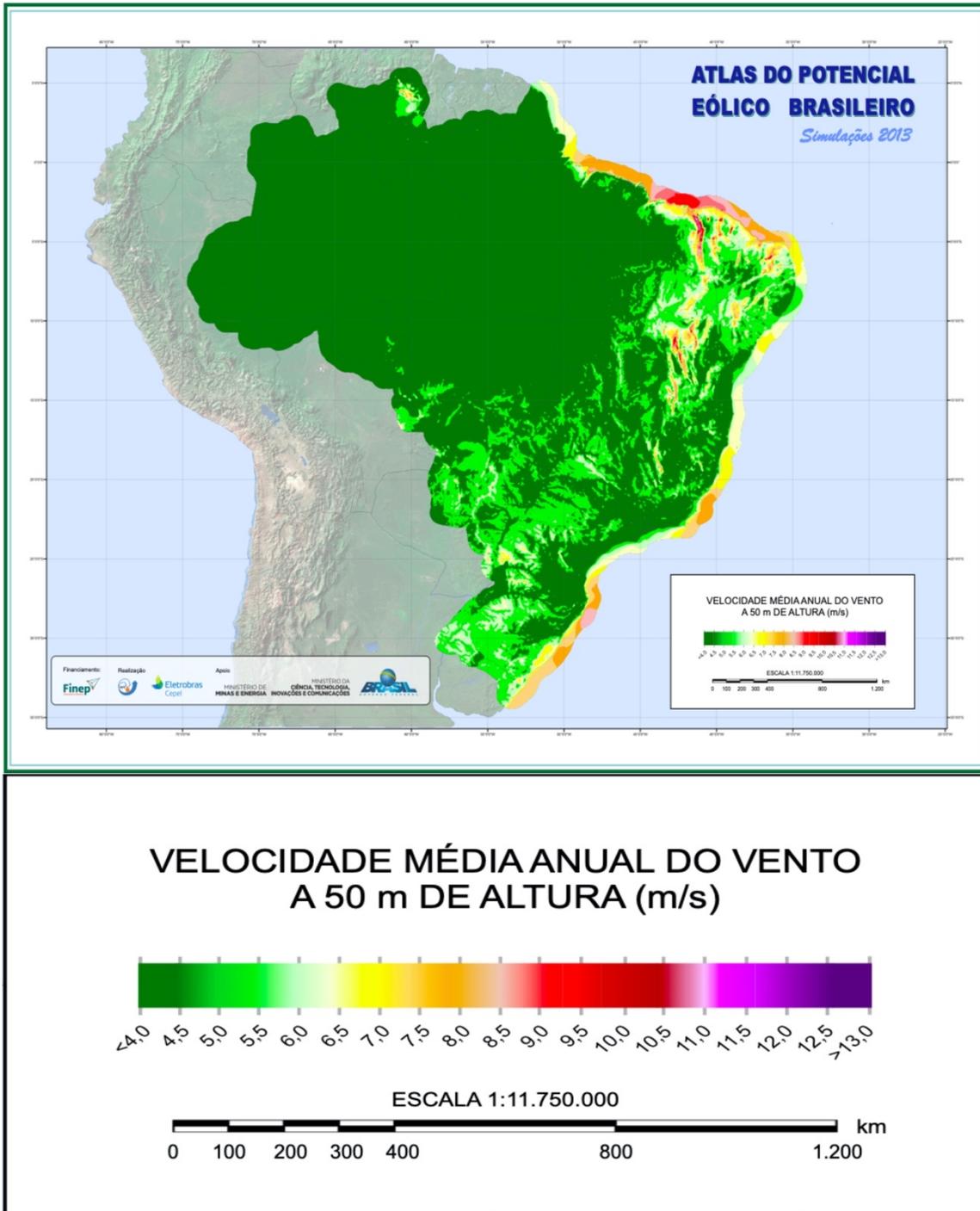
Figura 14: Potencial eólico brasileiro para altura de 30 m



Fonte: Adaptado de atlas potencial do eólico brasileiro (simulação 2013)

Nota-se que para a altura de 30m a velocidade média dos ventos anual varia de velocidades menores que 4 m/s, na maior parte do mapa, a 10 m/s, em algumas zonas litorâneas, mas com poucas áreas atingindo velocidades acima de 10 m/s.

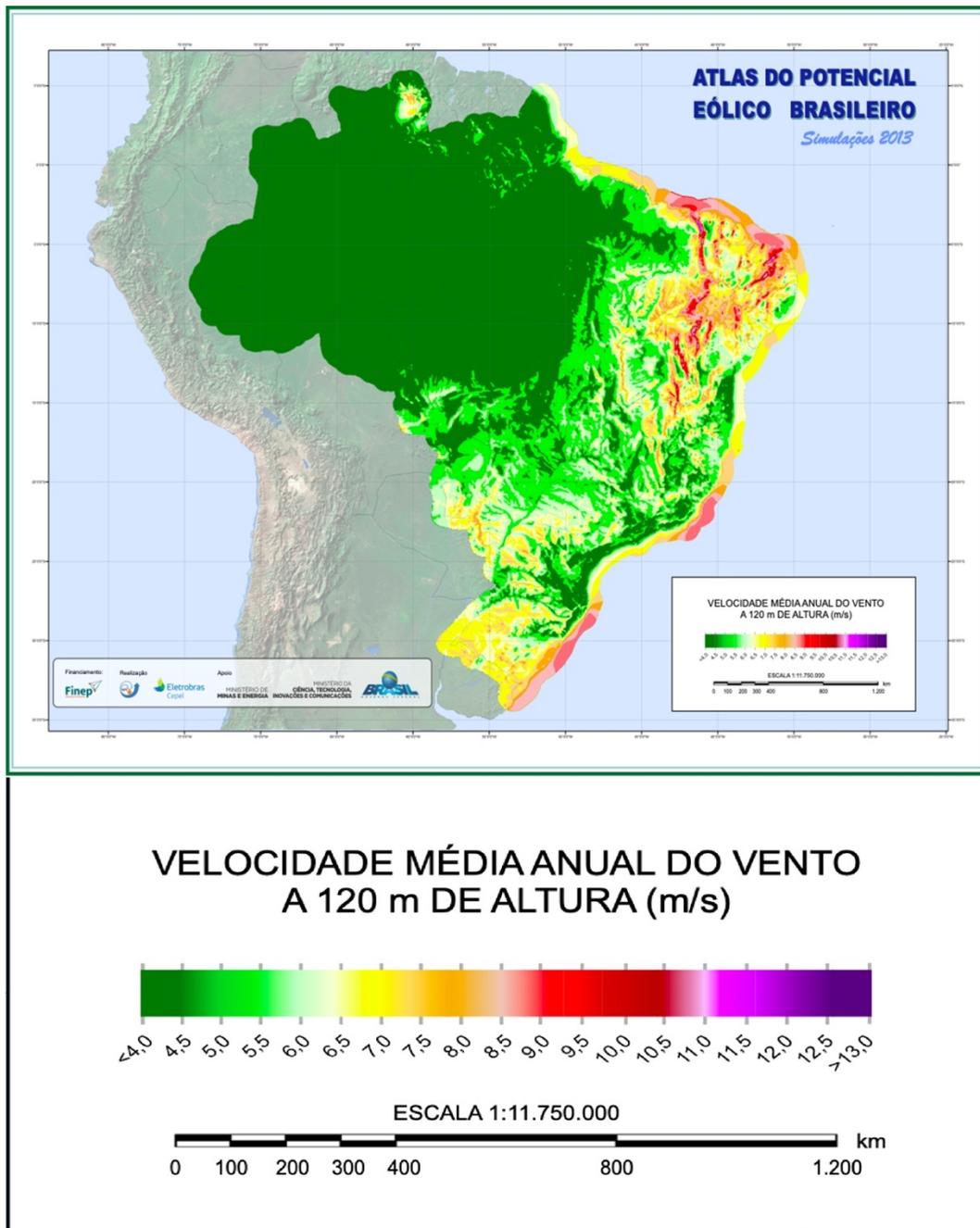
Figura 15: Potencial eólico brasileiro para altura de 50 m



Fonte: Adaptado de atlas potencial do eólico brasileiro (simulação 2013)

Conforme é possível observar com o incremento da altura para análise dos ventos a velocidade média varia de maneira crescente, onde é possível observar mais áreas atingido velocidades superiores a 5,5 m/s variando até 11 m/s na em locais do mapa.

Figura 16: Potencial eólico brasileiro para altura de 120 m



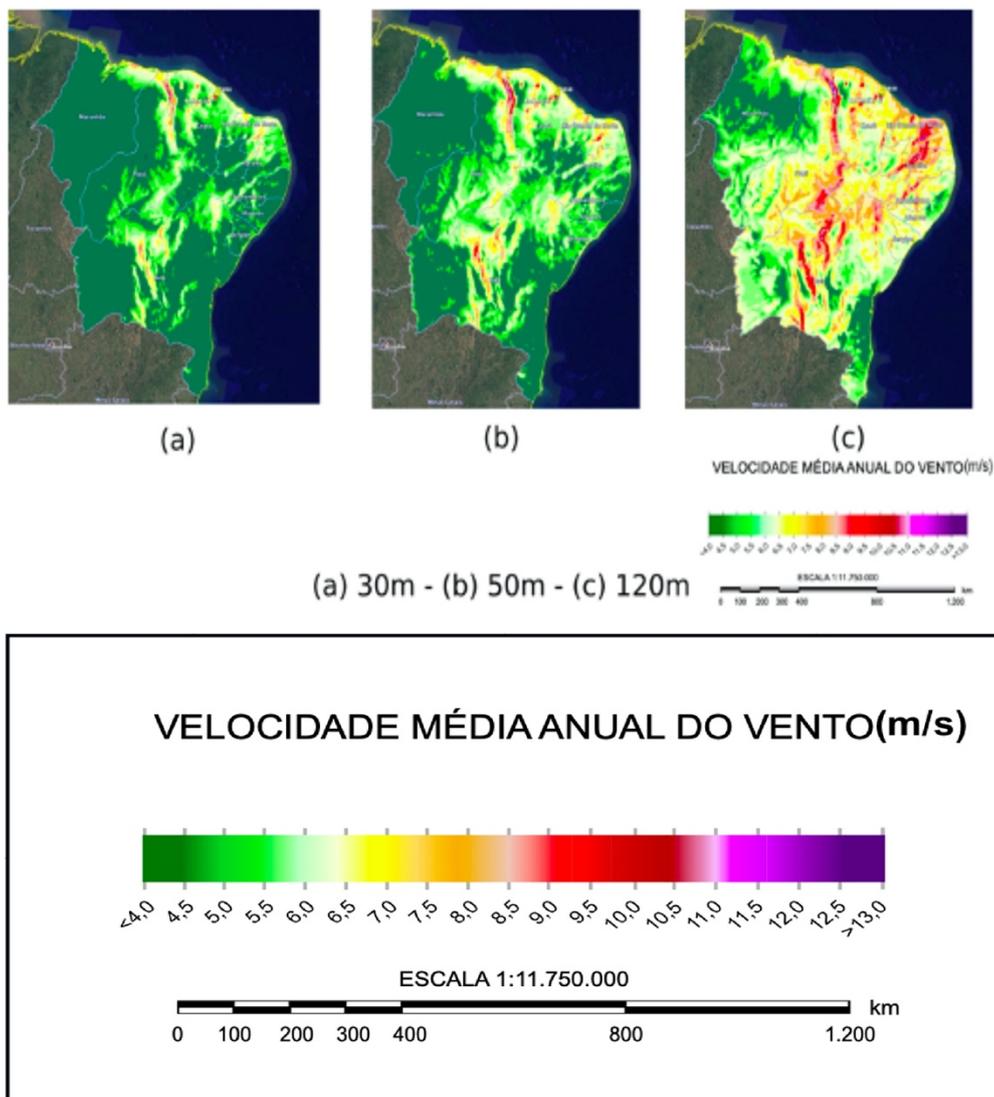
Fonte: Adaptado atlas potencial do eólico brasileiro (simulação 2013)

Com base na Figura 16, temos que, com exceção da região norte e uma parte do centro-oeste, praticamente todo o país registra velocidades acima de 5,5 m/s quando consideramos a altura de 120m atingindo em muitos pontos da região nordeste velocidades médias acima de 10 m/s, chegando a 12 m/s em alguns locais.

### 3.8.2 Potencial eólico para região nordeste

O Brasil possui potencial de geração de energia elétrica a partir da fonte eólica superior à atual demanda desse insumo. Segundo o Atlas do Potencial Eólico do Brasil (Amarante et al., 2001), o potencial eólico do Brasil alcança 143 GW, dos quais cerca da metade no Nordeste. Esse montante foi estimado tendo por base velocidades médias de vento igual ou superior a 7 m/s a 50 metros de altura, que está explicitado esse potencial na Figura 17.

Figura 17: Potencial eólico para região nordeste



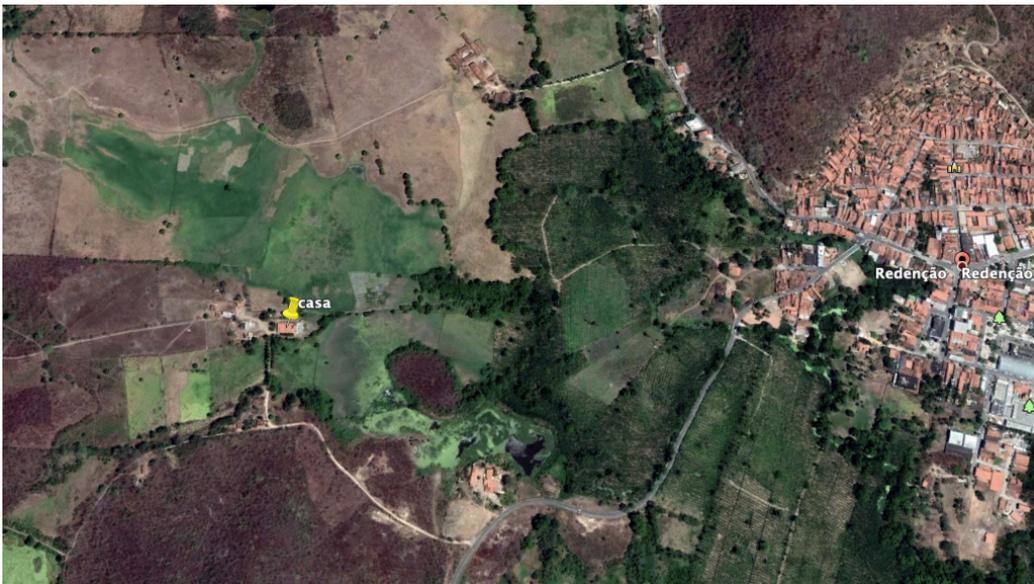
Fonte: Adaptado atlas potencial do eólico brasileiro (simulação 2013)

Conforme Figura 17 observa-se que mesmo pra pequenas altitudes como a 30m o Nordeste apresenta locais com potencial possível de ser explorado para a microgeração, registrando em seu litoral velocidades superiores a 7 m/s mesmo para altura de 30 m. Sendo a análise realizada com base nos cenários para 50m e 120m, é possível verificar-se um aumento nas áreas com velocidades superiores a 7 m/s, registrando-se na altitude de 120m grande parte das áreas com velocidades superiores a 8 m/s, sendo comprovado o grande potencial a ser explorado.

## 4. ESTUDO DE CASO

Como objeto desse estudo foi definido o município de redenção, que está localizada a cerca de 2 km do centro da cidade em questão em uma propriedade rural, mais precisamente coordenadas geográficas 4°13'29.41"S; 38°44'27.74"O, conforme imagem abaixo (Figura 18). A área foi selecionada para estudo por estar inserida no contexto da Unilab estando na mesma cidade que é sediado o campi Liberdade.

Figura 18: Localização do empreendimento a ser estudado



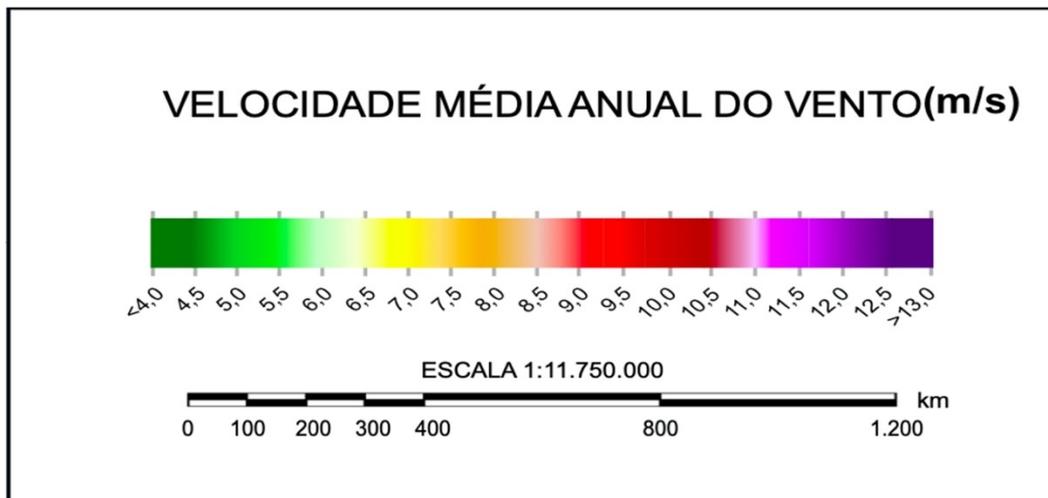
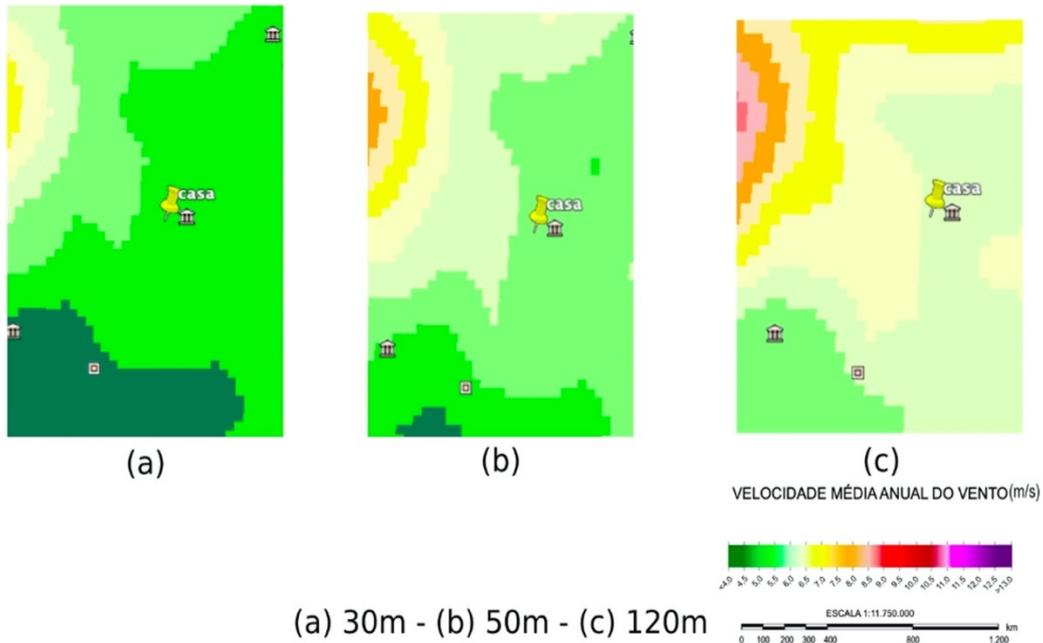
Fonte: Google Earth (Autor próprio)

Será desenvolvido a análise da aplicabilidade de Aerogerador para microgeração no local, considerando aerogeradores de eixo vertical e horizontal, assim como é realizado um comparativo de atratividade de investimento com um sistema de microgeração fotovoltaico.

### 4.1 Potencial eólico para área de redenção

Dentro do contexto de nordeste, mas relativamente distante das áreas litorâneas o local de estudo se tornou ponto de referência para esta análise devido a localização próxima a universidade, tendo como objetivo verificar a viabilidade de microgeração eólica em áreas onde a incidência média de ventos é baixa, conforme exposto na Figura 19.

Figura 19: Potencial eólico para redenção



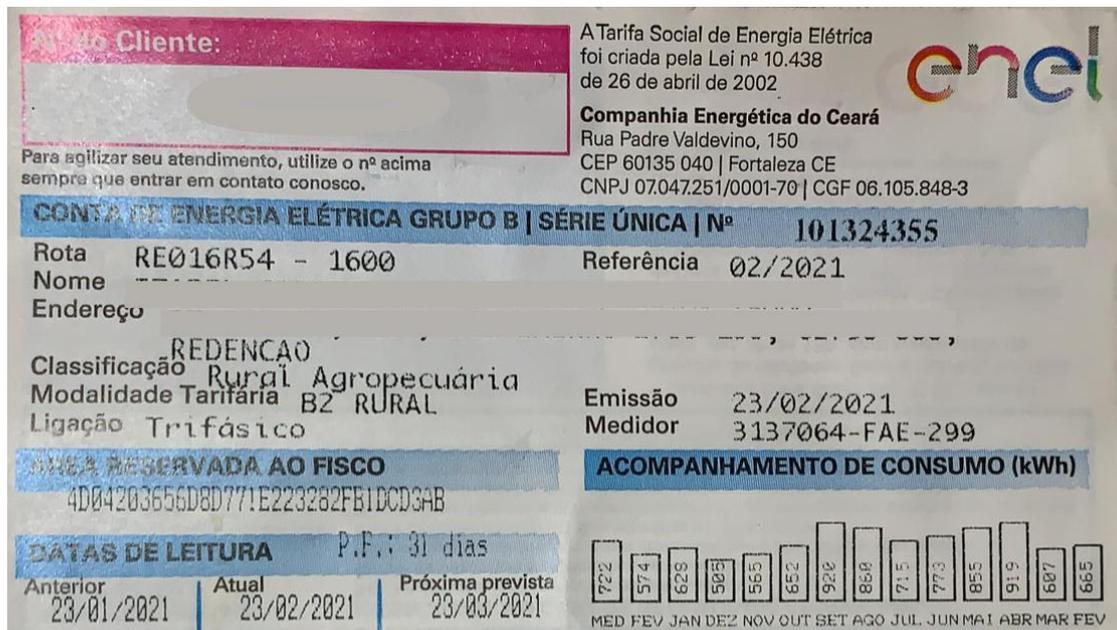
Fonte: Adaptado atlas potencial do eólico brasileiro (simulação 2013)

Conforme figura 19 é possível observar que para as alturas consideradas o local de análise tem potencial de velocidades médias variando entre 5,5 m/s e cerca de 6,5 m/s, para a altura de 30 metros e 120 metros, respectivamente. Comparando com o potencial do nordeste onde está inserida a cidade os valores de velocidade média dos ventos podem ser considerados baixos, entretanto é possível utilizar-se para ponto de estudo.

## 4.2 Demanda da UC

Visando atender o consumo estipulado utilizou-se a fatura de energia da UC em questão para estipular o sistema a ser implementado(Figura 20).

Figura 20: Fatura de energia da UC



Fonte: Próprio Autor

Com base nos dados presentes na fatura, que apresenta média de 722 kwh/mês, foi definido que o sistema a ser implantado deve ter potencial de geração média de 800 kwh/mês, já prevendo algum aumento de demanda futura.

## 4.3 Dimensionamento de sistema eólica residencial

O dimensionamento é realizado visando atender a demanda prevista, conforme apresentado, a fim de se avaliar a viabilidade de implantação do sistema no local escolhido.

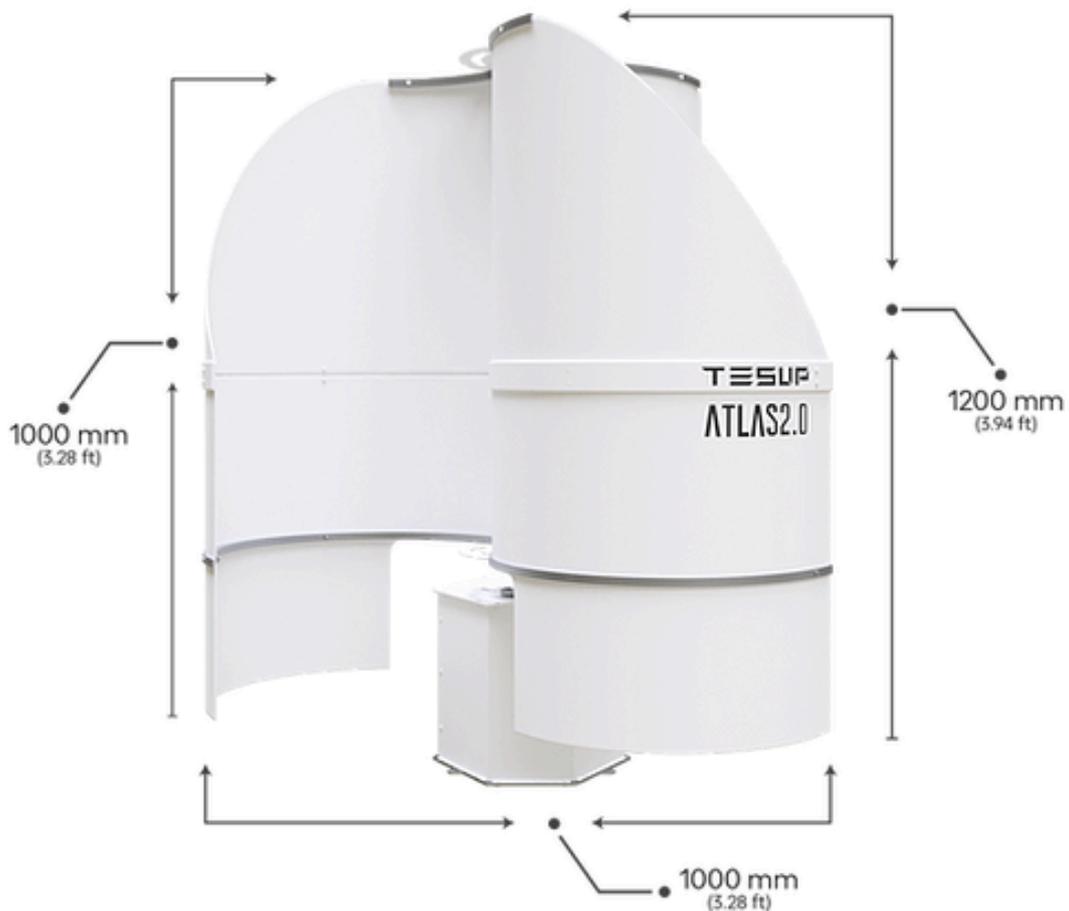
### 4.3.1 Utilizando Turbina VAWT

Em geral, os aerogeradores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devido às forças de Coriolis. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto. Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torre de vórtices. (CRESESEB, 2008)

#### 4.3.1.1 Turbina selecionada

Como base para análise selecionou-se uma turbina do tipo Savonius representada na Figura 21. O aerogerador Savonius é movido pela força de arrasto do ar o que resulta num torque de partida, exigindo velocidades maiores para início de operação.

Figura 21: Turbina de eixo vertical



Fonte: TESUP

O modelo representado na Figura 21 tem potência máxima nominal de 2kW, dentre outras características explicitadas na Tabela 2.

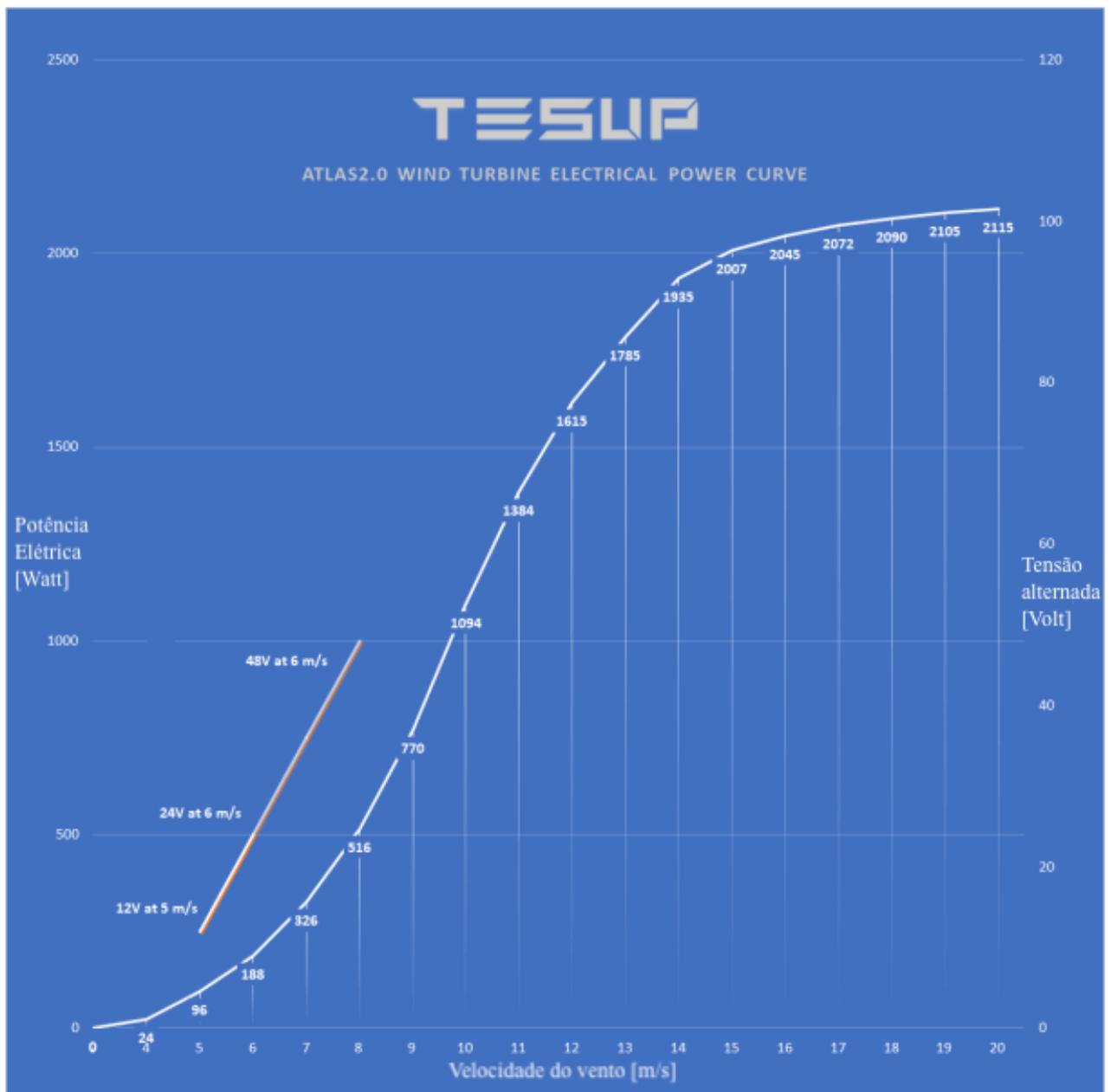
Tabela 2 – Especificações do Aerogerador de eixo vertical

<b>Especificações</b>	
<b>Designação</b>	<b>12 a 100 V</b>
<b>Gerador</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Gerador eólico de eixo vertical de 2kW</b>
<b>Peso</b>	<b>24kg</b>
<b>Potência máxima</b>	<b>2kW</b>
<b>Tensão de operação</b>	<b>0-100 Volts</b>
<b>Fase</b>	<b>3-fase</b>
<b>Início de operação</b>	<b>4 m/s</b>
<b>Material da placa de base</b>	<b>Folha metálica</b>
<b>Sentido de rotação</b>	<b>Sentido horário</b>
<b>Teste iniciais</b>	<b>EN 61000-6-1 (compatibilidade eletromagnética – imunidade) EN 61000-6-3 (compatibilidade eletromagnética – emissões)</b>
<b>Pás do rotor</b>	
<b>Material</b>	<b>Compósitos</b>
<b>Flange do cubo</b>	<b>Alumínio</b>
<b>Diâmetro</b>	<b>600 cm</b>
<b>Peso por pá do rotor</b>	<b>750 g</b>
<b>Sentido de rotação</b>	<b>Sentido horário</b>
<b>Velocidade de partida do vento</b>	<b>4 m/s</b>
<b>Nº de pás</b>	<b>9</b>
<b>RPM máximo</b>	<b>1240</b>
<b>Velocidade máxima</b>	<b>50 m/s</b>
<b>Ruído</b>	<b>30 dB</b>

Fonte: Tradução do manual do usuário TESUP

Conforme Figura 22, é possível observar o comportamento da potência desenvolvida pelo aerogerador de acordo com a velocidade do vento disponível no local.

Figura 22: Gráfico da curva de potência VAWT



Fonte: Adaptado do manual do usuário TESUP

#### 4.3.1.2 Definindo a altura da instalação

Com o objetivo de definir uma altura de torre que viabilize a implantação do sistema de geração, sem elevar muito os custos, optou-se por uma altura de 10 metros, a qual se atingiria instalando a turbina no topo da residência com o poste de instalação disponível no site do fabricante.

Desta forma, baseado no modelo de perfil vertical do vento baseado na lei da potência, dada por [FADIGAS, 2011], realizou-se o cálculo para determinar a velocidade do vento a esta altura utilizando a Equação 1, explicada anteriormente na seção 3.2.1:

$$V = Vr \left( \frac{H}{Hr} \right)^\alpha \quad (1)$$

Para definir-se o expoente  $\alpha$  considera-se como vegetação local a vegetação rasteira, com até 0,3 metros de altura, com eventuais presenças de árvores, os valores estão presentes na Tabela 1, seção 3.2.1.

Desta forma, é possível estimar a velocidade média dos ventos locais através da Equação 1:

$$V = 5,5 \left( \frac{10}{30} \right)^{0,16}$$

Logo a velocidade média para a altura proposta será de  $V = 4,62$  m/s.

#### 4.3.1.3 Produção esperada

Com base na velocidade de vento calculada na seção 4.3.1.2 e no gráfico da curva de Potência presente na seção 4.3.1.1 (Figura 21), obtêm-se a potência média extraída da turbina, para as condições propostas por interpolação linear, descrita na Equação 2.

$$\frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} = \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} \quad (2)$$

Onde:

$X_0$ = Valor do limite inferior no eixo X

$x_1$ = Valor limite superior no eixo X

$x_2$ = Valor definido no eixo X

$y_0$ = Valor do limite inferior no eixo Y

$y_1$ = Valor do limite superior no eixo Y

$y_2$ = Valor a ser definido

Assim substituindo os valores presentes no gráfico da Figura 21:

$$\frac{5 - 4}{96 - 24} = \frac{5 - 4,62}{96 - y_2}$$

Sendo  $y_2$  o valor de potência a ser estimado.

Logo pode se estimar uma potência média disponível de 70 W:

$$P \cong 70 \text{ Watt.}$$

A produção mensal de uma turbina será dada pela Equação 3:

$$PME = \frac{8760.P.f}{12} \quad (3)$$

Onde:

PME= Produção média mensal de energia

8760= Número de horas em um ano

P= Potência média disponível.

$f$ = Frequência de velocidades de vento.

12= número de meses no ano

Logo a Produção média mensal, calculada utilizando a Equação 3 será:

$$PME = \frac{8760.70.1}{12}$$

Para simplificação de cálculo consideraremos a frequência sendo 1.

PME= 51100 Wh // 51,1 Kwh mensal.

Desta forma para a demanda proposta seriam necessários 16 aerogeradores deste tipo. Essa quantidade de aerogeradores se deve a baixa velocidade média do vento no local, além do fato do aerogerador selecionado para estudo possuir um alto torque de partida iniciando sua operação apenas com velocidades de 4m/s, assim o aerogerador opera, devido a velocidade do vento no local, a maior parte do tempo com apenas 3,5% da sua capacidade nominal.

#### 4.3.2 Utilizando turbina HAWT

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais comuns, e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação e forças de arrasto. Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo). (CRESESB,2008)

##### 4.3.2.1 Turbina selecionada

Como base para análise selecionou-se uma turbina de três pás representada na Figura 23. O aerogerador eixo horizontal é movido principalmente pelo efeito de forças de sustentação que permitem alcançar uma potência maior para a mesma velocidade de vento quando comparado a turbinas operam sobre forças de arrasto do ar, o que resulta num melhor aproveitamento dos ventos.

Figura 23: Turbina de eixo horizontal



Fonte: TESUP

O aerogerador selecionado tem potência máxima nominal de 3.1kW, dentre outras características presentes na Tabela 3.

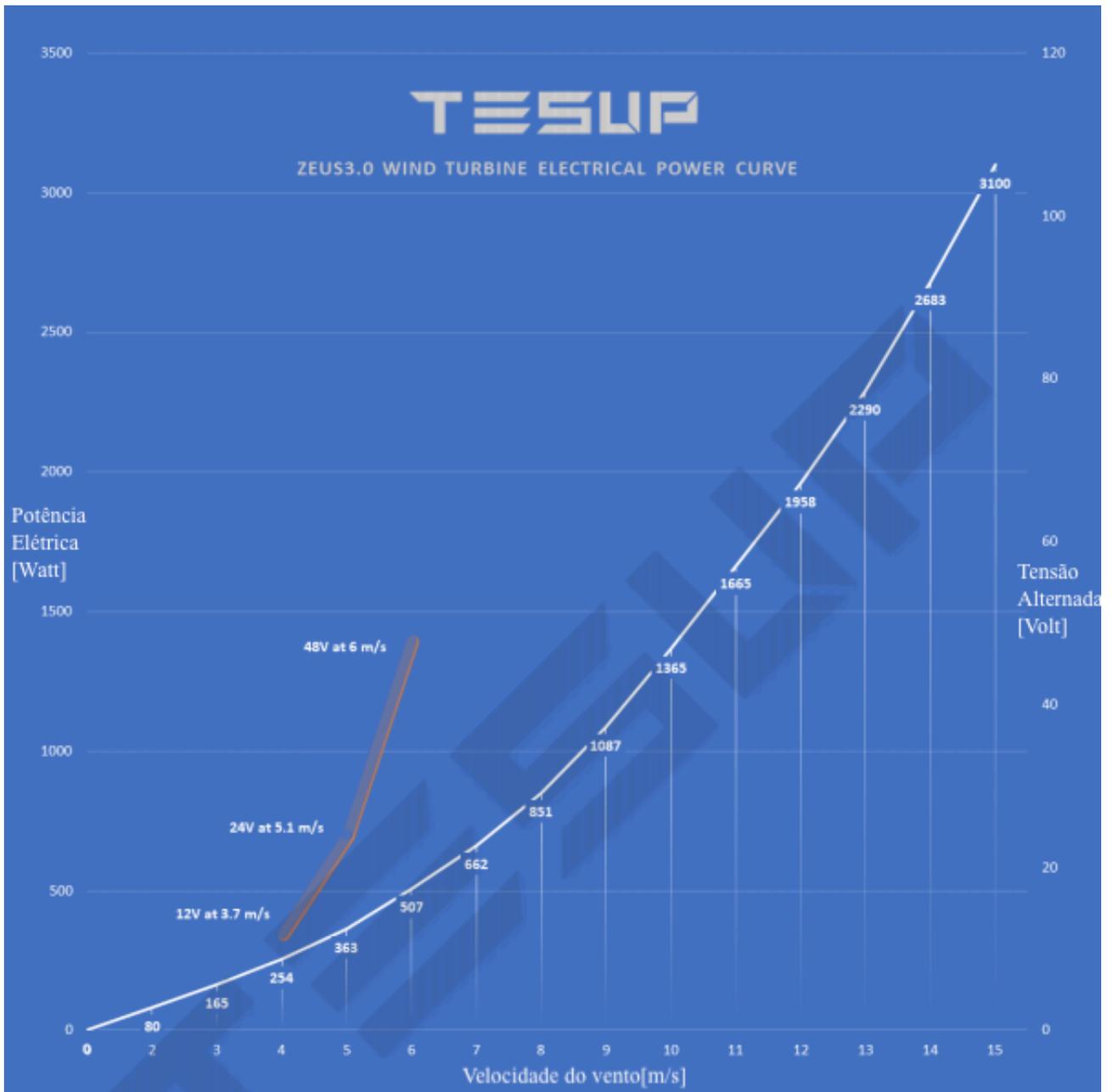
*Tabela 3 – Especificações do Aerogerador de eixo horizontal*

<b>Especificações</b>	
<b>Designação</b>	<b>TESUP ZEUS 3.0</b>
<b>Gerador</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Rotor de ímã permanente, sem escova, sem engrenagens, livre de manutenção</b>
<b>Peso</b>	<b>24kg</b>
<b>Potência máxima</b>	<b>3.1kW</b>
<b>Tensão de operação</b>	<b>0-143 Volts</b>
<b>Fase</b>	<b>3-fase</b>
<b>Início de operação</b>	<b>3 m/s</b>
<b>Material da casca</b>	<b>Alumínio</b>
<b>Sentido X-Y de rotação</b>	<b>Qualquer</b>
<b>Teste iniciais</b>	<b>EN 61000-6-1 (compatibilidade eletromagnética – imunidade) EN 61000-6-3 (compatibilidade eletromagnética – emissões)</b>
<b>Pás do rotor</b>	
<b>Material</b>	<b>Compósitos</b>
<b>Flange do cubo</b>	<b>Aço fundido</b>
<b>Diâmetro</b>	<b>2.25 cm</b>
<b>Peso por pá do rotor</b>	<b>720 g</b>
<b>Sentido de rotação</b>	<b>Frontal em Sentido horário</b>
<b>Velocidade de partida do vento</b>	<b>2 m/s</b>
<b>Nº de pás</b>	<b>3</b>
<b>RPM máximo</b>	<b>1200</b>
<b>Velocidade máxima</b>	<b>Furação escala 3</b>
<b>Barulho</b>	<b>60 dB</b>

Fonte: Tradução do manual do usuário TESUP

Conforme Figura 24, é possível observar o comportamento da potência desenvolvida pelo aerogerador de acordo com a velocidade do vento disponível no local.

Figura 24: Gráfico da curva de potência HAWT



Fonte: Tradução do manual do usuário TESUP

#### 4.3.2.2 Produção esperada

Para base de cálculo utilizaremos a mesma velocidade obtida através de cálculo realizado na seção 4.3.1.3 utilizando a Equação (1), tendo como resultado obtido 4,62 m/s para uma altura de 10 m.

Desta forma calcularemos a potência esperada para a velocidade descrita acima por meio de interpolação linear descrita na Equação (2).

$$\frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} = \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} \quad (2)$$

Assim substituindo os valores presentes no gráfico da Figura 24:

$$\frac{5 - 4}{363 - 254} = \frac{5 - 4,62}{363 - Y_2}$$

Sendo  $y_2$  o valor de potência a ser estimado.

Logo pode se estimar uma potência média disponível de:

$$P=322 \text{ w}$$

Logo a Produção média mensal, calculada utilizando a Equação 3 será:

$$PME = \frac{8760.322.1}{12}$$

Para simplificação de cálculo consideraremos a frequência sendo 1.

$$PME= 235.060 \text{ Wh // } 235,06 \text{ Kwh mensal.}$$

Desta forma para a demanda proposta seriam necessários 4 aerogeradores deste tipo. Essa quantidade de aerogeradores deve-se ao fato de o aerogerador selecionado para estudo possuir um menor torque de partida e iniciar sua operação com velocidades de 3 m/s, ainda assim o aerogerador opera, devido a velocidade do vento no local, a maior parte do tempo com cerca de 10,5% da sua capacidade nominal.

## 4.4 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

### 4.4.1 O sistema

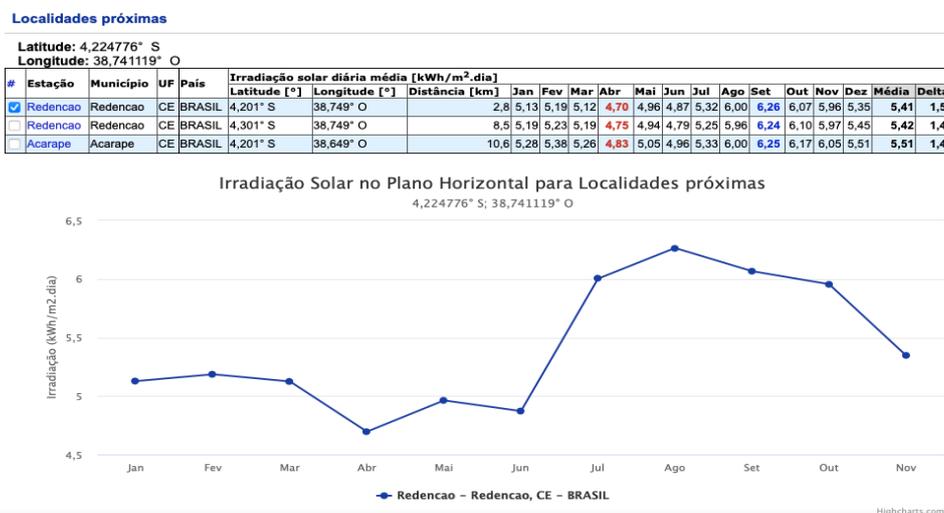
O sistema de geração solar é a forma de geração distribuída (GD) mais disseminada no mercado brasileiro (ABGD, 2021), para definirmos o sistema a ser utilizado faremos o seguinte cálculo

$$Potencia\ do\ sistema = \frac{consumo\ médio\ anual}{365 \times radiação\ solar\ média \times performance\ ratio} \quad (4)$$

- Para questão de cálculo será adotado 365 dias como referência para o ano
- Radiação solar média é obtida por meio do atlas da CRESESB utilizando a localização geográfica da UC.
- *Performance ratio* é um fator que prevê a redução da geração estimada por possíveis sombreamentos, nebulosidade, dentre outros, que podem reduzir o rendimento do sistema, obtida através da simulação com o software Design da SolarEdge

De acordo com o CRESESB, 2021 temos que a radiação solar média local anual é de 5,45 kWh/m<sup>2</sup>.dia tendo variações de acordo com o mês conforme Figura 25.

Figura 25: Irradiação média local



Será considerado para efeito de cálculo uma taxa de perda 18%, que foi o valor obtido no software Design da SolarEdge a partir as coordenadas do local, orientação azimute do sistema e angulação do telhado que foi considerada de 10°.

Desta forma pode se calcular a potência média conforme mostrado na Equação 4:

$$Potência\ do\ sistema = \frac{9600}{365 \times 5,45 \times 0,82} (4)$$

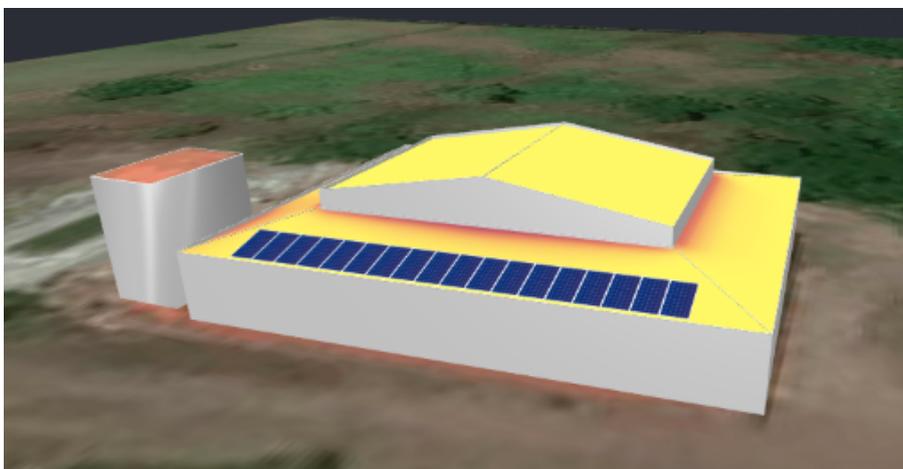
Logo a potência estimada do sistema é de:

$$Potência\ do\ sistema \cong 6,0\ kWp$$

#### 4.4.2 A geração

Conforme as informações previamente descritas o sistema foi modelado utilizando o software Design da SolarEdge, utilizando-se da localização geográfica, e das dimensões da residência, desenhou-se o local conforme representado na Figura 26, simulando angulação do telhado, diferença de alturas entre as águas do telhado, além de possíveis obstáculos como a caixa d'água da residência. Adotando-se o telhado com orientação azimute norte.

Figura 26: Modelagem do Sistema



Fonte: Próprio Autor

Conforme o Software Design da Solaredge utilizado para modelagem do sistema, utilizando-se a localização o software com seu banco de dados define a radiação solar média, conforme relatado anteriormente no tópico 4.4.1 a angulação do telhado considerada é de 10°, e área utilizada foi de 40 m<sup>2</sup> na face norte, desta forma obteve-se os seguintes resultados presentes nas Figuras 27 a 30.

Figura 27: Dados da simulação



Fonte: Design SolarEdge (2021)

O sistema adotado foi um sistema considerado convencional com Inversor fotovoltaico, foi definido desta forma, pois é o com melhor custo-benefício disponível considerando-se que o local a ser instalado não apresenta obstáculos próximos que possam vir a sombrear o sistema, o que poderia ocasionar perdas por sombreamento significativas nesse tipo de topologia.

Figura 28: Estimativa de geração x Consumo



Fonte: Design SolarEdge (2021)

Figura 29: Estimativa de geração x consumo mês a mês



Fonte: Design SolarEdge (2021)

Figura 30: Diagrama de perdas do sistema

**DIAGRAMA DE PERDAS DO SISTEMA**

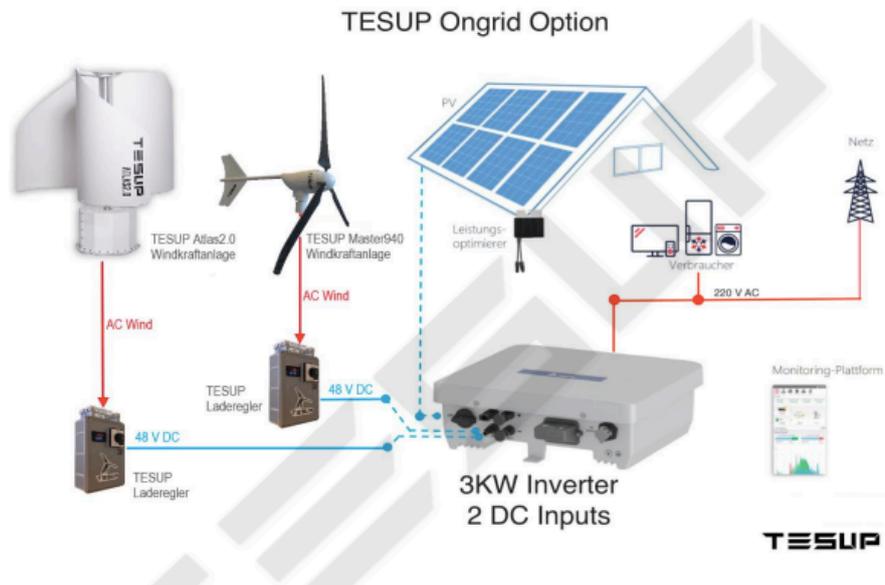


\*Este valor é calculado com base em informações personalizadas

Fonte: Design SolarEdge (2021)

## 5. COMPARATIVO DE CUSTOS DE INSTALAÇÃO

Figura 31: Diagrama de ligação Ongrid gerador eólico



Fonte: Manual do usuário TESUP

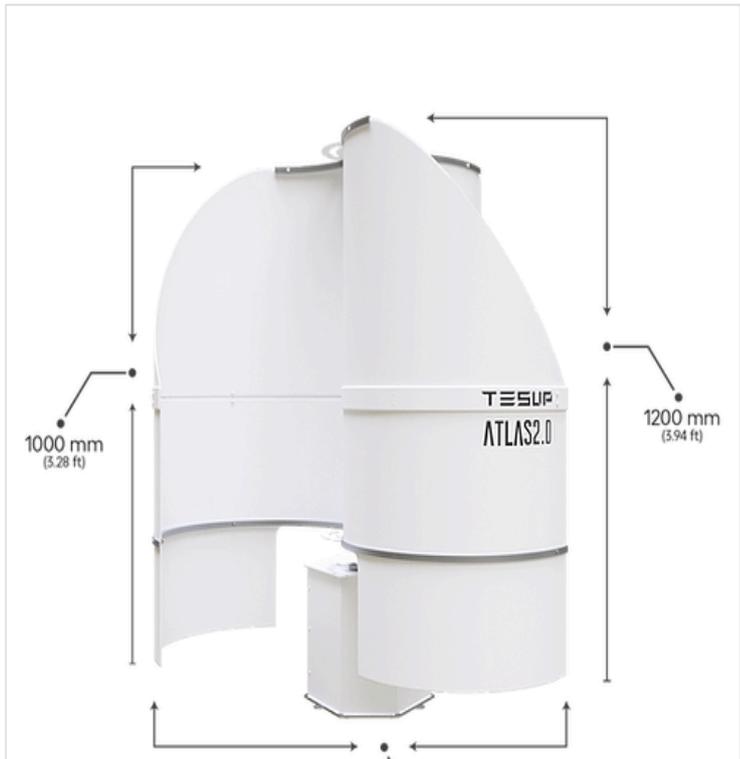
### 5.1 Custo de instalação com VAWT

#### 5.1.1 Aerogerador VAWT

Gerador de vento de eixo vertical de 2 KW de baixa vibração e baixo ruído. Com seu formato compacto, possui a menor velocidade de vento inicial e uma área de captação de vento maior, o que permite gerar eletricidade em velocidades de vento mais baixas (TESUP, 2021), representado na Figura 32.

O aerogerador descrito será conectado ao inversor representado na Figura 33, sendo a conexão realizada com dois aerogeradores para cada inversor.

Figura 32: Preço unitário VAWT



The diagram shows a white vertical-axis wind turbine (VAWT) with a curved blade. Dimensions are indicated: a height of 1000 mm (3.28 ft) for the main body and a total height of 1200 mm (3.94 ft) including the blade. The turbine is labeled 'TESUP ATLAS2.0'. To the right, the product name is 'Turbina Eólica de ATLAS2.0 (fabricada na Europa)' with reference 'REF: ATLAS2.0 + CC'. The price is 'R\$ 5.510,00'. Below the price, there is a dropdown menu for 'Controlador de carga? (R\$ 610)' with '24 e 48 V' selected. A 'Quantidade' field shows '1'.

Turbina Eólica de  
ATLAS2.0 (fabricada  
na Europa)

REF: ATLAS2.0 + CC

R\$ 5.510,00

Controlador de carga? (R\$ 610)

24 e 48 V

Quantidade

1

Fonte: TESUP

Figura 33: Preço unitário Inversor



Inversor de rede solar e eólica

R\$ 4.100,00

Fonte: TESUP

Para atender a demanda serão necessários 16 aerogeradores do tipo VAWT conforme calculado na seção 4.3.1.3 e 8 inversores para a ligação a rede, com custo estimado de 120.960,00 reais.

#### 5.1.2 Material CA

Estimou-se um gasto de 6.000,00 reais de material CA para instalação do sistema, incluso nesse custo está:

- 400 Cabos CA 6 mm<sup>2</sup>;
- 1 Quadro CA;
- 4 DPS 10ka 275v;
- 8 Disjuntores de 20A;
- Eletrocalhas e eletrodutos;
- Conduletes;
- Abraçadeiras;
- Materiais para aterramento;
- etc.

#### 5.1.3 Mão de obra

O custo estimado da mão de obra de 2.500,00 por aerogerador, nesse custo está incluso:

- Montagem do poste de sustentação
- Fixação da estrutura ao ponto de instalação
- Fixação do aerogerador ao poste de sustentação
- Montagem do circuito de alimentação CC e CA
- Aterramento das estruturas

Totalizando 40.000,00 reais para a instalação 16 aerogeradores.

## 5.2 Custo de instalação com HAWT

### 5.2.1 Aerogerador HAWT

Turbina eólica de 3100W extremamente durável de última geração. Com a ajuda da experiência da TESUP na fabricação de fibra de vidro, as pás do rotor são muito duráveis e estáveis, ao mesmo tempo muito leves (TESUP, 2021), representado na Figura 34.

Figura 34: Preço unitário HAWT



Fonte: TESUP

Conforme estipulado na seção 4.3.2.2 para a demanda a ser atendida serão necessários 4 aerogeradores do tipo HAWT e 2 inversor para ligação a rede (o modelo do inversor é o mesmo da figura 33).

O aerogerador será conectado ao inversor representado na Figura 34, sendo a conexão realizada com dois aerogeradores para cada inversor.

### 5.2.2 Material CA

Estimou-se um gasto de cerca de 3000,00 de material CA para instalação do sistema, incluso nesse custo está:

- 150 Cabos CA 6mm<sup>2</sup>;
- 1 Quadro CA;

- 4 DPS 10ka 275v;
- 2 Disjuntores monofásicos de 20A ;
- Eletrocalhas e eletrodutos;
- Conduletes;
- Abraçadeiras;
- Materiais para aterramento;
- etc.

### 5.2.3 Mão de obra

O custo estimado da mão de obra gira em torno de 2.500,00 por aerogerador, nesse custo está incluso:

- Montagem do poste de sustentação
- Fixação da estrutura ao ponto de instalação
- Fixação do aerogerador ao poste de sustentação
- Montagem do circuito de alimentação CC e CA
- Aterramento das estruturas

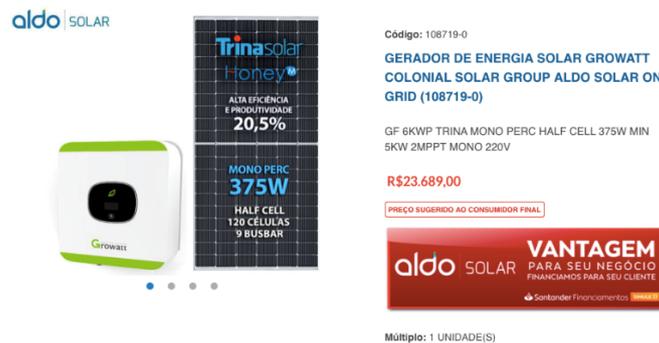
Totalizando 10.000,00 para a instalação de 4 aerogeradores

## 5.3 Custo de instalação com sistema solar

### 5.3.1 Kit gerador fotovoltaico

Optou-se por utilizar o Gerador fotovoltaico com topologia de Inversor, representado na Figura 35.

Figura 35: Preço Kit Gerador Solar



Fonte: Aldo solar

### 5.3.2 Material CA

Estimou-se um gasto de cerca de 300,00 reais de material CA por kW para instalação do sistema incluso nesse custo está:

- 100 Cabos CA 6mm<sup>2</sup>;
- 1 Quadro CA;
- 2 DPS 10ka 275v;
- 1 Disjuntores monofásicos de 32A ;
- Eletrocalhas e eletrodutos;
- Conduletes;
- Abraçadeiras;
- Materiais para aterramento;
- etc.

Totalizando 1800,00 reais para o sistema de 6 kW

### 5.3.3 Mão de obra

O custo estimado da mão de obra gira em torno de 500,00 reais por kW instalado nesse custo está incluso:

- Fixação da estrutura ao telhado
- Fixação dos painéis as estruturas
- Montagem do circuito de alimentação CC e CA
- Aterramento das estruturas

Totalizando 3000,00 reais para o sistema de 6 kW.

Na Tabela 3 estão unificados os custos inerentes a cada sistema.

Tabela 3 – Comparativo de Custos Sistemas

	Gerador VAWT	Gerador HAWT	Gerador Fotovoltaico
Equipamentos	120.960,00	32.080,00	23.689,00
Material CA	6.000,00	3000,00	1.800,00
Mão de obra	40.000,00	10.000,00	3.000,00
Total	166.960,00	45.080,00	28.489,00

Fonte: Próprio Autor

Com base nos dados utilizados para simular a viabilidade de instalação vemos que o gerador VAWT, no que desrespeito a custos, é a opção menos atrativa, pois faz-se necessário uma quantidade maior de equipamentos para atingir a geração necessária a UC. Embora lugar selecionado para a instalação do gerador eólico apresente com ventos de baixa intensidade, podendo ser classificado como brisa fraca na escala de Beaufort, O gerador HAWT é uma opção viável ainda que menos atrativa financeiramente que o Gerador fotovoltaico.

#### 5.4 Comparativo retorno de investimento

Os comparativos de retorno estão dispostos nas Tabelas 4 a 6, utilizou-se o método de payback descontado para obter os resultados.

Tabela 4 – Cálculo de retorno do investimento cenário 1 Gerador VAWT

Período (Ano)	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	Conta sem energia solar	Conta com energia solar	Economia
0	-R\$ 166.960,00	-R\$ 166.960,00	-R\$ 166.960,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	R\$ 7.686,85	R\$7.517,20	-R\$ 159.442,30	R\$ 8.215,01	R\$ 528,16	R\$ 7.686,85
2	R\$ 8.243,37	R\$7.884,58	-R\$ 151.557,73	R\$ 8.809,77	R\$ 566,40	R\$ 8.243,37
3	R\$ 8.840,19	R\$8.269,16	-R\$ 143.288,37	R\$ 9.447,60	R\$ 607,41	R\$ 8.840,19
4	R\$ 9.480,22	R\$8.672,92	-R\$ 134.615,45	R\$ 10.131,61	R\$ 651,39	R\$ 9.480,22
5	R\$ 10.166,59	R\$9.096,17	-R\$ 125.519,28	R\$ 10.865,14	R\$ 698,55	R\$ 10.166,59
6	R\$ 10.902,65	R\$9.540,09	-R\$ 115.979,19	R\$ 11.651,77	R\$ 749,12	R\$ 10.902,65
7	R\$ 11.692,00	R\$10.005,66	-R\$ 105.973,33	R\$ 12.495,36	R\$ 803,36	R\$ 11.692,00
8	R\$ 12.538,51	R\$10.493,96	-R\$ 95.479,57	R\$ 13.400,03	R\$ 861,52	R\$ 12.538,51
9	R\$ 13.446,29	R\$11.006,08	-R\$ 84.473,45	R\$ 14.370,19	R\$ 923,89	R\$ 13.446,29
10	R\$ 14.419,80	R\$11.543,20	-R\$ 72.930,29	R\$ 15.410,59	R\$ 990,78	R\$ 14.419,80
11	R\$ 15.463,80	R\$12.106,53	-R\$ 60.823,76	R\$ 16.526,32	R\$ 1.062,52	R\$ 15.463,80
12	R\$ 16.583,38	R\$12.697,35	-R\$ 48.126,41	R\$ 17.722,82	R\$ 1.139,44	R\$ 16.583,38
13	R\$ 17.784,01	R\$13.317,01	-R\$ 34.809,40	R\$ 19.005,95	R\$ 1.221,94	R\$ 17.784,01
14	R\$ 19.071,58	R\$13.966,90	-R\$ 20.842,50	R\$ 20.381,98	R\$ 1.310,41	R\$ 19.071,58
15	R\$ 20.452,36	R\$14.648,52	-R\$ 6.193,98	R\$ 21.857,64	R\$ 1.405,28	R\$ 20.452,36
16	R\$ 21.933,11	R\$15.363,39	R\$ 9.169,41	R\$ 23.440,13	R\$ 1.507,02	R\$ 21.933,11
17	R\$ 23.521,07	R\$16.113,16	R\$ 25.282,57	R\$ 25.137,20	R\$ 1.616,13	R\$ 23.521,07
18	R\$ 25.223,99	R\$16.899,51	R\$ 42.182,08	R\$ 26.957,13	R\$ 1.733,14	R\$ 25.223,99
19	R\$ 27.050,21	R\$17.724,24	R\$ 59.906,32	R\$ 28.908,83	R\$ 1.858,62	R\$ 27.050,21
20	R\$ 29.008,64	R\$18.589,22	R\$ 78.495,54	R\$ 31.001,83	R\$ 1.993,18	R\$ 29.008,64

Investimento Inicial	R\$ 166.960,00	Conta Atual	R\$ 684,58
Taxa de Desconto	2,25%	Conta prevista	R\$ 44,01
Reajuste anual na tarifa	7,24%	Economia Mensal	R\$ 640,57

Soma VPs (Ano 1 a 20)		Financiamento BV			
VPL do Projeto	R\$ 78.495,54	Juros ao mês:		1,50%	
Taxa Interna de Retorno (TIR)	7,83%	24	36	48	60
Taxa de Lucratividade	1,47	R\$ 8.232,10	R\$ 5.968,10	R\$ 4.854,47	R\$ 4.200,65

Fonte: Próprio Autor

Figura 36: Gráfico de retorno do investimento x Anos (VAWT)



Fonte: Próprio Autor

Tabela 5 – Cálculo de retorno do investimento cenário 2 Gerador HAWT

Investimento Inicial	R\$	45.080,00	Conta Atual	R\$	684,58
Taxa de Desconto		2,25%	Conta prevista	R\$	44,01
Reajuste anual na tarifa		7,24%	Ecônomia Mensal	R\$	640,57

Período (Ano)	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	Conta sem energia solar	Conta com energia solar	Ecônomia
0	-R\$ 45.080,00	-R\$ 45.080,00	-R\$ 45.080,00	-	-	-
1	R\$ 7.686,85	R\$7.517,70	-R\$ 37.562,30	R\$ 8.215,01	R\$ 528,16	R\$ 7.686,85
2	R\$ 8.243,37	R\$7.884,58	-R\$ 29.677,73	R\$ 8.809,77	R\$ 566,40	R\$ 8.243,37
3	R\$ 8.840,19	R\$8.269,36	-R\$ 21.408,37	R\$ 9.447,60	R\$ 607,41	R\$ 8.840,19
4	R\$ 9.480,22	R\$8.672,92	-R\$ 12.735,45	R\$ 10.131,61	R\$ 651,39	R\$ 9.480,22
5	R\$ 10.166,59	R\$9.096,17	-R\$ 3.639,28	R\$ 10.865,14	R\$ 698,55	R\$ 10.166,59
6	R\$ 10.902,65	R\$9.540,09	R\$ 5.900,81	R\$ 11.651,77	R\$ 749,12	R\$ 10.902,65
7	R\$ 11.692,00	R\$10.005,66	R\$ 15.906,47	R\$ 12.495,36	R\$ 803,36	R\$ 11.692,00
8	R\$ 12.538,51	R\$10.493,96	R\$ 26.400,43	R\$ 13.400,03	R\$ 861,52	R\$ 12.538,51
9	R\$ 13.446,29	R\$11.006,08	R\$ 37.406,51	R\$ 14.370,19	R\$ 923,89	R\$ 13.446,29
10	R\$ 14.419,80	R\$11.543,20	R\$ 48.949,71	R\$ 15.410,59	R\$ 990,78	R\$ 14.419,80
11	R\$ 15.463,80	R\$12.106,53	R\$ 61.056,24	R\$ 16.526,32	R\$ 1.062,52	R\$ 15.463,80
12	R\$ 16.583,38	R\$12.697,35	R\$ 73.753,59	R\$ 17.722,82	R\$ 1.139,44	R\$ 16.583,38
13	R\$ 17.784,01	R\$13.317,01	R\$ 87.070,60	R\$ 19.005,95	R\$ 1.221,94	R\$ 17.784,01
14	R\$ 19.071,58	R\$13.966,90	R\$ 101.037,50	R\$ 20.381,98	R\$ 1.310,41	R\$ 19.071,58
15	R\$ 20.452,36	R\$14.648,52	R\$ 115.686,02	R\$ 21.857,64	R\$ 1.405,28	R\$ 20.452,36
16	R\$ 21.933,11	R\$15.363,39	R\$ 131.049,41	R\$ 23.440,13	R\$ 1.507,02	R\$ 21.933,11
17	R\$ 23.521,07	R\$16.113,16	R\$ 147.162,57	R\$ 25.137,20	R\$ 1.616,13	R\$ 23.521,07
18	R\$ 25.223,99	R\$16.899,51	R\$ 164.062,08	R\$ 26.957,13	R\$ 1.733,14	R\$ 25.223,99
19	R\$ 27.050,21	R\$17.724,24	R\$ 181.786,32	R\$ 28.908,83	R\$ 1.858,62	R\$ 27.050,21
20	R\$ 29.008,64	R\$18.589,22	R\$ 200.375,54	R\$ 31.001,83	R\$ 1.993,18	R\$ 29.008,64

Soma VPs (Ano 1 a 20)	R\$	245.455,54
VPL do Projeto	R\$	200.375,54
Taxa Interna de Retorno (TIR)		23,82%
Taxa de Lucratividade		5,44
Tempo de Payback		5,4

\* Investimento retorna em 5 anos e 5 meses.

Financiamento BV			
Juros ao mês:		1,50%	
24	36	48	60
R\$ 2.222,71	R\$ 1.611,42	R\$ 1.310,73	R\$ 1.134,20

Fonte: Próprio Autor

Figura 37: Gráfico de retorno do investimento x Anos (HAWT)



Fonte: Próprio Autor

Tabela 6 – Cálculo de retorno do investimento cenário 3 Gerador Fotovoltaico

Investimento Inicial	R\$	28.489,00	Conta Atual	R\$	684,58
Taxa de Desconto		2,25%	Conta prevista	R\$	44,01
Reajuste anual na tarifa		7,24%	Economia Mensal	R\$	640,57

Período (Ano)	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado	Conta sem energia solar	Conta com energia solar	Economia
0	-R\$ 28.489,00	-R\$ 28.489,00	-R\$ 28.489,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -
1	R\$ 7.686,85	R\$7.517,70	-R\$ 20.971,30	R\$ 8.215,01	R\$ 528,16	R\$ 7.686,85
2	R\$ 8.243,37	R\$7.884,58	-R\$ 13.086,73	R\$ 8.809,77	R\$ 566,40	R\$ 8.243,37
3	R\$ 8.840,19	R\$8.269,36	-R\$ 4.817,37	R\$ 9.447,60	R\$ 607,41	R\$ 8.840,19
4	R\$ 9.480,22	R\$8.672,92	R\$ 3.855,55	R\$ 10.131,61	R\$ 651,39	R\$ 9.480,22
5	R\$ 10.166,59	R\$9.096,17	R\$ 12.991,72	R\$ 10.865,14	R\$ 698,55	R\$ 10.166,59
6	R\$ 10.902,65	R\$9.540,09	R\$ 22.491,81	R\$ 11.651,77	R\$ 749,12	R\$ 10.902,65
7	R\$ 11.692,00	R\$10.005,66	R\$ 32.497,47	R\$ 12.495,36	R\$ 803,36	R\$ 11.692,00
8	R\$ 12.538,51	R\$10.493,96	R\$ 42.991,43	R\$ 13.400,03	R\$ 861,52	R\$ 12.538,51
9	R\$ 13.446,29	R\$11.006,08	R\$ 53.997,91	R\$ 14.370,19	R\$ 923,89	R\$ 13.446,29
10	R\$ 14.419,80	R\$11.543,20	R\$ 65.540,71	R\$ 15.410,59	R\$ 990,78	R\$ 14.419,80
11	R\$ 15.463,80	R\$12.106,53	R\$ 77.647,24	R\$ 16.526,32	R\$ 1.062,52	R\$ 15.463,80
12	R\$ 16.583,38	R\$12.697,35	R\$ 90.344,59	R\$ 17.722,82	R\$ 1.139,44	R\$ 16.583,38
13	R\$ 17.784,01	R\$13.317,01	R\$ 103.661,60	R\$ 19.005,95	R\$ 1.221,94	R\$ 17.784,01
14	R\$ 19.071,58	R\$13.966,90	R\$ 117.628,50	R\$ 20.381,98	R\$ 1.310,41	R\$ 19.071,58
15	R\$ 20.452,36	R\$14.648,52	R\$ 132.277,02	R\$ 21.857,64	R\$ 1.405,28	R\$ 20.452,36
16	R\$ 21.933,11	R\$15.363,39	R\$ 147.640,41	R\$ 23.440,13	R\$ 1.507,02	R\$ 21.933,11
17	R\$ 23.521,07	R\$16.113,16	R\$ 163.799,97	R\$ 25.137,20	R\$ 1.616,13	R\$ 23.521,07
18	R\$ 25.223,99	R\$16.899,51	R\$ 180.653,08	R\$ 26.957,13	R\$ 1.733,14	R\$ 25.223,99
19	R\$ 27.050,21	R\$17.724,24	R\$ 198.377,32	R\$ 28.908,83	R\$ 1.858,62	R\$ 27.050,21
20	R\$ 29.008,64	R\$18.589,22	R\$ 216.966,54	R\$ 31.001,83	R\$ 1.993,18	R\$ 29.008,64
21	R\$ 31.108,87	R\$19.496,41	R\$ 236.462,93	R\$ 33.246,36	R\$ 2.137,49	R\$ 31.108,87
22	R\$ 33.361,15	R\$20.447,87	R\$ 256.910,82	R\$ 35.653,40	R\$ 2.292,24	R\$ 33.361,15
23	R\$ 35.776,50	R\$21.445,77	R\$ 278.356,58	R\$ 38.234,70	R\$ 2.458,20	R\$ 35.776,50
24	R\$ 38.366,72	R\$22.492,36	R\$ 300.848,94	R\$ 41.002,89	R\$ 2.636,18	R\$ 38.366,72
25	R\$ 41.144,47	R\$23.590,03	R\$ 324.438,98	R\$ 43.971,50	R\$ 2.827,03	R\$ 41.144,47

Soma VPs (Ano 1 a 20)	R\$ 352.927,98
VPL do Projeto	R\$ 324.438,98
Taxa Interna de Retorno (TIR)	34,12%
Taxa de Lucratividade	12,39
Tempo de Payback	3,6

\* Investimento retorna em 3 anos e 7 meses.

Financiamento BV				
Juros ao mês:		1,50%		
24	36	48	60	
R\$ 1.404,67	R\$ 1.018,36	R\$ 828,34	R\$ 716,77	

Fonte: Próprio Autor

Figura 38: Gráfico de retorno do investimento x Anos (SOLAR)

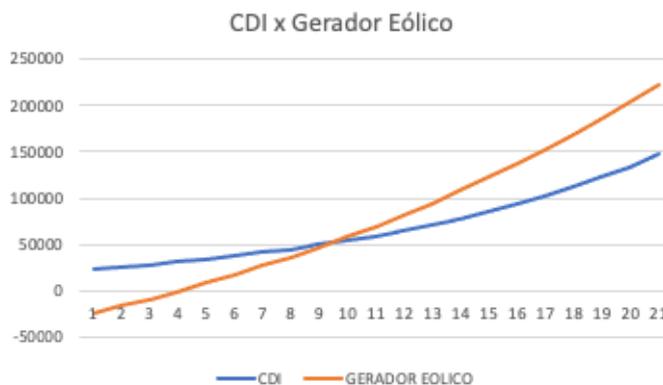


Fonte: Próprio Autor

Conforme os dados apresentados nas tabelas e figuras acima vemos que o gerador fotovoltaico a longo prazo se mostra financeiramente mais atrativo que as opções com aerogeradores, pois sua vida útil é superior a vida útil dos aerogeradores em 5 anos, garantindo um VPL cerca de 40% maior que o sistema de microgeração com HAWT.

Para comparativo de retorno do investimento, representado na Figura 39 considerou-se o valor CDI médio anual dos últimos 13 anos que foi de 9,47 estimando-se um retorno do investimento em 20 anos de 146.837,00 reais, sendo assim o sistema com gerador eólico pode-se atingir uma rentabilidade de cerca de 100.000,00 a mais na comparação com CDI, sabendo-se que o retorno é de 245.455,54 conforme apresentado na tabela 5.

Figura 39: Gráfico comparativo de investimento



Fonte: Próprio Autor

## 6. CONCLUSÃO

Diante do exposto neste trabalho é possível concluir que embora não seja muito difundida a microgeração eólica é viável, mas para o local de estudo não é financeiramente competitiva no comparativo com sistemas fotovoltaicos.

Sendo assim, conclui-se que para o local de estudo utilizar geradores eólicos para microgeração é financeiramente menos atrativo se comparado a geradores fotovoltaicos, porém é viável se utilizado aerogeradores do tipo HAWT, ainda que apresente payback e retorno de investimento inferiores aos alcançados com a geração fotovoltaica.

Este trabalho contribui com uma revisão bibliográfica sobre a energia eólica, e demonstrando que o sistema eólica para microgeração embora não seja muito difundido é uma forma viável de geração de energia elétrica.

### 6.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros podem ser desenvolvidas análises mais profundas considerando locais onde a incidência de irradiação solar não seja elevada como é o caso do nordeste, mas que se tenha uma velocidade média anual de ventos mais propícia a geração eólica.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, O. A. C. do; ZACK, J.; BROWER, M.; De Sá, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2001. 44 p.

Atlas eólico do potencial brasileiro – simulação 2013 Disponível em: <<http://novoatlas.cepel.br/wp-content/uploads/2017/03/1.MapasTematicos-Velocidade30m.pdf>> Acesso em: 15 jan. 2021.

Atmosfera: Os principais fenômenos que influenciam o clima. Disponível em: <<https://guiadoestudante.abril.com.br/curso-enem-play/atmosfera-meteorologia-os-principais-fenomenos-que-influenciam-o-clima/>> Acesso em: 20 dez. 2020.

BATISTA, N. A. M da C. **Novo aerogerador de eixo vertical integrada numa rede inteligente em contexto urbano**. 2013. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Évora, Évora. 2013

BBC BRASIL. **Veja como está Chernobyl, 30 anos após pior acidente nuclear da história**. Disponível em: <[https://www.bbc.com/portuguese/internacional/2016/04/160426\\_chernobyl\\_ucrania\\_aniversario\\_imagens\\_fd](https://www.bbc.com/portuguese/internacional/2016/04/160426_chernobyl_ucrania_aniversario_imagens_fd)> Acesso em: 25 nov. 2020.

Boletim Anual de Geração 2017. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>> Acesso em: 12 fev. 2021.

Boletim Anual de Geração Eólica 2018. Disponível em: <[http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual\\_2018.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf)> Acesso em: 07 jan. 2021.

Boletim Anual de Geração Eólica 2019. Disponível em: <[http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/PT\\_Boletim-Anual-de-Geracao-2019.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/PT_Boletim-Anual-de-Geracao-2019.pdf)> Acesso em: 07 jan. 2021.

BRITO, S. S., **Energia eólica princípios e tecnologia**, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Equipe CEPEL/CRESESB, 2008.

CDI Histórico. Disponível em: <<https://informederendimentos.com/indice-financeiro/cdi/>> Acesso em: 5 abr. 2021.

COSTA, Karen Maia da, **Reutilização de plataformas fixas para geração de energia eólica Offshore**/ Karen Maia da Costa. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018.

CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=211](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=211)> Acesso em: 25 nov. 2020.

Dados mercado. Disponível em: < <http://www.abgd.com.br/portal/dados-mercado/>> Acesso em: 25 30 mar. 2021.

Datasheet Zeus 3.0. Disponível em:<<https://drive.google.com/file/d/1h2YDdp8rTBlsbe1lt9nKjGOqKfk7jYq3/view>> Acesso em: 28 mar. 2021.

Energia Eólica. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/energia-eolica/>> Acesso em: 25 nov. 2020.

Empresas de energia renováveis vão contratar 340 mil pessoas no Brasil. Disponível em: < <https://www.absolar.org.br/noticia/empresas-de-energias-renovaveis-vao-contratar-340-mil-pessoas-no-brasil/>> Acesso em: 20 mar. 2021.

Escala de Beaufort. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Escala\\_de\\_Beaufort](https://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Beaufort)> Acesso em: 20 mar. 2021.

FADIGAS, Eliane A.F. **Energia eólica**. Barueri-SP 2011

FERREIRA JÚNIOR, J. B. M.; **Projeto de um aerogerador vertical de pequeno porte para aplicação em habitações populares em centros urbanos**. 2016. 67 f. – UFRJ – Escola Politécnica, Rio de Janeiro. 2016

Geração de energia elétrica renovável eólica. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/plugin-file.php/4150883/mod\\_resource/content/1/AULA\\_01\\_Salles\\_2017.pdf](https://edisciplinas.usp.br/plugin-file.php/4150883/mod_resource/content/1/AULA_01_Salles_2017.pdf)> Acesso em: 20 dez. 2020.

Gerador fotovoltaico. Disponível em: < <https://www.aldo.com.br/produto/108719-0/gerador-de-energia-solar-growatt-colonial-solar-group-aldo-solar-on-grid-gf-6kwp-trina-mono-perc-half-cell-375w-min-5kw-2mppt-mono-220v>> Acesso em: 20 mar. 2021.

História da Energia Eólica. Disponível em: < <https://energes.com.br/fale-energes/historia-da-energia-eolica/> > Acesso em: 25 nov. 2020.

História da Energia Eólica e suas utilizações. Disponível em: < [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=tutorial\\_eolica](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_eolica) > Acesso em: 25 nov. 2020.

Inversor de rede solar e eólica. Disponível em: <<https://www.tesup.com.br/product-page/inversor-de-rede-solar-e-eolica>> Acesso em: 25 mar. 2021.

Mapas Temáticos. Disponível em: <<http://novoatlas.cepel.br/index.php/mapas-tematicos/>> Acesso em: 20 fev. 2021.

Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> > Acesso em: 25 mar. 2021.

MÜLLER, Matheus do Nascimento. **Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal**/ Matheus do Nascimento Müller – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

NOVELLI, Thiago de Abreu e Lima. **Projeto de um protótipo de uma turbina eólica de eixo horizontal** / Thiago Novelli de Abreu e Lima – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

Novo atlas do potencial eólico Brasileiro <[https://www.observatoriodocarvao.org.br/wp-content/uploads/2020/01/Novo-Atlas-do-Potencial-Eolico-Brasileiro-SIM\\_2013.pdf](https://www.observatoriodocarvao.org.br/wp-content/uploads/2020/01/Novo-Atlas-do-Potencial-Eolico-Brasileiro-SIM_2013.pdf)> Acesso em: 20 fev. 2021.

PEREIRA, M. G.; MONTEZANO, B. E. M.; DUTRA, R. M. **Mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil: percepção do potencial consumidor**. In: BRAZIL WINDPOWER, 6. 2015, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: ABEEólica, 2015. p 10.

ALVES, Kauê Ramai Moura. **Projeto mecânico de um aerogerador darrieus para geração residencial de energia em ambiente urbano** / Kauê Ramai Moura Alves – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018.

RAHMEIER, Rubem Anderson Schmit. **Desenvolvimento de uma turbine eólica de eixo vertical tipo H**. 2015. 70 p. – UNIPAMPA – Universidade Federal Do Pampa, Bagé, 2015.

Ruptura de represa no Laos deixa 26 mortos e mais de 130 desaparecidos. Disponível em: <<https://exame.com/mundo/desastre-no-laos-deixa-19-mortos-e-3-mil-precisam-ser-resgatados-diz-midia/>> Acesso em 25 de novembro de 2020.

TABARES, H. G.; FILHO, A. J. S., BELATI E. A.. **Controle direto de torque aplicado à aerogeradores de junção com rotor bobinado. simpósio brasileiro de sistemas elétricos – SBSE.** Abril 2014.

Turbina Eólica de ATLAS2.0. Disponível em: <<https://www.tesup.com.br/product-page/turbina-eolica-de-tesup-atlas2-2kw-brasil>> Acesso em 20 de março de 2021.

Turbina Eólica de ZEUS3.0. Disponível em: <<https://www.tesup.com.br/product-page/zeus3-vento-turbina-gerador-carregador-12v-24v-48v-casa-amazon-brasil>> Acesso em 28 de março de 2021.

User manual Atlas 2.0. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1O4AUv9Pz2WI13LLYLFsdWxm13X28xQ8X/view>> Acesso em 25 de março de 2021.

User manual Zeus 3.0. Disponível em: <[https://drive.google.com/file/d/1eHIu1yJW\\_nzQ3RrRG39d2KFJDOfdVcIe/view](https://drive.google.com/file/d/1eHIu1yJW_nzQ3RrRG39d2KFJDOfdVcIe/view)> Acesso em 28 de março de 2021.

Usinas termoeletricas causam muitos danos ao ambiente e ao país, artigo de Ernani Sartori. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2008/08/16/usinas-termoeletricas-causam-muitos-danos-ao-ambiente-e-ao-pais-artigo-de-ernani-sartori/>> Acesso em 15 de abril de 2021.

Vantagens e desvantagens da energia eólica. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-da-energia-eolica/>> Acesso em 15 de abril de 2021.