

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIOGO TADASHI MAGRI HAYAKAWA  
LENA CHAGAS

**UTILIZAÇÃO DE AEROGERADOR PARA SUPRIMENTO DE ENERGIA EM  
PEQUENA PROPRIEDADE RURAL NO ESTADO DO PARANÁ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

DIOGO TADASHI MAGRI HAYAKAWA  
LENA CHAGAS

**UTILIZAÇÃO DE AEROGERADOR PARA SUPRIMENTO DE ENERGIA EM  
PEQUENA PROPRIEDADE RURAL NO ESTADO DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de “Engenheiro Eletricista”.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cicero Fritzen.

CURITIBA  
2019

Diogo Tadashi Magri Hayakawa  
Lena Chagas

## Utilização de Aerogerador para Suprimento de Energia em Pequena Propriedade Rural no Estado do Paraná

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 03 de julho de 2019.

---

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Ma.  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Paulo Cicero Fritzen, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Paulo Cicero Fritzen, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Nastasha Salame da Silva, Dra.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Annemarle Gehrke Castagna, Ma.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## RESUMO

HAYAKAWA, Diogo; CHAGAS, Lena. **Utilização de Aerogerador para Suprimento de Energia em Pequena Propriedade Rural no Estado do Paraná**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

As condições climáticas do Brasil apresentam uma potencialidade para uso da energia eólica, ocupando o segundo lugar em relevância na matriz elétrica do país, sendo uma alternativa para a energia hidrelétrica. Nesse sentido, este trabalho acadêmico tem como objetivo geral estudar e verificar as condições para a implantação de uma turbina de energia eólica em uma propriedade rural do Paraná, que será definida de acordo com informações de potencial eólico e economia do local, a fim de apurar a possibilidade de se beneficiar desta fonte energética. Como metodologia foi realizada uma pesquisa no município de Castro, Estado do Paraná, fazendo inicialmente um estudo da região para seleção da propriedade a ser estudada. Ao selecionar a propriedade, foi realizado um levantamento dos equipamentos e então realizado um estudo de carga e demanda de energia elétrica na propriedade. Contou-se ainda com uma análise dos ventos para que se pudesse, a partir da demanda energética e desse potencial, escolher o aerogerador mais adequado. Com a possibilidade de escolha entre três geradores ainda contou-se com uma análise da viabilidade econômica e financeira, considerando o valor de investimento e tempo de retorno de cada aerogerador. Os resultados verificados neste estudo demonstraram que os custos demandados para implantação de um aerogerador na propriedade em análise traria a relação custo/benefício. Nesse contexto, ao final deste estudo foi possível verificar a se uso da energia eólica em uma propriedade rural produtora de leite localizada no município de Castro, no Paraná, era viável ou não.

**Palavras-Chave:** Energia Eólica. Propriedade Rural. Aerogerador. Agropecuária Leiteira

## ABSTRACT

HAYAKAWA, Diogo; CHAGAS, Lena. **Use of Wind Turbine for Energy Supply in Small Rural Property in the State of Paraná.** 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

The climatic conditions of Brazil presents potential to use wind energy, occupying the second place in relevance in the country's electrical matrix, being an alternative to the hydroelectric energy. In this sense, this academic work had as general objective to study and verify the conditions for implanting a wind turbine power in a rural property of Paraná, which will be defined accordingly to information of wind potential and economy of the place, in order to determine if it can benefit from this energy potential. As a methodology, field research was carried out in the city of Castro, Paraná State, initially doing a study of the region to select the property to be carried out the research. After selecting the property, a survey of equipment was carried out and load and demand of electric energy study was carried out. There was also an analysis of potential so that it could be based on the energy demand and from this potential to choose the most appropriate wind turbine. With the possibility of choosing between three generators, an economic and financial feasibility analysis was also considered, taking in account the investment value and return time of each wind turbine. The results verified in this study showed that the costs demanded for implantation of a wind turbine in the selected property would bring the cost/benefit relation. In this context, at the end of this study, it was possible to verify the feasibility of using wind energy in a rural dairy farm located in the municipality of Castro, Paraná, highlighting the climatic capacity of the city, as well as the feasibility of investment.

**Keywords:** Wind Energy. Rural property. Wind turbine. Dairy Farm.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Turbina Charles F. Bush.....	16
Figura 2 - Turbina Balaclava.....	17
Figura 3 - Turbinas Savonius e Darrieus .....	19
Figura 4 - Turbina Darrieus.....	19
Figura 5 - Variações da turbina Darrieus.....	20
Figura 6 - Turbina Savonius .....	21
Figura 7 - Aproveitamento eólico mundial .....	24
Figura 8 - Recurso eólico brasileiro .....	25
Figura 9 - Recurso eólico do estado do Paraná .....	26
Figura 10 – Aproximação de “ $CP$ ” para valores de “ $\lambda$ ” e ângulos “ $\beta$ ” .....	29
Figura 11 - Moinho localizado na cidade de Castrolanda.....	35
Figura 12 - Ponto central estimado da área dos campos de Castro/Tibagi .....	41
Figura 13 - Distribuição de Weibull sazonal para altura de 50m.....	43
Figura 14 - Distribuição de Weibull anual para altura de 50m .....	43
Figura 15 - Distribuição de Weibull para alturas de 50m e 20m .....	45
Figura 16 - Curva de potência do aerogerador Notus 138 .....	48
Figura 17 - Curva de potência do aerogerador Gerar 246.....	48
Figura 18 - Curva de potência do aerogerador Verne 555 .....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Projeção do Consumo de Energia Elétrica na Rede 2017 – 2021 .....	10
Tabela 2 - Composição Setorial do Consumo de Eletricidade.....	10
Tabela 3 - Energia Eólica no Brasil .....	11
Tabela 4 - Valor adicionado bruto a preços básicos segundo os ramos de atividades .	35
Tabela 5 - Estabelecimentos que possuem tanque de resfriamento por região .....	37
Tabela 6 - Cargas instaladas do estudo de caso.....	38
Tabela 7 – Tempo de uso das cargas instaladas .....	39
Tabela 8 - Dados de consumo mensal e diário do estudo de caso .....	40
Tabela 9 - Dados de potencial eólico na região dos Campos de Castro/Tibagi .....	42
Tabela 10 - Distribuições de Weibull dos ventos .....	42
Tabela 11 - Distribuição de Weibull para alturas de 50m e 20m .....	44
Tabela 12 – Consumo da Produção de Leite .....	46
Tabela 13 - Dados de diferentes modelos de aerogeradores de pequeno porte.....	47
Tabela 14 – Produções de Energia Anual de diferentes aerogeradores .....	50
Tabela 15 – Fatores de Capacidade e relações de R\$/kWh dos aerogeradores .....	51
Tabela 16 – Razões de Preço entre geradores .....	51
Tabela 17 – Razões de Geração entre geradores.....	51
Tabela 18 – Reajustes de tarifas .....	52
Tabela 19 – Economia de Energia .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
BIG	Banco de Informações de Geração
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> (Turbina Eólica de Eixo Horizontal)
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
kWh	Kilowatt hora
MW	Megawatts
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PROINFA	Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SEAB	Secretaria da Agricultura e Abastecimento
SEP	Sistema Elétrico de Potência
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i> (Turbina Eólica de Eixo Vertical)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	TEMA.....	9
1.1.1	Delimitação Do Tema .....	9
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS .....	12
1.3	OBJETIVOS.....	12
1.4	JUSTIFICATIVA.....	13
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	13
<b>2</b>	<b>ENERGIA EÓLICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	HISTÓRICO.....	15
2.2	TECNOLOGIAS.....	18
2.2.1	Rotor de Eixo Vertical .....	18
2.2.2	Rotor de Eixo Horizontal .....	21
2.3	RECURSO EÓLICO .....	23
2.4	ENERGIA E POTÊNCIA DOS VENTOS .....	27
2.5	ANÁLISE PROBABILÍSTICA DOS VENTOS.....	30
2.6	EXTRAPOLAÇÃO DE VELOCIDADE DO VENTO.....	30
2.7	PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA .....	32
2.8	FATOR DE CAPACIDADE .....	32
<b>3</b>	<b>ESTUDO DA REGIÃO E DE CARGA .....</b>	<b>34</b>
3.1	O MUNICÍPIO DE CASTRO .....	34
3.2	PANORAMA DA AGROPECUÁRIA LEITEIRA.....	36
3.3	EQUIPAMENTOS EM UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE LEITE .....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

Um sistema elétrico de potência (SEP) é, essencialmente, um conjunto de equipamentos que podem ser categorizados entre geração, transmissão e distribuição (STEVENSON, 1974).

A energia hidráulica, é predominante na matriz energética brasileira, pois gera 60,22% da energia elétrica nacional (ANEEL, 2018). Este tipo de geração de energia utiliza uma fonte de energia renovável, ou seja, que é provida pela natureza e é naturalmente reabastecida com o tempo, além disso é também um tipo de fonte de energia considerada limpa pois não possui emissão significativa de gases poluentes na atmosfera (TOLMASQUIM, 2003).

Entretanto, mesmo sendo um método de geração limpo, a geração hidrelétrica provoca discussões, como visto mais recentemente no caso da usina de Belo Monte em que houve grande repercussão devido aos impactos sociais, ambientais, econômicos e políticos causados por sua construção (SANTOS, 2012). Além disso, estiagens de longos períodos podem afetar a segurança energética do país.

Sendo assim, tem se buscado no Brasil outras possibilidades de geração de energia, sendo uma das fontes alternativas a energia eólica, que nas últimas décadas tem aumentado significativamente, fornecendo atualmente 8,11% de capacidade de geração na matriz energética brasileira.

Nesse trabalho serão estudados o aproveitamento e a viabilidade de energia eólica em uma propriedade rural no Paraná.

### 1.1.1 Delimitação Do Tema

A qualidade de vida de uma sociedade está intimamente ligada ao seu consumo de energia (GOLDEMBERG, LUCON, 2008). Portanto, a energia elétrica, que já se tornou um recurso fundamental na vida do ser humano, é hoje a forma de energia mais utilizada atualmente e deve continuar crescendo nos próximos anos. A

demanda de energia elétrica brasileira deverá crescer a uma taxa média de 3,3%, como mostra a Tabela 1:

**Tabela 1 - Projeção do Consumo de Energia Elétrica na Rede 2017 – 2021**

CONSUMO	2017	2018	2019	2020	2021	Δ% 2017- 2021
<b>TOTAL</b>	467.207	481.470	496.845	514.851	537.485	3,3%
<i>Projeção por classe de consumo</i>						
<b>Residencial</b>	134.803	139.510	144.506	150.334	156.488	3,8%
<b>Industrial</b>	166.467	170.200	174.112	178.931	187.633	3,0%
<b>Comercial</b>	89.535	92.624	96.161	100.153	104.338	3,9%
<b>Outras Classes</b>	76.402	79.136	82.067	85.433	89.025	3,9%

Fonte: NOTA TÉCNICA DEA 10/17 (2017).

O setor industrial, neste gráfico se encontra em “Outros” e é fundamental especialmente no Paraná onde é um dos segmentos que mais apresentam resultados crescentes na economia do estado. A agropecuária do Paraná também teve no ano de 2017 o melhor desempenho em quatro anos, correspondendo por 9,8% do PIB do Estado em 2017. No Brasil, o setor primário respondeu por 5,3%” (IPARDES, 2018).

Esse crescimento é observado também na tabela 2, que apresenta o consumo de eletricidade por setor onde, além disso, observa-se que a agropecuária é uma fatia considerável no mesmo assunto.

**Tabela 2 - Composição Setorial do Consumo de Eletricidade**

SETORES	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>CONSUMO FINAL (10<sup>3</sup> tep)</b>	35.44	36.82	36.63	39.96	41.36	42.86	44.37	46.00	46.09	44.70
<b>SETOR ENERGÉTICO</b>	3	9	8	4	3	1	3	5	6	5
<b>RESIDENCIAL</b>	4,2	4,3	4,3	5,8	5,0	5,3	5,8	5,8	6,1	5,7
<b>COMERCIAL</b>	22,1	22,3	23,6	23,1	23,3	23,6	24,2	24,7	25,0	25,6
<b>PÚBLICO</b>	14,2	14,6	15,5	15,0	15,4	16,0	16,4	16,9	17,4	17,2
<b>AGROPECUÁRIO</b>	8,2	8,1	8,3	8,0	7,9	8,0	8,0	8,5	8,3	8,3
<b>TRANSPORTES</b>	4,3	4,3	4,2	4,1	4,5	4,6	4,6	5,0	5,1	5,3
<b>INDUSTRIAL</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>TOTAL</b>	46,7	46,1	43,8	43,8	43,5	42,1	40,7	38,7	37,7	37,6
<b>TOTAL</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: BEN (2017).

A partir desse aumento no consumo de energia elétrica, inclusive na área rural, surge a preocupação com a forma de geração que poderá suprir esta demanda, uma vez que a base energética mundial do desenvolvimento do século XX (carvão, petróleo e gás) enfrenta o problema de exaustão (PEREIRA, GOLDEMBERG, 2010). Como alternativa a isso, surgiram as fontes renováveis de energia, que já representam 81,7% da matriz energética brasileira (BEN, 2017).

A implementação de energias renováveis apresenta um aspecto positivo principalmente para os países em desenvolvimento, como o Brasil, que devem ampliar sua capacidade de geração em busca de expansão.

Um tipo de energia que apresenta evolução contínua em números de geração e consumo é a energia eólica, conforme pode ser visto na Tabela 3 a seguir:

**Tabela 3 - Energia Eólica no Brasil**

FLUXO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
GERAÇÃO TOTAL	663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	12.210	21.626	33.489
CONSUMO TOTAL	663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	12.210	21.626	33.489

Fonte: BEN (2017).

Sendo proveniente da velocidade de movimentação do vento, a energia eólica aproveita-se da conversão dessa energia cinética rotativa para energia elétrica. Esta conversão é realizada utilizando-se de turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores (SGUAREZI FILHO, CARDOSO, 2014).

Este tipo de energia possui diversas vantagens, entre elas o fato de ser uma fonte renovável, limpa e disponível em muitas localidades. Porém, para sua implementação deve-se considerar as condições climáticas, o regime dos ventos na região, a umidade, a pressão e outros aspectos do local a ser instalado a turbina geradora.

Neste trabalho foram abordados os estudos sobre a implementação deste tipo de energia no ambiente rural do Paraná para que propriedades nestas áreas possam se beneficiar do potencial eólico para pequena geração.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

As propriedades rurais tendem a demonstrar crescimento ao se automatizar, ou seja, aumentar sua produtividade com o uso de equipamentos que substituem o trabalho manual ou que elevem a capacidade de produção.

Nesse contexto, o consumo de carga e conseqüentemente suas despesas com energia também apresentarão um aumento. Este estudo visou estudar a viabilidade econômica ao instalar um mecanismo que gere energia para suprir o consumo proveniente do investimento tecnológico que é feito neste tipo de propriedade.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Estudar e verificar as condições para a implantação de uma turbina de energia eólica em uma propriedade rural do Paraná, que foi definida de acordo com informações de potencial eólico e economia do local, a fim de apurar se esta pode se beneficiar deste potencial energético.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar pesquisa sobre as propriedades rurais no Paraná;
- Analisar os aspectos ambientais e climáticos do estado pertinentes a implementação de energia eólica para geração de eletricidade;
- Definir o tipo de propriedade que melhor irá aproveitar o potencial eólico na sua região de acordo com suas necessidades;
- Realizar estudo de cargas em diferentes estações do ano na propriedade escolhida;
- Averiguar modelos de aerogeradores existentes no mercado que atendem às necessidades discutidas e definir o mais adequado para a propriedade;
- Analisar a viabilidade técnica e rentabilidade da implementação.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A participação hídrica na capacidade instalada no Brasil é de 64,5% (BEN, 2017). Tal recurso, considerado uma fonte renovável, está sujeito à escassez se não houver utilização consciente e preservação do mesmo, no entanto o que se vê é a poluição e o consumo inconsequente.

O estudo “Brasil 2040 – Alternativas de Adaptação às Mudanças Climáticas”, encomendado pela Secretaria de Estudos Estratégicos da Presidência da República traz más notícias para o atual sistema energético brasileiro. Ele revelou que, em todos os cenários, o Brasil de 2040 será um país mais quente e mais seco, e o primeiro efeito disso é uma redução na vazão dos rios que abastecem a maior parte da população brasileira, o fator de capacidade (quantidade de energia constante gerada ao longo do ano) das hidrelétricas está comprometido, tornando necessário que novos tipos de geração sejam considerados e adotados.

A ampliação da capacidade de gerar energia elétrica a partir da fonte eólica no Brasil foi iniciada em 2002, com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Este programa estimulou o desenvolvimento de fontes alternativas de energia destinadas a diversificar a matriz energética do país, onde garantiu-se 1.423 MW apenas para projetos de geração eólica-elétrica (CEBOLO, 2005).

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi desenvolvido com base em uma propriedade rural específica, escolhida onde, primeiramente foram analisados os dados eólicos do Paraná, em seguida os dados econômicos do local com forte potencial eólico e finalmente a partir do estudo de cargas e análise dos modelos de aerogeradores foi verificado a viabilidade de instalar um sistema com a finalidade de utilizar o potencial eólico para geração de energia elétrica que beneficiasse a propriedade.

Foram considerados dois parâmetros importantes para fins de análise eólica. O primeiro parâmetro foi a velocidade e o segundo, a direção do vento, ambos são estudados a partir de dados obtidos anteriormente na região. A relação de cargas

existentes na propriedade é a segunda análise observada, a fim de determinar a potência a ser suprida pela propriedade escolhida.

Em seguida estabeleceu-se o melhor modelo de aerogerador existente no mercado que para a transformação do potencial eólico em energia elétrica propriamente dita, de acordo com as particularidades da região e da propriedade.

Finalmente, uma conclusão da viabilidade técnica foi apresentada, mostrando os resultados dos estudos realizados neste trabalho.

## 2 ENERGIA EÓLICA

Primordialmente, extraída da lenha para o aquecimento e outras atividades domésticas, a energia sempre foi fundamental na vida humana e, conforme a sociedade se desenvolvia, surgiu a necessidade de aprimorar o modo como ela era obtida da natureza. A utilização da água e dos ventos na idade média, assim como o carvão e o gás durante a revolução industrial, são exemplos de como a humanidade sempre buscou obter energia por diferentes meios conforme suas necessidades aumentavam.

Entretanto, a preocupação atual vai além da geração energética. Sabe-se que a maior parte dos danos ao meio ambiente são provenientes da obtenção de energia e nunca se observou uma responsabilidade tão acentuada em preservar as fontes energéticas a fim de evitar danos e preservar recursos como se observa atualmente (GOLDEMBERG, LUCON, 2007).

O cuidado com o meio ambiente é um dos cuidados necessários para se obter energia. Portanto, é preciso cada vez mais buscar por fontes de energia renováveis, expressão utilizada para descrever uma ampla gama de fontes de energia que são disponibilizadas na natureza de forma cíclica (COSTA, PRATES, 2005).

A energia eólica, seu histórico, seus fatores influenciadores, os recursos nacionais, sua potência e capacidade de geração e outros assuntos relacionados são então o objetivo de estudo deste capítulo.

### 2.1 HISTÓRICO

O início da utilização das forças do vento é incerto, uma vez que há muitos anos elas já eram utilizadas para produzir trabalho. O que se sabe é que em várias regiões da Europa, principalmente na Holanda durante o século XIV os moinhos já eram amplamente utilizados para diversas atividades como moagem de grãos, bombeamento de água, corte de madeira e auxiliar na produção de óleos vegetais, papel entre outros. Estes moinhos foram entrando em desuso gradualmente com a expansão das máquinas a vapor no século e no início do século XX. Sabe-se que

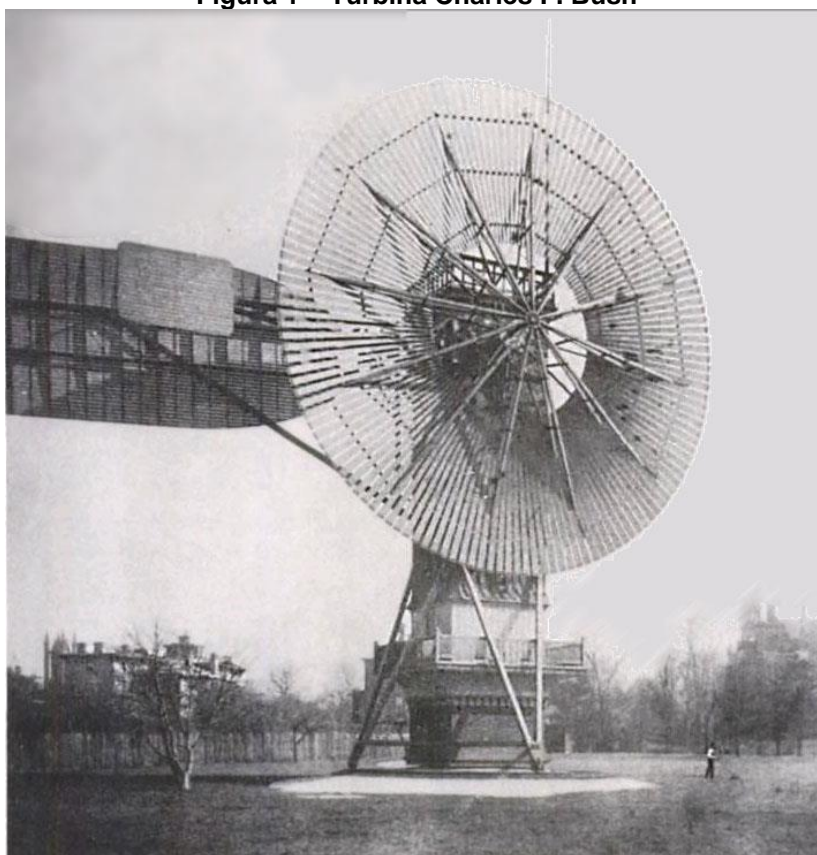


existiam apenas 2500 moinhos de ventos em operação, caindo para menos de 1000 no ano de 1960 (CHESF-BRASCEP, 1987).

Nos EUA, desde a metade do século XIX, logo após da abolição da escravatura, houve uma extensa disseminação da utilização do cata-vento multipás para bombeamento de água em sedes de fazendas isoladas e para abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas (CHESF-BRASCEP, 1987).

Foi então o estadunidense Charles Francis Brush que implantou o primeiro gerador de eletricidade com base na energia do vento, mostrado na Figura 1 a seguir:

**Figura 1 – Turbina Charles F. Brush**



**Fonte: RESENDE (2011).**

Este gerador tratava-se de um “cata-vento” que fornecia 12 kW em corrente contínua para carregamento de baterias, as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes. Os aerogeradores desta categoria, facilitaram a chegada da energia elétrica na região rural dos EUA, mas novamente foram gradualmente entrando em desuso enquanto as redes de eletrificação dominavam o atendimento rural (PINTO, 2013).

Posteriormente, a primeira tentativa bem-sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada à uma usina termelétrica ocorreu na Rússia, através do aerogerador Balaclava, como mostrado na Figura 2. Este era um modelo avançado de 100 kW de potência, conectado à uma usina termoelétrica de 20 MW por uma linha de transmissão que possuía tensão de 6,3kV e extensão de 30km (PINTO, 2013).

**Figura 2 - Turbina Balaclava**



**Fonte: RESENDE (2011).**

As turbinas eólicas modernas, como são conhecidas atualmente, começaram a surgir devido ao crescimento dos esforços para economizar combustíveis fósseis após a segunda guerra mundial em meados de 1955, na Alemanha, onde várias pesquisas em torno deste tema foram realizadas. Inclusive, uma delas, em conjunto com o Instituto de Pesquisa Aeroespacial do Brasil que acabou no desenvolvimento da turbina DEBRA 100kW (AMARANTE, 2001).

O aproveitamento eólico-elétrico atingiu então uma escala de contribuição mais significativa a partir dos anos de 1990, onde experiências que estimularam tal utilização foram realizadas na Califórnia, Dinamarca e Alemanha, se expandindo

posteriormente para o mundo todo. Desde então, esta tecnologia vem crescendo exponencialmente e se aperfeiçoando cada vez mais no decorrer da história.

## 2.2 TECNOLOGIAS

Existem inúmeras tecnologias para o aproveitamento da energia eólica, e estas são classificadas em dois grupos: as Turbinas de Eixo Vertical e Turbinas de Eixo Horizontal (SGUAREZI FILHO, CARDOSO, 2014).

No primeiro grupo a energia do vento é aproveitada sem a necessidade de alterar a posição do rotor, já que ele não gira no sentido do vento. Enquanto isso, no segundo grupo, o funcionamento é muito parecido com o de moinhos de ventos (CASTRO, 2009).

As principais características dos dois grupos, suas vantagens, desvantagens e outras informações acerca das tecnologias de aproveitamento do vento são apresentadas em sequência.

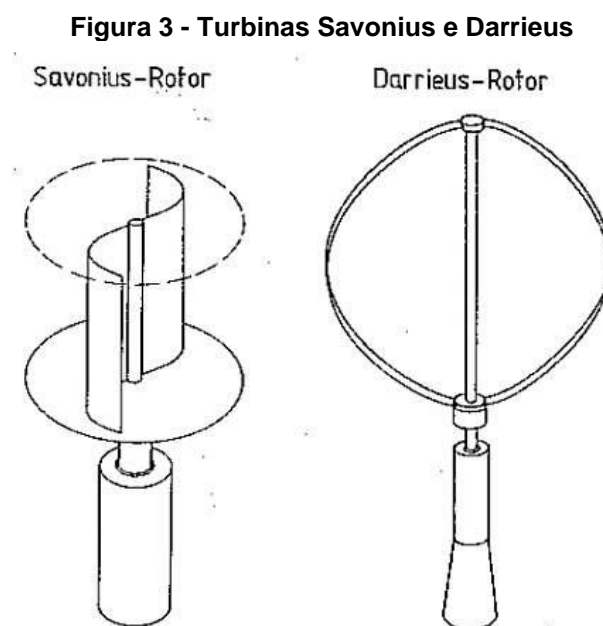
### 2.2.1 Rotor de Eixo Vertical

As turbinas eólicas de eixo vertical (*Vertical Axis Wind Turbine*, ou VAWT) são recomendadas para áreas urbanas devido a seu pequeno porte e baixo ruído.

Por possuírem um eixo simplificado, nas VAWT temos a presença de menos componentes se comparado às HAWT, a captação de tração não é feita no sentido do vento e, portanto, não há a necessidade de um direcionador para acompanhar o fluxo (CRESESB, 2008).

Além disso, a manutenção não é realizada em altas torres, havendo assim maior segurança para a equipe de manutenção que realizam as operações. Entretanto, sua eficiência está abaixo da eficiência dos rotores de eixo horizontal e seu custo de manutenção é mais elevado, já que o vento age de forma mais turbulenta neste grupo (CRESESB, 2008).

A Figura 3 mostra dois modelos que são chamados de tipos básicos de VAWT: as turbinas Darrieus e as turbinas Savonius.



Fonte: KUMARA (2017).

A partir de duas ou três lâminas curvas e atadas pelas pontas ao eixo vertical de uma forma aerodinâmica, a turbina do tipo Darrieus é movida por forças de sustentação e tem pequena área de contato com o vento (DA SILVA, 2014). A Figura 4 mostra um exemplo de uma turbina do tipo Darrieus, instalada em um parque eólico localizado no Canadá.

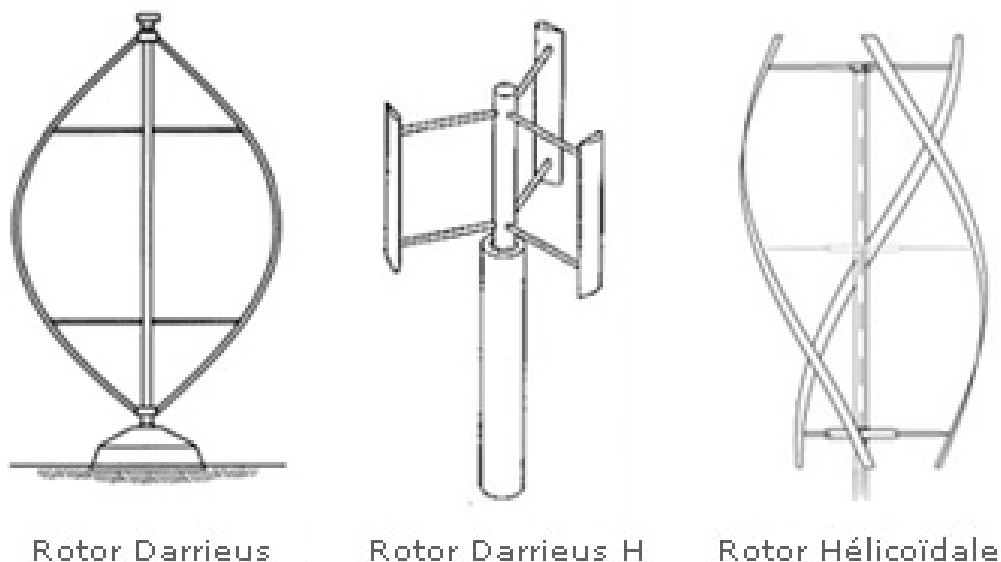
**Figura 4 - Turbina Darrieus**



Fonte: ECOSOURCES (2018).

Existem também variações deste tipo de turbina, onde as lâminas não são curvas ou são instaladas de forma helicoidal, como mostra a Figura 5 abaixo:

**Figura 5 - Variações da turbina Darrieus**



**Fonte: ECOSOURCES (2018).**

Outro tipo de turbina de eixo vertical é a turbina Savonius. Este tipo de turbina opera de maneira em que, a partir de duas ou três conchas em formato de “S”, suas pás se movimentam através das forças de arrasto. Devido a este funcionamento, este tipo de turbina necessita de uma maior área de contato. Conseqüentemente, ocorre uma maior dissipação de potência a partir de sua estrutura (DA SILVA, 2014).

A Figura 6 a seguir mostra um exemplo de turbina do tipo Savonius onde nota-se a sua estrutura de conchas em formato de “S”:

**Figura 6 - Turbina Savonius**



**Fonte: ARCHIEXPO (2018).**

### 2.2.2 Rotor de Eixo Horizontal

As turbinas eólicas de eixo horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*, ou HAWT) se encontram na categoria mais utilizada comercialmente devido a sua maior eficiência, sendo implantadas na maioria dos parques eólicos do Brasil e do mundo (ALVES, 2018).

Constituídas por pás e contrapeso, são movidas pelas forças do vento que atuam sobre elas de forma perpendicular, havendo a necessidade de um mecanismo de controle de direção que garanta esta perpendicularidade (ALVES, 2018). São instaladas em torres e, portanto, possibilitam a captação de ventos com maiores velocidades e com disponibilidade mais constante, mas podem produzir poluição

visual e sonora. Além disso, em velocidades demasiadas altas podem necessitar de um freio mecânico a fim de não comprometer seus componentes.

### 2.2.2.1 Componentes dos HAWT

Devido à ampla variedade de aplicações e demandas, um aerogerador de eixo horizontal pode possuir diversas configurações, como tamanho (com geradores de pequeno a grande porte), tipo de gerador elétrico (assíncrono ou síncrono, ímãs permanentes ou rotor bobinado), tipo de sistema (isolado, híbrido ou de injeção à rede), entre outros (TIBOLA, 2009).

Entretanto, existem componentes que estão sempre presentes neste tipo de gerador, por serem essenciais para o funcionamento deste (TIBOLA, 2009).

Sendo assim, os principais componentes de um HAWT são:

- Rotor: Dispositivo que converte a energia cinética dos ventos em energia mecânica, produzindo rotação no eixo horizontal. Constituído por uma hélice com três ou mais pás, com movimentação ou não de suas angulações para maior rendimento;
- Eixo: Possui a função de transmitir a potência mecânica do rotor ao gerador, através da rotação deste, acoplado ou não à caixas de engrenagens ou outro equipamento de transmissão;
- Gerador: Equipamento acoplado ao eixo do rotor, convertendo energia mecânica em energia elétrica. Na categoria dos aerogeradores, existem aplicações de diversos geradores, síncronos e assíncronos;
- Nacele: Estrutura que abriga o gerador elétrico e outros componentes internos;
- Torre: Estrutura de sustentação que suporta a nacele e eleva o sistema até uma altura em que a velocidade do vento é maior e menos turbulenta do que junto ao solo.

Entre os componentes que nem sempre estão presentes, o controle de direção tem a função de manter o rotor sempre de frente para o vento. Já o dispositivo de proteção tem a função de evitar que, em ocasiões de ventos muito intensos, o rotor atinja velocidades acima da capacidade deste (VITORINO, 2012).

No caso de aerogeradores de pequeno porte, são usuais geradores síncronos com imãs permanentes. Sendo geradores síncronos, há a necessidade de componentes eletrônicos que retificam a energia elétrica em corrente alternada, em frequência variável devido à natureza não constante do vento, para corrente contínua. Posteriormente há outro componente eletrônico, chamado de inversor, responsável por converter a corrente contínua em corrente alternada, possuindo assim uma frequência fixa (DA SILVA REIS, 2013).

Outro componente nem sempre presente é o multiplicador de velocidade, constituído por uma caixa de engrenagens que altera a razão entre a frequência do rotor e a frequência do gerador elétrico (VITORINO, 2012).

Vale ressaltar que a presença do multiplicador de velocidade não descarta a necessidade dos componentes eletrônicos supracitados no caso de um gerador síncrono.

Entretanto, para a implementação de um aerogerador é necessária a realização de um estudo mais aprofundado sobre os ventos, levando em consideração o comportamento dos ventos de acordo com fatores como localidade e sazonalidade. A definição de recurso eólico é exatamente o comportamento de longo prazo desta fonte energética, o que será discutido no subcapítulo a seguir.

## 2.3 RECURSO EÓLICO

A energia eólica provém da radiação solar, uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre (DUTRA, 2008).

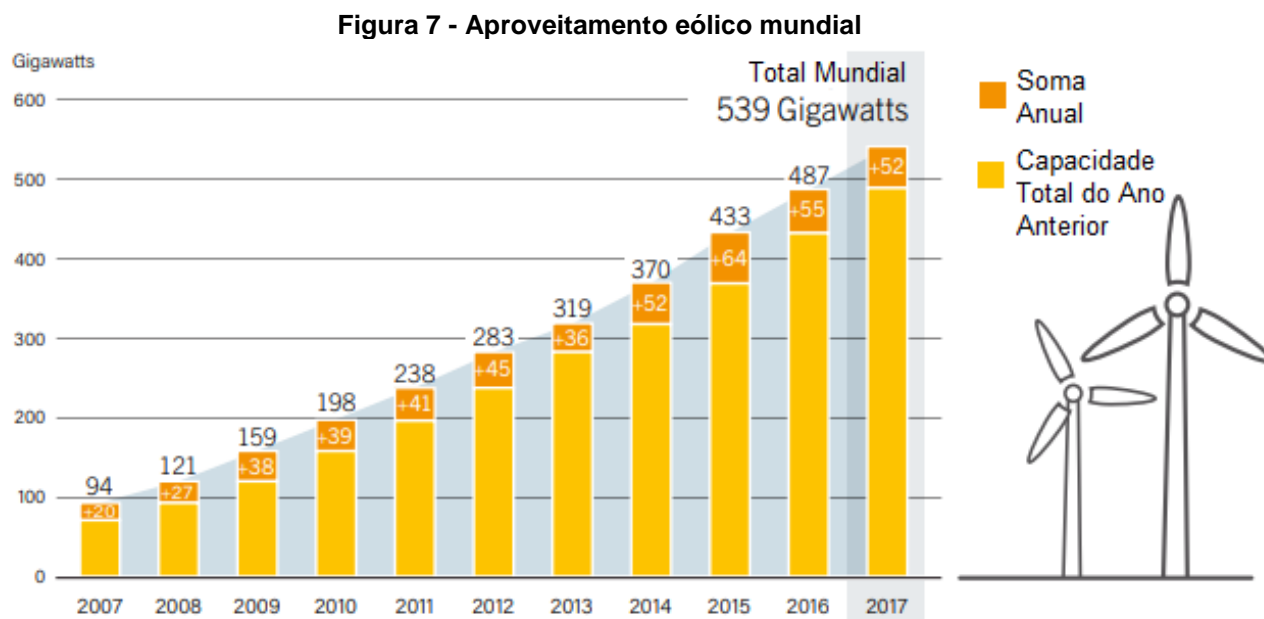
O aquecimento do sol na região equatorial e o resfriamento nos polos fazem com que existam ventos constantes, chamados de planetários. Contudo, também existem ventos causados por eventos meteorológicos periódicos, como as monções que são ventos que mudam de direção a cada seis meses devido à sazonalidade, e as brisas marítimas (ventos que sopram do mar para o continente - ou vice versa - devido à suas diferenças na capacidade de refletir, absorver ou emitir o calor do sol, influenciando na temperatura) (DUTRA, 2008).

O vento está presente de diferentes formas e constâncias e, por possuir energia cinética disponível para ser convertida, deve ser estudado a fim de ser aproveitado na



produção de energia elétrica, uma vez que este se movimenta pela superfície do planeta de forma inesgotável e gratuita (DE MENDONÇA, et. al., 2017).

Como mencionado anteriormente, desde seu descobrimento a energia eólica obteve crescimento significativo no decorrer dos anos. No período de apenas uma década, o aproveitamento elétrico mundial no ano de 2017 alcançou um aumento de geração mais de cinco vezes em relação ao ano de 2007, como demonstra a Figura 7.

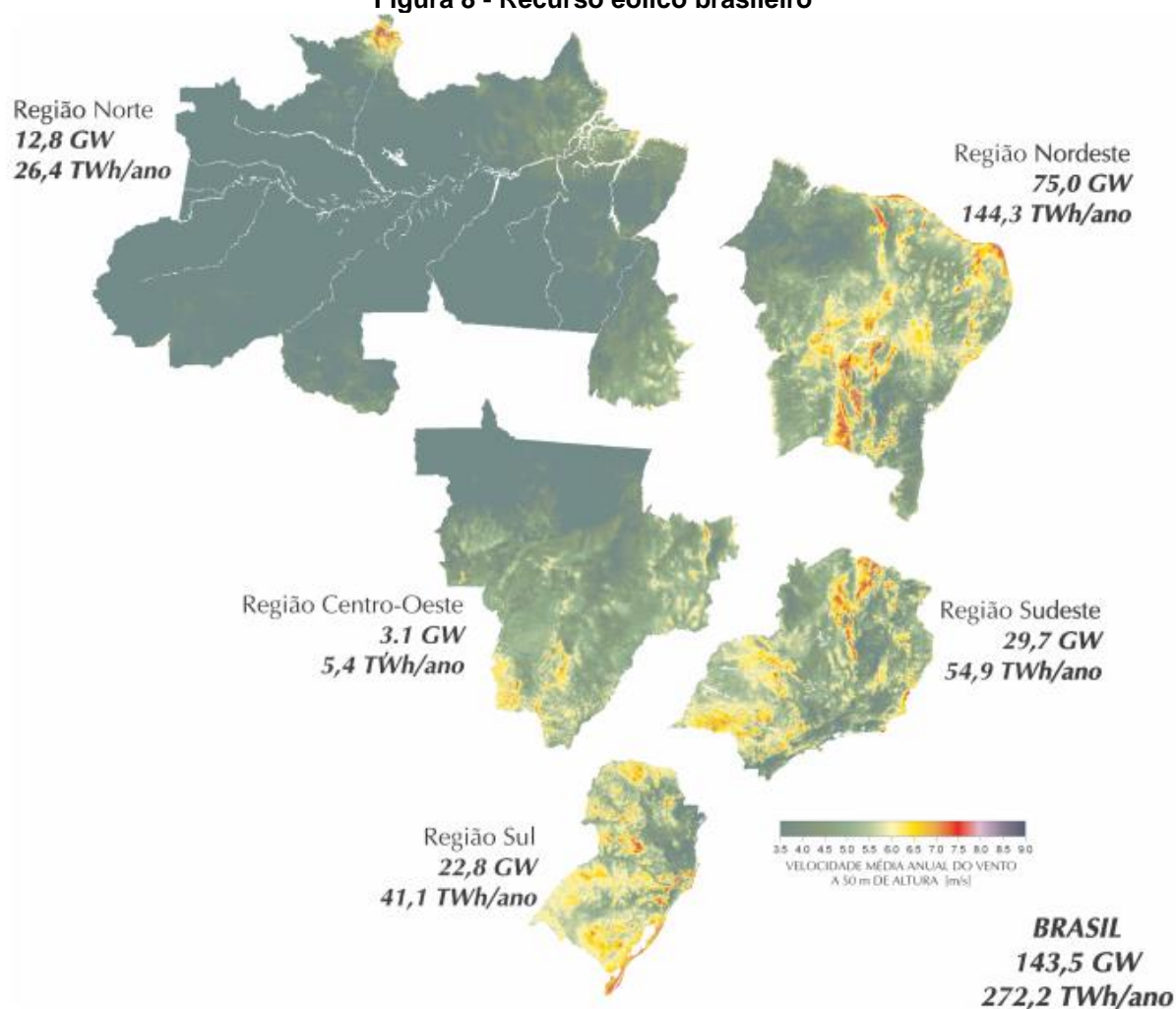


Fonte: REN21 (2018).

Juntamente a este crescimento global, o Brasil torna-se um país de interesse para este modo de geração de energia. Sendo assim, foram analisados os melhores locais para instalação de aerogeradores no território brasileiro, sabendo que os principais fatores de influência no regime dos ventos são a variação da velocidade com a altura e perfil do vento, a rugosidade do terreno caracterizada pelo tipo de solo e vegetação, a presença de obstáculos nas vizinhanças e o relevo do local (PAVINATTO, 2005).

A Figura 8 a seguir mostra um mapa de tal recurso, extraída do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.

**Figura 8 - Recurso eólico brasileiro**



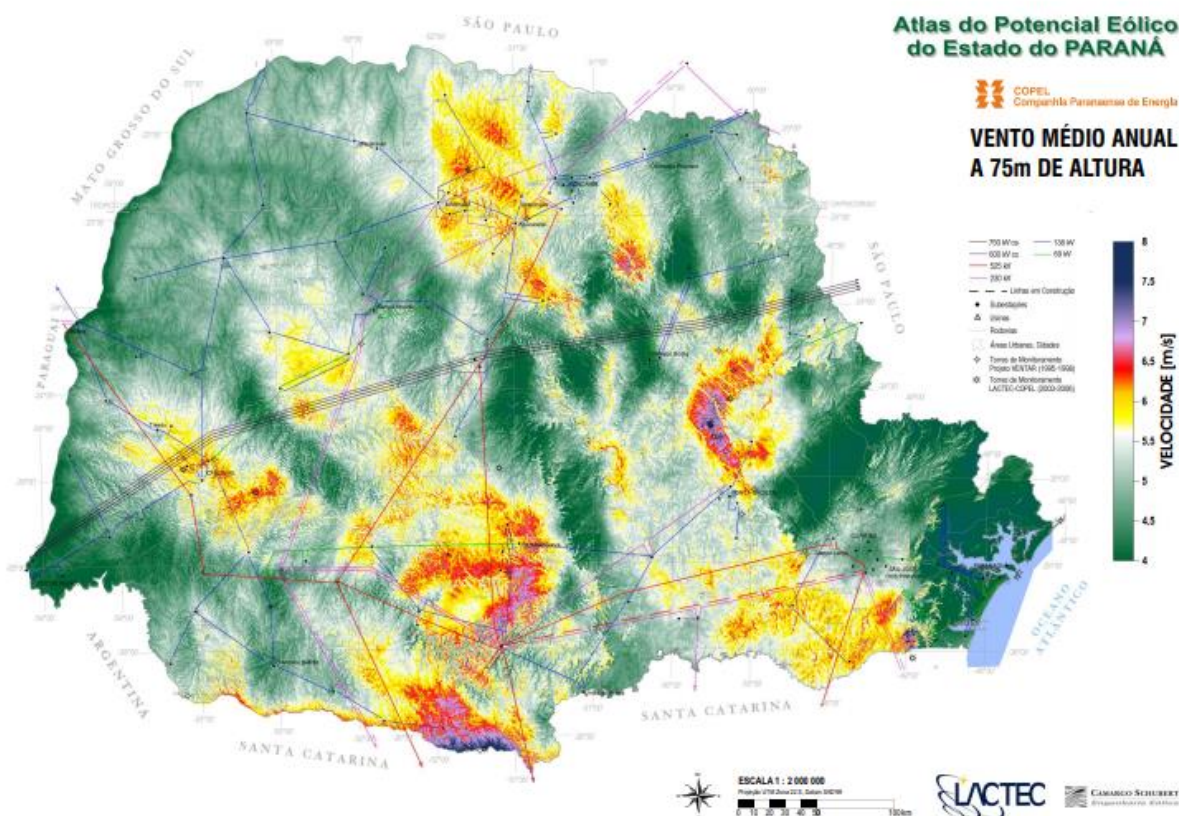
**Fonte: AMARANTE (2001).**

A região nordeste e a região sul/sudeste do Brasil são as que mais se destacam no potencial eólico, visto que o relevo plano da região sul sul e a presença de dunas na região nordeste proporcionam boas condições para aproveitamento do vento, além de ambas serem atendidas por áreas litorâneas e possuírem vegetação de pequeno porte.

Ao tratar-se da região sul, mais especificamente do Paraná, nota-se que já existem estudos que indicam quais regiões são mais adequadas.

Sendo assim, a partir dos dados do potencial eólico do Paraná retirados do Atlas do Potencial Eólico do Paraná, disponibilizado pela COPEL (SCHULTZ, 2007), três regiões do estado se destacam pela velocidade dos ventos, como pode ser visto na Figura 9:

Figura 9 - Recurso eólico do estado do Paraná



Fonte: SCHULTZ (2007).

- Planalto de Palmas: localizada no sul do estado, próximo à divisa com Santa Catarina. Apresenta ventos com velocidades médias anuais entre 7,0 e 7,5 m/s. Os centros consumidores das cidades de Palmas, Clevelândia e União da Vitória são os mais próximos;
- Campos de Guarapuava: localizada na região centro-sul do estado, apresenta ventos com velocidades médias anuais em torno de 7,0 m/s e o centro consumidor mais próximo é o da cidade de Guarapuava;
- Campos de Castro/Tibagi: localizada ao norte da cidade de Ponta Grossa, apresenta também velocidades médias anuais entre 7,0 e 7,5 m/s e próximos aos centros consumidores de Castro, Tibagi e Ponta Grossa.

Entretanto, somente os dados dos Atlas Eólicos não são suficientes para gerar as informações necessárias para a implementação de um aerogerador. Também é necessário realizar os seguintes estudos:

- Determinação de locais promissores através da análise do Atlas Eólico;
- Medição do vento através de torres anemométricas e sensores;
- Coleta e tratamento de dados;
- Realização de cálculos de potencial eólicos-elétricos;
- Análise de resultados.

Ressalta-se que para o tratamento de dados e conseqüentemente a realização dos cálculos são necessárias fórmulas relativas à aerogeradores em conjunto a fórmulas para uma análise dos ventos voltada à estatística. Os subcapítulos a seguir tratam justamente sobre a metodologia aplicada, sendo estas descritas em cálculos nos capítulos posteriores.

## 2.4 ENERGIA E POTÊNCIA DOS VENTOS

Para a implementação de um gerador é necessário o conhecimento de algumas propriedades físicas e mecânicas deste. Este subcapítulo trata destas propriedades.

O conceito de energia cinética provocada por uma massa de ar  $m$  em movimento, neste caso o vento, a uma velocidade “ $v$ ” dada é expressa matematicamente por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \text{ [J]} \quad (1)$$

A energia cinética que está presente no vento pode ser transformada em energia mecânica através das pás do rotor e convertida em energia elétrica através do gerador. A potência que o vento é capaz de gerar, chamada de potência disponível ( $P_{disp}$ ), considerando que este esteja perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário, pode ser calculada de uma forma simplificada através da seguinte fórmula:

$$P_{disp} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \text{ [W]} \quad (2)$$

Onde  $A$  equivale a área de seção transversal em que as hélices da turbina atuam,  $\rho$  representa a densidade do ar e a velocidade do vento é o fator mais

importante, uma vez que está elevado à terceira potência, representado pela letra  $v$  na equação. Sendo assim, mesmos pequenos erros nos dados da velocidade podem levar a grandes imprecisões no cálculo da potência e conseqüentemente no estudo de viabilidade de uma turbina eólica. A equação também pode ser escrita por unidade de área, como densidade de potência:

$$DP_{disp} = \frac{P_{disp}}{A} = \frac{\rho \cdot v^3}{2} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

Entretanto, a potência disponível pelo vento pode não ser totalmente aproveitada na conversão de energia pela turbina eólica uma vez que esta realiza tal conversão através da rotação das pás e esta característica física deve ser considerada.

Para isso, um coeficiente de potência representado por  $C_p$  é adicionado à expressão de potência e pode ser definido como a fração da potência eólica disponível extraída pelas pás do rotor ou calculada por:

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} \quad (4)$$

A potência mecânica extraída do vento pela turbina eólica depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações abaixo (PAVINATTO, 2005):

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

$$\lambda = \left( \frac{R \omega t}{v} \right) \quad (6)$$

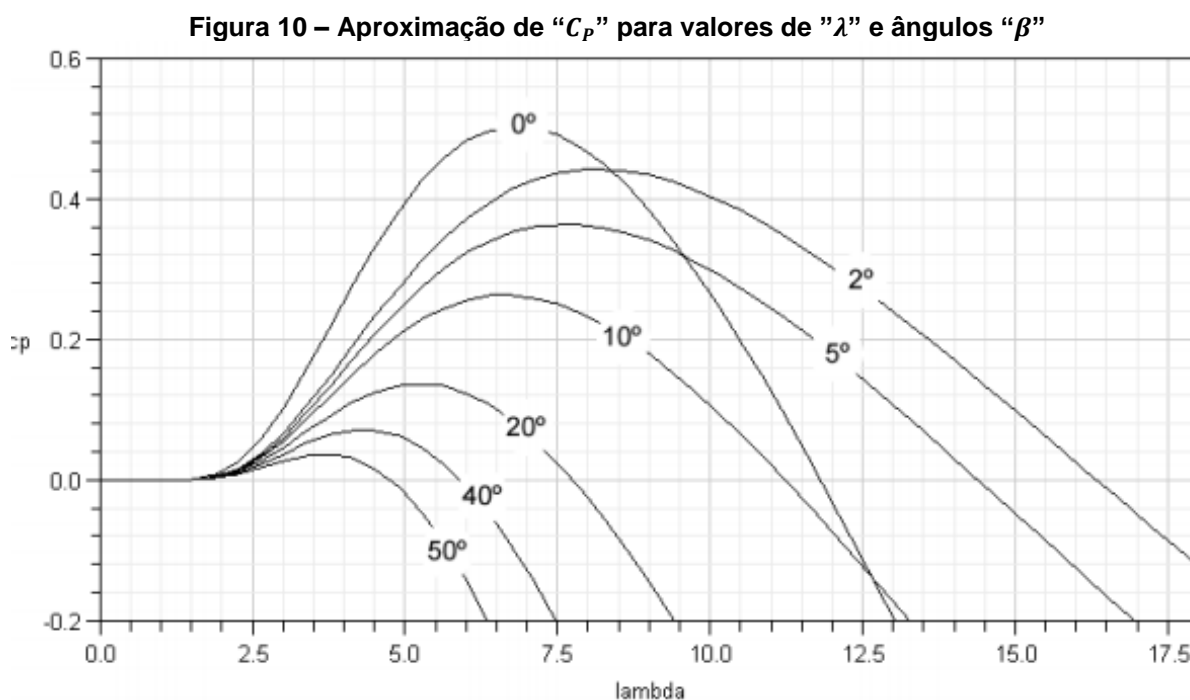
Onde:

- $C_p$  – coeficiente de potência da turbina eólica;
- $\lambda$  – razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (tip speed ratio);
- $\omega t$  – velocidade angular da turbina eólica (rad/s);
- $R$  – raio da turbina eólica (m);
- $\rho$  – densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>);
- $A$  – área varrida pelo rotor da turbina eólica (m<sup>2</sup>);

- $v$  – velocidade do vento incidente na turbina eólica (m);
- $\beta$  – Angulo de passo das principais forças atuantes em uma pá de turbina elétrica (*pitch*).

Na equação,  $C_p$  depende das características da turbina eólica, sendo função da razão de velocidades  $\lambda$  e do ângulo de passos das pás da turbina eólica  $\beta$  (*pitch*) e é expresso como uma característica bidimensional.

A partir disso, aproximações numéricas foram desenvolvidas para o cálculo de  $C_p$  para valores de  $\lambda$  e  $\beta$ , como mostra a Figura 10 abaixo, onde  $C_p$  está no eixo vertical,  $\lambda$  está no eixo horizontal e  $\beta$  está representado em diversas curvas com seu ângulo indicado:



Fonte: PAVINATTO (2005).

Sendo assim, a potência da turbina é dada pela equação:

$$P_{turb} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad [W] \quad (7)$$

Nota-se que, embora muitos desses cálculos não sejam necessários devido à disponibilidade dos dados diretamente do fabricante, o conhecimento sobre a obtenção destes dados são uteis para a implementação e análise de um aerogerador de um modo geral.

## 2.5 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DOS VENTOS

Outra característica importante para a implementação de um aerogerador é como o vento se comporta. Quando um dado evento ocorre de modo aleatório, ele é então chamado de estocástico. O vento tem características estocásticas e sua velocidade é uma variável aleatória contínua (PINTO, 2013).

Para analisar o vento é necessário então realizar a discretização dos dados, através de histogramas e conseqüentemente representá-lo por uma distribuição de probabilidade. A função de densidade de probabilidade que mais se ajusta à distribuição do vento é chamada de distribuição de *Weibull* (PINTO, 2013).

Sendo assim, a distribuição de *Weibull* é dada por:

$$f(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)^\alpha}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Onde  $\alpha$  é o fator de forma,  $\beta$  é o fator de escala e  $x$  é uma variável aleatória para observação, sendo convencionalmente dada pela velocidade que, em valores naturais, deseja-se estudar.

No caso do estudo dos ventos, a distribuição de *Weibull* é muito útil pois esta, juntamente à uma representação gráfica, proporciona uma melhor visualização de qual faixa de velocidade os ventos de uma determinada região se estabelecem em maior parte do tempo.

## 2.6 EXTRAPOLAÇÃO DE VELOCIDADE DO VENTO

Para uma distribuição de *Weibull* ser realizada, são necessários dados além de velocidade média e velocidade máxima de um local, sendo necessários os fatores de forma e escala citados anteriormente. Estes dados podem ser calculados ou então obtidos através de estudos posteriormente realizados.

Entretanto, diversos estudos são realizados com equipamentos de medição que operam e obtêm dados em alturas específicas. Logo, os dados obtidos com tais alturas podem não ser adequadas para aplicação em determinado tipo de aerogerador.

Um recurso utilizado para esta situação é a extrapolação de velocidade do vento. Para isto, duas metodologias são majoritariamente utilizadas, sendo estas a Lei Logarítmica e a Lei da Potência (CAMELO *et al.*, 2010).

A Lei Logarítmica é dada por:

$$v(h) = v_{ref} \left( \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \right) \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (9)$$

Em que  $h$  representa a altura desejada,  $v_{ref}$  a velocidade obtida em uma altura  $h_{ref}$  e  $z_0$  o comprimento de rugosidade da região em que os dados foram obtidos. Esta lei permite que, a partir de dados obtidos em certa altura, obtenha-se uma velocidade estimada para uma altura diferente. Ressalta-se que o valor de  $z_0$  pode variar de acordo com fatores sazonais, assim como a direção da velocidade do vento pode também alterá-lo.

Outra forma de representação do perfil de velocidade do vento pode ser realizada através da Lei da Potência, que é dada pela equação:

$$v(h) = v_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (10)$$

Em que  $\alpha$  é denominado de expoente de camada de limite, que varia em função da rugosidade da superfície e que, para terrenos com característica plana, pode ser aproximado à 0,14. Entretanto, há também uma correlação entre este e o comprimento de rugosidade, que é dado por:

$$\alpha = 0,096 \log_{10} z_0 + 0,016(\log_{10} z_0)^2 + 0,24 \quad (11)$$

Nota-se que, assim como a Lei Logarítmica, a Lei da Potência pode variar de acordo com fatores sazonais. Além disso, ela também pode variar de acordo com outros fatores como altura, terreno e temperatura do local.

Por convenção, a Lei da Potência foi escolhida para a realização dos cálculos a diante neste trabalho.



## 2.7 PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA

A energia produzida por um aerogerador pode ser obtida através da integração da potência extraída em um determinado período, que é dada pela equação abaixo (CUSTÓDIO, 2002):

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(v(t))dt \quad (12)$$

Onde  $E$  é a energia gerada e  $P(v(t))$  é a potência em função da velocidade do vento e  $t_1$  e  $t_2$  são respectivamente o início e o fim de um determinado período.

Nota-se que usualmente utiliza-se como unidade de energia o kilowatt-hora. Logo, a partir da Equação (12), com a aplicação da distribuição de *Weibull* e da extrapolação das velocidades em relação a altura desejada, pode-se então encontrar a produção de energia de um aerogerador, utilizando a equação:

$$E = h \sum f_i P_i [kWh] \quad (13)$$

Onde  $h$  é o número de horas de determinado período,  $f_i$  é a frequência da  $i$ -ésima faixa de velocidade e  $p_i$  é a potência correspondente a  $i$ -ésima faixa de velocidade.

Considerando que um ano possui 8760 horas, obtém-se a produção de energia anual de um aerogerador, descrita pela seguinte equação:

$$E_{ag} = 8760 \sum f_i P_i [kWh] \quad (14)$$

## 2.8 FATOR DE CAPACIDADE

Um fator importante para a análise de aerogeradores é o fator de capacidade, que é definida pela relação entre a energia elétrica gerada e sua capacidade de produção.

A capacidade de produção é a quantidade de energia que um aerogerador pode produzir operando em um determinado período.

Sendo assim, o fator de capacidade pode ser expresso por:

$$FC = \frac{E}{T \cdot P} \quad (15)$$

Na qual  $E$  é a energia efetivamente gerada em determinado período,  $T$  é o período e  $P$  é a potência nominal do aerogerador.

Novamente, considerando que um ano possui 8760 horas, obtém-se:

$$FC = \frac{E_{ag}}{8760 \cdot P} \quad (16)$$

Vale ressaltar que o fator de capacidade dependerá do local onde pretende-se instalar o aerogerador, visto que o perfil do vento afeta diretamente a energia anual gerada.

### 3 ESTUDO DA REGIÃO E DE CARGA

Com base nas informações adquiridas no Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná, foi selecionada a área dos campos de Castro/Tibagi para o estudo dos ventos do local. (SCHULTZ, 2007)

As seções a seguir tratam sobre o histórico e principais atividades desta região, juntamente a um estudo de carga existente, sendo este compatível com tais atividades, estabelecendo assim uma propriedade hipotética no local.

#### 3.1 O MUNICÍPIO DE CASTRO

A cidade de Castro localizada no estado do Paraná, no primeiro planalto, nas coordenadas 24° 47' 27" S 50° 00' 43" O a uma altitude de 996 metros possui 67.084 habitantes, segundo o IBGE. Teve sua fundação em 1778 e foi a primeira cidade fundada no estado do Paraná após sua emancipação de São Paulo. Localizada no caminho dos tropeiros, teve seu desenvolvimento a partir de atividades econômicas do tropeirismo.

Atualmente maioria da população é composta por descendentes de alemães, poloneses e holandeses que instalaram suas colônias na região a partir de 1855 em busca de terras férteis e uma melhor qualidade de vida. Destaque para a colônia de Castrolanda, batizada em homenagem à cidade pelos holandeses que ali se alojaram, em uma junção dos nomes Castro e Holanda. Dedicaram-se à industrialização e comercialização de produtos animais e vegetais e foram responsáveis pelo grande desenvolvimento da economia na região.

A Figura 11 a seguir exemplifica uma paisagem da região de Castrolanda:

**Figura 11 - Moinho localizado na cidade de Castrolanda**



**Fonte: Centro Cultural Castrolanda (2018).**

Em Castro, existem muitas propriedades rurais que se dedicam ao cultivo de cereais, leguminosas e oleaginosas. Mesmo a agricultura sendo bem desenvolvida, o destaque da região é para a agropecuária, com a criação de suínos, aves e gado leiteiro.

A produção do leite é o carro-chefe da economia no município que é considerado pela SEAB (Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento) uma das principais bacias leiteiras do Brasil. Observa-se na Tabela 4 que a agropecuária supera até mesmo setores industriais da região, de acordo com o IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social):

**Tabela 4 - Valor adicionado bruto a preços básicos segundo os ramos de atividades**

<b>RAMOS DE ATIVIDADES</b>	<b>VALOR (R\$1.000.00)</b>
<b>Agropecuária</b>	481.743
<b>Indústria</b>	427.668
<b>Serviços</b>	866.515
<b>Administração pública</b>	272.380
<b>TOTAL</b>	2.048.307

**Fonte: IPARDES (2018).**

### 3.2 PANORAMA DA AGROPECUÁRIA LEITEIRA

O Brasil ocupa a 5ª posição entre os maiores produtores de leite, ficando atrás apenas de China, Índia, Paquistão e EUA. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017).

Além de ser uma das principais fontes de cálcio e proteína para a população brasileira, especialmente nas classes mais desfavorecidas, o leite é também um dos seis produtos mais importantes da agropecuária brasileira, gerando empregos e renda para a população. (EMBRAPA, 2016).

No Brasil, as condições de clima e solo favorecem agronegócio leiteiro em todo o território e esta atividade é realizada em sua grande parte por médias e pequenas propriedades rurais pelo país, impulsionando a economia local e atraindo investimentos. Esta atividade também proporciona a transferência de renda do meio urbano para o meio rural e favorece a circulação de produtos e serviços (EMBRAPA, 2016).

A região sul se destaca dentro do contexto nacional na produção de leite e isso pode ser explicado por fatores como a presença de tanques de resfriamento, a inseminação artificial, a transferência de embriões e a ordenha de forma mecanizada. A qualidade do leite é conservada até o momento do seu transporte em estabelecimentos que possuem os tanques de resfriamento, mas apenas 10,8% dos produtores nacionais possuem tal equipamento, uma porcentagem baixa mesmo considerando que existe uma parcela de produtores que visam o autoconsumo do leite.

Na **Tabela 5** observa-se a comparação entre os estabelecimentos que possuem ou não o tanque de resfriamento por região do país. A ordenha mecânica, a inseminação artificial e a transferência de embriões também mostradas na permitem o aumento de produção de leite por vaca e mais uma vez a região sul se destaca nesses aspectos.

**Tabela 5 - Estabelecimentos que possuem tanque de resfriamento por região**

	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Brasil
Universo: estabelecimentos produtores						
<b>Tanque para resfriamento</b>	1,3	0,3	10,8	24,1	8,0	10,8
Universo: estabelecimentos produtores com mais de cinco vacas ordenhadas						
<b>Ordenha mecânica</b>	1,8	2,1	20,5	38,2	7,1	13,0
<b>Inseminação artificial</b>	2,6	3,5	9,6	22,3	4,7	7,6
<b>Transferência de embriões</b>	0,2	0,3	0,8	0,9	0,4	0,5

**Fonte: MAIA (2013).**

Visando uma redução de custos a cooperativa Batavo localizada em Carambeí, a 20 km de Castro, optou por dar a responsabilidade do fornecimento de sua matéria-prima para a produção das Indústrias Batávia à cooperativa Castrolanda, em Castro, cidade que obteve um crescimento na produção leiteira de 13% de 2016 para 2017, ganhou destaque nacional e foi reconhecida como a “Capital Nacional do Leite” citada pela lei federal nº 13.584 sancionada em 26 de dezembro (DE SOUZA, 2018).

Um ponto importante a se destacar é de que, por questões logísticas, a comercialização do leite entre produtores e laticínios deve ser local (MAIA, 2013).

Portanto, será considerado um local em que busca-se cargas locais com ênfase na produção de leite, o que será visto a diante.

### 3.3 EQUIPAMENTOS EM UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE LEITE

Um sistema de produção de leite em uma propriedade rural é caracterizado por diversos equipamentos, máquinas e utensílios, sendo estes motores elétricos, ordenhadeiras, resfriadores, tanques de expansão, entre outros (EMBRAPA, 2016).

Um estudo de caso com equipamentos semelhantes é demonstrado no trabalho “A Energia Solar Aplicada à Atividade Leiteira em Pequena Propriedade do Sul do Brasil” (MIGLIAVACCA, SCARTAZZINI, 2015).

De acordo com o estudo, a sala de ordenha possui um sistema de ordenha da marca Orimilk, com 12 conjuntos de teteiras. Este sistema consiste em bomba de sucção, motor de bombeamento, aquecedor de imersão, um boiler de 200 litros e

resfriador de 1920 litros para conservação de leite. A partir disso obteve-se as características de tais equipamentos, sendo estas representadas na Tabela 6 a seguir:

**Tabela 6 - Cargas instaladas do estudo de caso**

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Marca</b>	<b>Potência</b>	<b>Potência [W]</b>
<b>Bomba de sucção da ordenha</b>	1	WEG	4 [CV] 3 [HP]	2944
<b>Motor de bombeamento para o resfriador</b>	1	Voges	1 [CV]	736
<b>Unidade condensadora do resfriador</b>	2	Heatcraft	1/20 [HP]	74,5
<b>Compressor do resfriador</b>	1	Copeland	1 [HP]	745
<b>Lâmpadas (incandescentes)</b>	5	OSRAM	100 [W]	500
<b>Motor do misturador</b>	1	Voges	1/20 [HP]	74,5
<b>Aquecedor de imersão do boiler</b>	1	-	3000 [W]	3000
<b>Potência instalada</b>				8,1 [kW]

**Fonte: MIGLIAVACCA, SCARTAZZINI (2015).**

Entretanto, somente carga instalada não é suficiente, pois para se estimar o consumo da sala de ordenha e compararmos com o consumo da propriedade, precisa-se de um estudo sobre o funcionamento dos equipamentos contidos nela. Um destes equipamentos é a ordenhadeira mecânica.

Conforme Amaral et al (2004), uma máquina de ordenha é um dispositivo composto de várias partes que, quando devidamente montadas e supridas com uma fonte de energia, removerão o leite de um animal e transportarão o leite para um recipiente de armazenamento. Considerando que as vacas sejam ordenhadas duas vezes no dia, por uma hora, considera-se que o tempo de funcionamento diário de uma bomba de sucção e de um motor de bombeamento desse sistema é de aproximadamente duas horas.

Outro equipamento utilizado na produção leiteira é o tanque de resfriamento, que é responsável pelo resfriamento e armazenamento de leite a uma temperatura baixa até que ele possa ser recolhido por um caminhão de leite (NERO, 2005).

Em conjunto, para facilitar um resfriamento adequado e rápido de todo o conteúdo de um tanque, cada tanque é equipado com pelo menos um agitador. Agitar

o leite garante que todo o leite dentro do tanque tenha a mesma temperatura e que o leite permaneça homogêneo (ATAIDE; COSTA, 2005).

Em relação ao tempo de funcionamento, de acordo com o manual de refrigeradores da Sulinox (2014), o resfriador de leite (ou unidade de refrigeração) opera em conjunto com o agitador de leite por volta de duas horas. Entretanto, quando o resfriador de leite estiver desligado, o agitador de leite continuará operando, porém durante cinco minutos, em intervalos de meia hora.

Por fim, utiliza-se um boiler elétrico para o aquecimento da água que será utilizada na limpeza da sala de ordenha e seus equipamentos. Considera-se que o boiler opere por mais duas horas após o término da ordenha.

Sendo assim, estimou-se os horários de funcionamento dos equipamentos citados na Tabela 6, obtendo-se assim a Tabela 7 abaixo:

<b>Equipamento</b>	<b>Tempo [h]</b>
<b>Bomba de sucção da ordenha</b>	2
<b>Motor de bombeamento para o resfriador</b>	2
<b>Unidade condensadora do resfriador</b>	3
<b>Compressor do resfriador</b>	3
<b>Lâmpadas (incandescentes)</b>	12
<b>Motor do misturador</b>	5,6
<b>Aquecedor de imersão do boiler</b>	2

**Fonte: Aatoria Própria.**

Além da carga instalada, este estudo também possui os dados de consumo mensal da propriedade rural, referentes ao período de novembro de 2013 a agosto de 2015. A partir disso, foram calculados os consumos médios diários desta propriedade, sendo estes indicados na Tabela 8.



**Tabela 8 - Dados de consumo mensal e diário do estudo de caso**

<b>Data</b> <b>[mês/ano]</b>	<b>Consumo mensal</b> <b>[kW.h]</b>	<b>Dias por mês</b>	<b>Consumo médio</b> <b>diário [kW.h]</b>
nov/13	1760	33	53.333
dez/13	1630	30	54.333
jan/14	1748	31	56.387
fev/14	1642	31	52.968
mar/14	1571	28	56.107
abr/14	829	31	26.742
mai/14	2100	30	70.000
jun/14	1591	31	51.323
jul/14	2119	30	70.633
ago/14	1830	31	59.032
set/14	1666	33	50.485
out/14	1844	30	61.467
nov/14	1540	31	49.677
dez/14	1390	30	46.333
jan/15	1480	31	47.742
fev/15	1490	29	51.379
mar/15	1621	28	57.893
abr/15	599	31	19.323
mai/15	1606	30	53.533
jun/15	1494	30	49.800
jul/15	1840	31	59.355
ago/15	1720	31	55.484

**Fonte: MIGLIAVACCA, SCARTAZZINI (2015).**

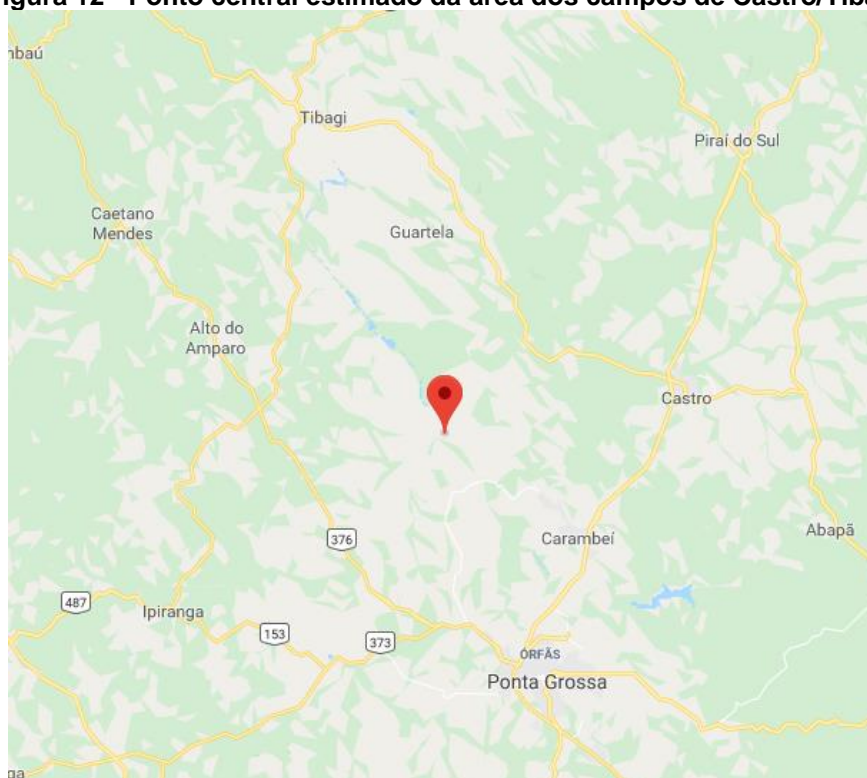
Portanto, devido à similaridade com o proposto, os dados do estudo de Migliavacca (2015), em conjunto com os dados supracitados, foram definidos como base para a implementação de aerogeradores em uma propriedade leiteira no estado do Paraná.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo encontram-se os cálculos dos dados previamente discutidos. Os dados de ventos são os primeiros a serem analisados, posteriormente os dados dos aerogeradores e, por fim, o cruzamento e análise destes.

Ao se tratar dos ventos, é importante salientar que dados já são pré-disponibilizados por instituições de pesquisa filiadas aos entes reguladores do tema em questão, sendo um destes o CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito), o qual foi escolhido para consultar os dados desejados, dada a objetividade do sistema para obtenção do resultado pretendido. Entretanto, para a realização do estudo através da ferramenta do CRESESB, é necessária a obtenção de um ponto central desta região - sendo estes, em uma leitura estimada,  $24^{\circ}50'47.0''$  ao sul e  $50^{\circ}16'31.0''$  à oeste, conforme apresentado na Figura 12 a seguir.

**Figura 12 - Ponto central estimado da área dos campos de Castro/Tibagi**



**Fonte: Google Maps (2018).**

A partir destas coordenadas, foram obtidos os parâmetros de velocidade média sazonal do vento, além dos fatores C e K da distribuição de Weibull, definidos para a altura de 50 metros, como mostra a Tabela 9 a seguir:

**Tabela 9 - Dados de potencial eólico na região dos Campos de Castro/Tibagi**

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
velocidade média do vento	m/s	<b>5.78</b>	7.21	<b>7.76</b>	7.35	<b>7.03</b>
fator c		<b>6.52</b>	8.14	<b>8.73</b>	8.3	<b>7.94</b>
fator k		2.32	2.23	<b>2.62</b>	<b>2.19</b>	<b>2.28</b>
densidade de potência	W/m <sup>2</sup>	<b>198</b>	396	<b>437</b>	427	<b>365</b>

Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, CRESESB (2018).

Ressalta-se que, a fonte de dados utilizada pelo CRESESB fornece os fatores  $\alpha$  e  $\beta$  da equação (8), convencionalmente como  $k$  e  $c$  respectivamente. Deste modo, ao utilizar o *software Excel* se obteve a Tabela 10 a seguir, contendo nela valores das distribuições sazonais e também os valores da distribuição anual.

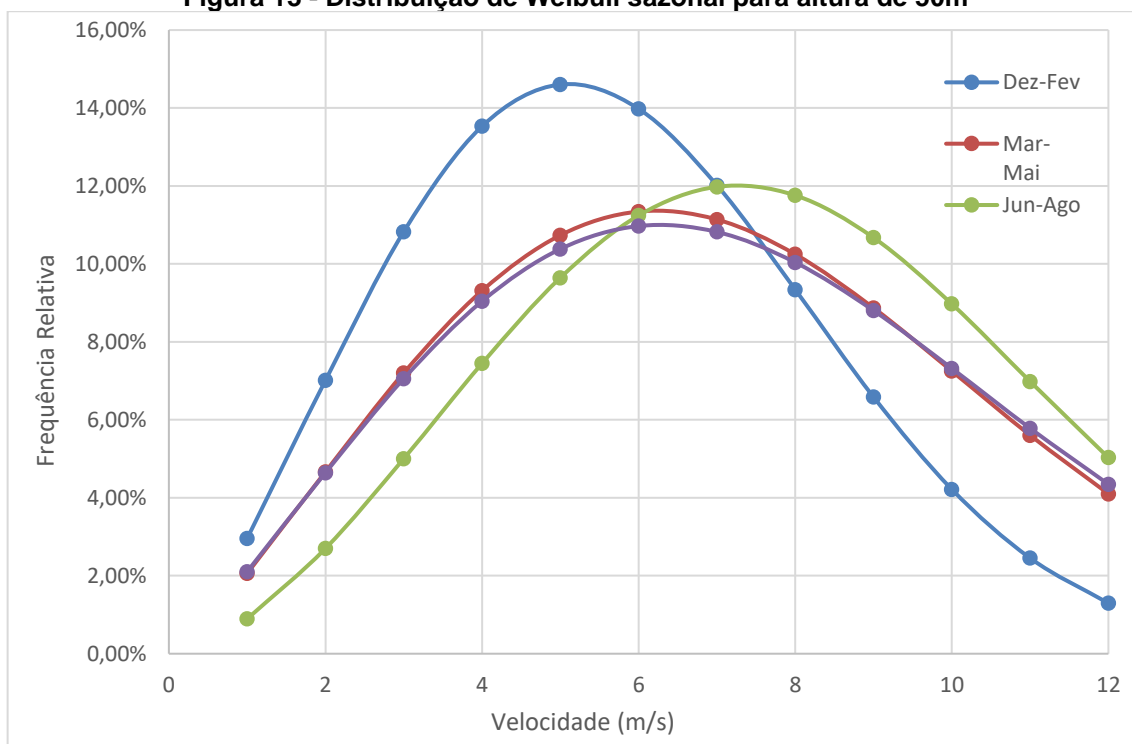
**Tabela 10 - Distribuições de Weibull dos ventos**

	Dez-Fev		Mar-Mai		Jun-Ago		Set-Nov		Anual	
	k ( $\alpha$ )	c ( $\beta$ )	k ( $\alpha$ )	c ( $\beta$ )	k ( $\alpha$ )	c ( $\beta$ )	k ( $\alpha$ )	c ( $\beta$ )	k ( $\alpha$ )	c ( $\beta$ )
	2.28	7.94	2.28	7.94	2.28	7.94	2.28	7.94	2.28	7.94
<b>x</b>	$f(x, \alpha, \beta)$									
<b>1</b>	0.029568315		0.020586		0.00894		0.021059		0.020067	
<b>2</b>	0.070112531		0.046655		0.027		0.046414		0.04709	
<b>3</b>	0.108270917		0.072041		0.050042		0.070579		0.074105	
<b>4</b>	0.135316931		0.093129		0.07447		0.09043		0.096831	
<b>5</b>	0.146038488		0.107364		0.096458		0.103825		0.11213	
<b>6</b>	0.139785827		0.11344		0.112425		0.109719		0.118329	
<b>7</b>	0.120187679		0.111396		0.119787		0.108209		0.115404	
<b>8</b>	0.093420643		0.102471		0.11759		0.100389		0.10483	
<b>9</b>	0.065857399		0.088719		0.106744		0.088035		0.089096	
<b>10</b>	0.042166448		0.07251		0.08973		0.073203		0.07104	
<b>11</b>	0.024530107		0.056049		0.069848		0.057834		0.053226	
<b>12</b>	0.012962655		0.041024		0.050306		0.043473		0.037506	
<b>13</b>	0,006218248		0,028453		0,033476		0,03112		0,024868	
<b>14</b>	0,002705373		0,018708		0,020545		0,021227		0,015517	
<b>15</b>	0,001066361		0,011664		0,011606		0,013803		0,009111	
<b>16</b>	0,000380352		0,006896		0,006021		0,008558		0,005033	
<b>17</b>	0,000122611		0,003866		0,002862		0,00506		0,002615	
<b>18</b>	3,56758E-05		0,002055		0,001244		0,002853		0,001277	
<b>19</b>	9,35729E-06		0,001035		0,000493		0,001534		0,000586	
<b>20</b>	2,20945E-06		0,000494		0,000178		0,000786		0,000253	

Fonte: Autoria própria.

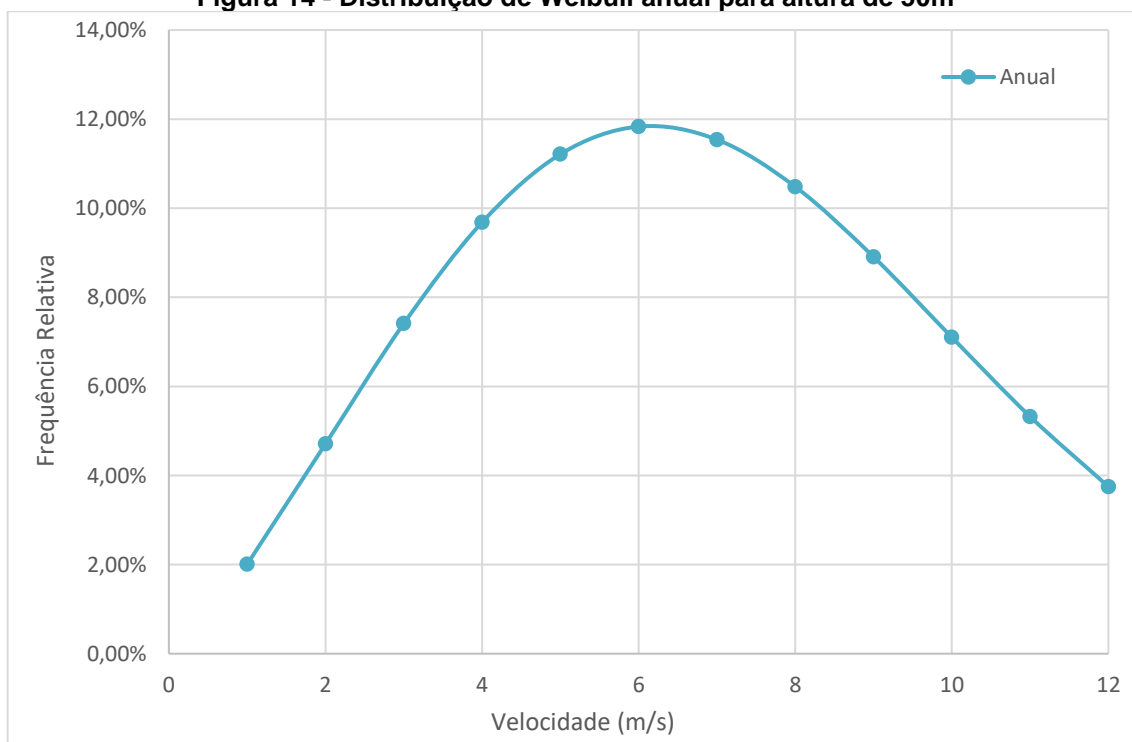
Conseqüentemente, para fins de visualização, foi realizada a disposição gráfica dos valores das distribuições sazonais, assim como a distribuição anual, sendo estas respectivamente representadas pela Figura 13 e pela Figura 14:

**Figura 13 - Distribuição de Weibull sazonal para altura de 50m**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 14 - Distribuição de Weibull anual para altura de 50m**



Fonte: Autoria própria.

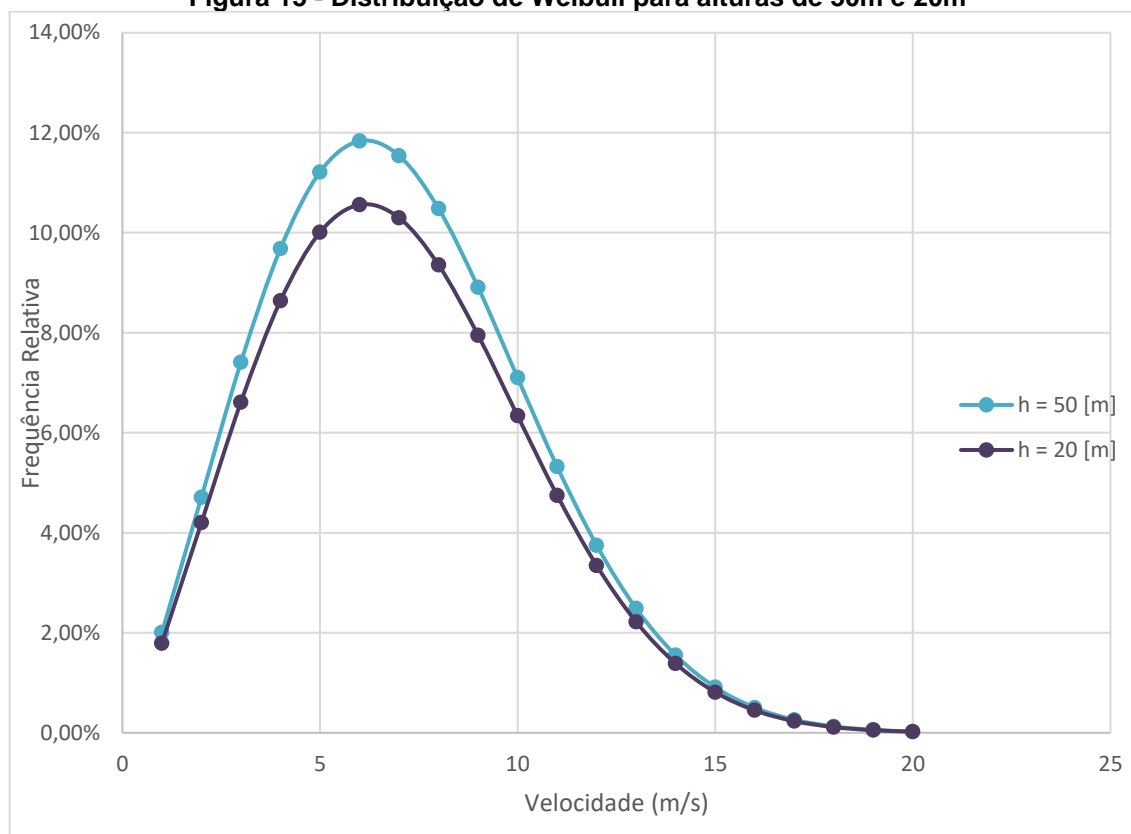
A partir dos dados da distribuição de Weibull anual, foi realizado o cálculo de extrapolação da velocidade do vento da Equação (10), obtendo-se assim a Tabela 11 abaixo, assim como o gráfico para fins de visualização demonstrado na Figura 15.

**Tabela 11 - Distribuição de Weibull para alturas de 50m e 20m**

$x$	$h = 50 [m]$	$h = 20 [m]$
1	0.020067	0,017908
2	0.04709	0,042024
3	0.074105	0,066133
4	0.096831	0,086413
5	0.11213	0,100067
6	0.118329	0,105599
7	0.115404	0,102988
8	0.10483	0,093552
9	0.089096	0,079511
10	0.07104	0,063397
11	0.053226	0,0475
12	0.037506	0,033471
13	0,024868	0,022193
14	0,015517	0,013848
15	0,009111	0,008131
16	0,005033	0,004492
17	0,002615	0,002334
18	0,001277	0,00114
19	0,000586	0,000523
20	0,000253	0,000226

**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 15 - Distribuição de Weibull para alturas de 50m e 20m**



**Fonte: Autoria própria.**

Em uma situação onde busca-se um aerogerador para sua implementação em determinada localidade, um dos primeiros fatores a ser verificado é a potência dele e, conseqüentemente, seu porte.

O estudo de caso em questão possui dados de carga instalada e consumo da propriedade que possibilitam estimar o porte necessário do aerogerador.

Entretanto, os dados de consumo do estudo não indicam o consumo da produção de leite, apenas o consumo geral obtido através da fatura de energia.

Um meio de se obter o consumo desta produção é através das horas em que as cargas estão efetivamente consumindo. Sabendo disso, foram utilizados os dados da Tabela 6 e da Tabela 7 para assim estimar o consumo específico das cargas instaladas, deste modo expressas na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12 – Consumo Energético da Produção de Leite

Equipamento	Quantidade	Potência [W]	Tempo de uso [h]	Consumo Mensal [kWh]	Consumo Anual [kWh]
Bomba de sucção da ordenha	1	2944	2	176,64	2119,68
Motor de bombeamento para o resfriador	1	736	2	44,16	529,92
Unidade condensadora do resfriador	2	74,5	3	6,705	80,46
Compressor do resfriador	1	745	3	67,05	804,6
Lâmpadas (incandescentes)	5	500	12	180	2160
Motor do misturador	1	74,5	5,6	12,516	150,192
Aquecedor de imersão do boiler	1	3000	2	180	2160
<b>TOTAL</b>		<b>8,1 [kW]</b>		<b>667,071 [kWh]</b>	<b>8004,852 [kWh]</b>

Fonte: Autoria Própria.

Com base na Tabela 8 obteve-se a média de consumo anual de aproximadamente 19135 kWh. Desde modo, o consumo da produção de leite representa aproximadamente 42% do consumo total da unidade consumidora.

Logo, no caso da propriedade em estudo, levando em consideração a carga instalada e o consumo mensal da produção de leite, foi definido que o mais indicado para o local seria um aerogerador de pequeno porte. Outrossim, foi definido que o aerogerador de eixo horizontal seria o tipo adotado, visto que este possui alta eficiência e possibilidade de ser instalado em grandes áreas.

Deste modo, foram selecionados alguns modelos de aerogeradores de pequeno porte, fabricados pela empresa Enersud®, sendo estes mostrados na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13 - Dados de diferentes modelos de aerogeradores de pequeno porte

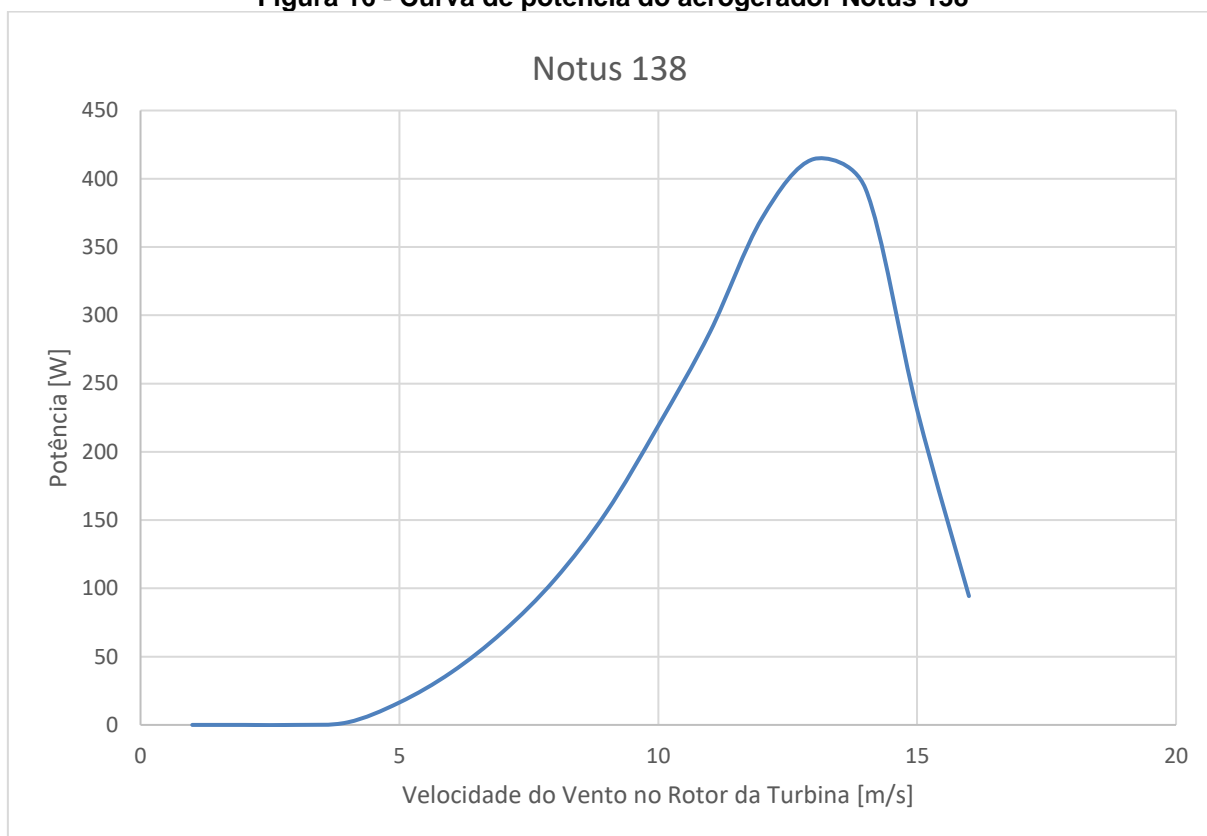
Modelo	Notus 138	Gerar 246	Verne 555
<b>Diâmetro da Hélice</b>	1,38 m	2,46 m	5,55 m
<b>Potência Nominal</b>	420 W	1.000 W	6.000 W
<b>Velocidade Nominal</b>	12,5 m/s	12,5 m/s	12 m/s
<b>Rotação Nominal</b>	1100 RPM	740 RPM	240 RPM
<b>Peso Total</b>	12,5 kg	35 kg	200 kg
<b>Vida Útil do Projeto</b>	20 anos	20 anos	20 anos
<b>Garantia da Fabricante</b>	2 anos	2 anos	2 anos
<b>Material das Pás</b>	Compósito de Fibra de Vidro	Compósito de Fibra de Vidro	Compósito de Fibra de Vidro
<b>Proteção Contra Altas Velocidades</b>	Stall (Controle de Passo) – 17,5 m/s	Stall (Controle de Passo) – 17,5 m/s	Stall (Controle de Passo) – 17,5 m/s
<b>Velocidade Máxima</b>	137 km/h	137 km/h	137 km/h
<b>Sistema Magnético</b>	Neodímio (ímã permanente)	Neodímio (ímã permanente)	Neodímio (ímã permanente)
<b>Caixa de Engrenagens</b>	Não Possui ( <i>Drive</i> direto)	Não Possui ( <i>Drive</i> direto)	Não Possui ( <i>Drive</i> direto)
<b>Sistema Elétrico</b>	Sem Escovas e Trifásico – Saída DC Retificada	Sem Escovas e Trifásico – Saída AC	Sem Escovas e Trifásico – Saída AC
<b>Tensão de Saída</b>	12/24/48 V	24/48/220/400 V	120/240/400 V
<b>Materiais Anti Corrosão</b>	Alumínio/Inox/Mat. Galvanizado	Alumínio/Inox/Mat. Galvanizado	Alumínio/Inox/Mat. Galvanizado
<b>Conexão com a Torre</b>	48 mm	88,9 mm	Flange Padrão ANSI DIN 6"
<b>Preço</b>	R\$ 3.100,00	R\$ 7.500,00	R\$ 36.000,00

Fonte: Enersud® (2018).

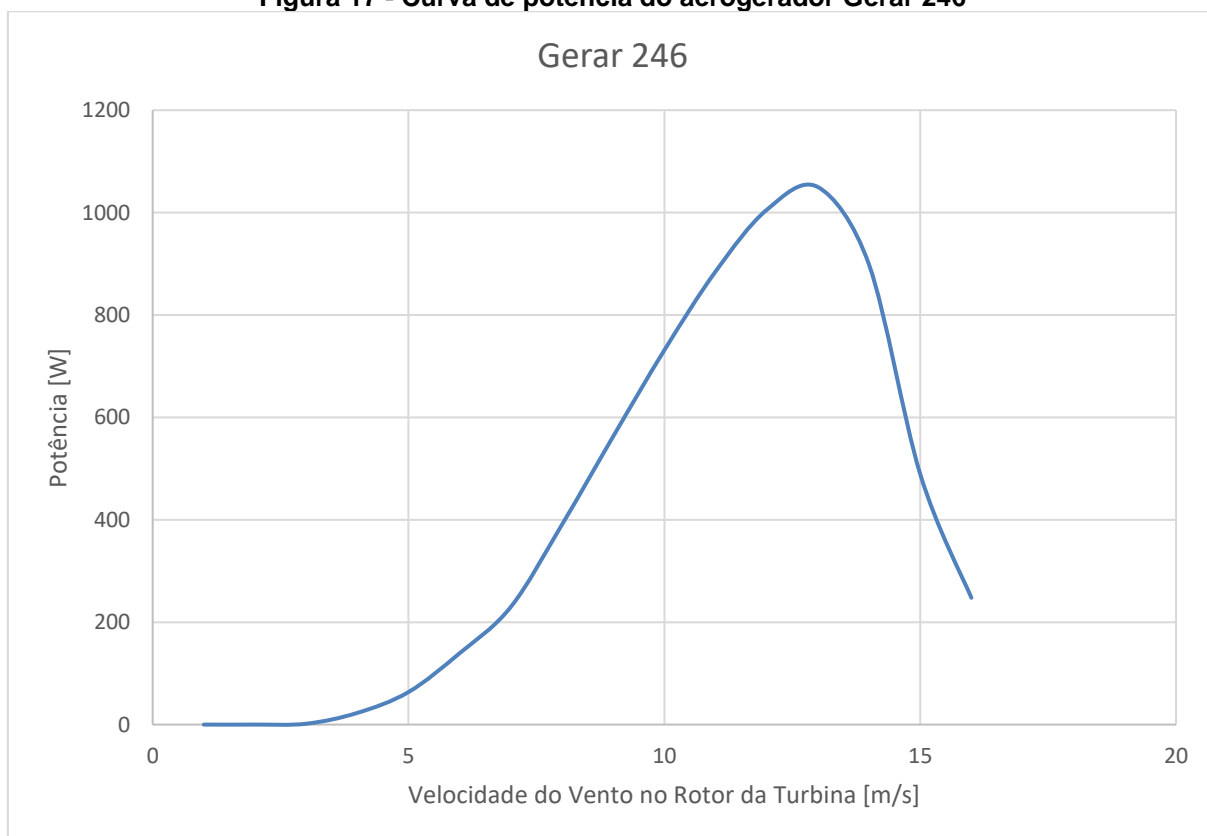
Além dos dados acima, foram obtidas as curvas de potência dos aerogeradores. Tais dados são fornecidos pelas fabricantes a fim de demonstrar ao consumidor a relação entre a velocidade dos ventos, dada em metros por segundo, e a potência gerada do produto, dada em watts (PARIZOTTO, 2012).

Sendo assim, os dados obtidos são expressos em curvas, como podem ser observadas a partir da Figura 16 à Figura 18.

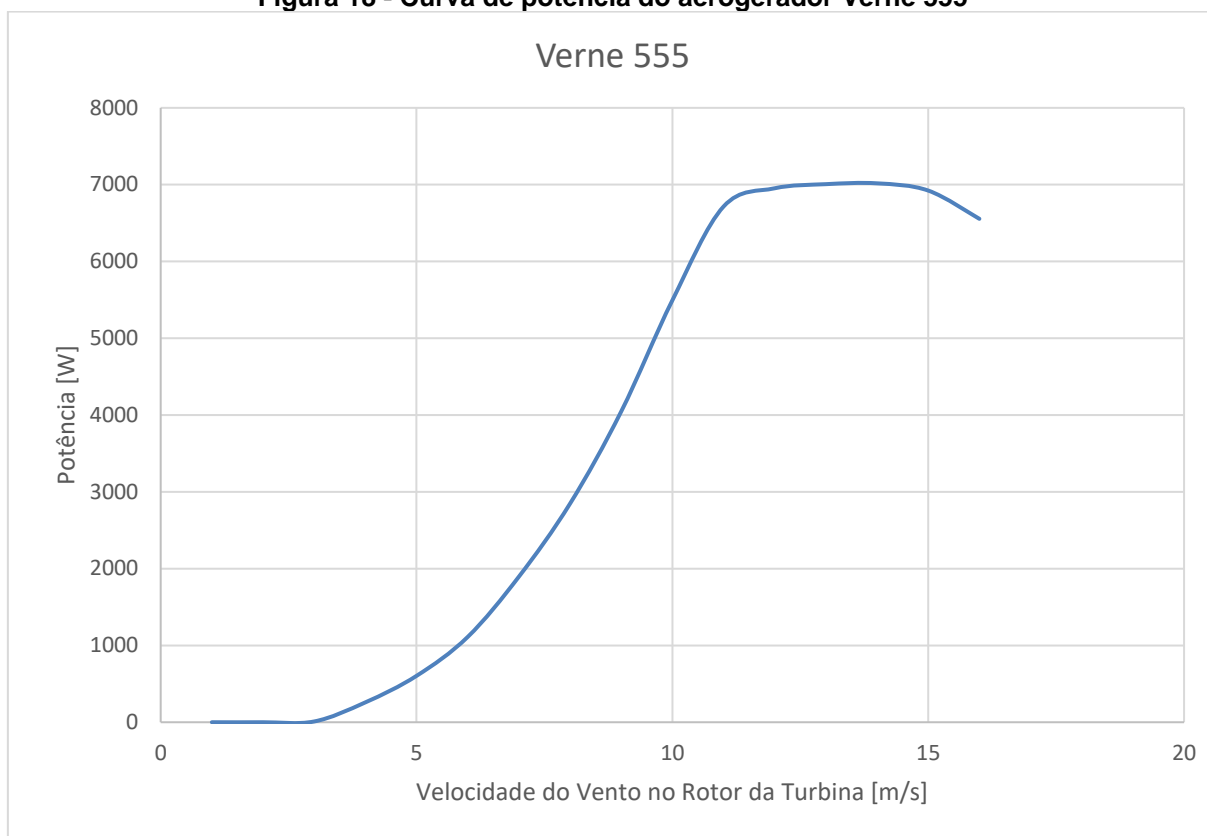


**Figura 16 - Curva de potência do aerogerador Notus 138**

Fonte: Enersud® (2018).

**Figura 17 - Curva de potência do aerogerador Gerar 246**

Fonte: Enersud® (2018).

**Figura 18 - Curva de potência do aerogerador Verne 555**

**Fonte: Enersud® (2018).**

A partir disso, utilizou-se a Equação (13) para obter os valores de geração anual para cada faixa velocidade e, conseqüentemente, realizou-se o somatório dos valores de geração de cada faixa de velocidade para assim obter a produção de energia anual total, como pode ser visto na Tabela 14 que segue:

**Tabela 14 – Produções de Energia Anual de diferentes aerogeradores**

<b>Aerogerador</b>	<b>Notus 138</b>	<b>Gerar 246</b>	<b>Verne 555</b>
<b>Potência Nominal [W]</b>	<b>420</b>	<b>1000</b>	<b>6000</b>
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Geração Anual [kWh]</b>		
<b>1</b>	-	-	-
<b>2</b>	-	-	-
<b>3</b>	-	0,95	5,59
<b>4</b>	1,39	17,04	192,95
<b>5</b>	14,19	54,95	521,69
<b>6</b>	35,04	127,23	1012,70
<b>7</b>	60,72	204,49	1685,26
<b>8</b>	85,97	315,60	2299,11
<b>9</b>	107,06	386,41	2777,49
<b>10</b>	119,97	400,34	3007,46
<b>11</b>	118,04	362,90	2753,80
<b>12</b>	107,19	290,53	2009,26
<b>13</b>	79,41	201,18	1342,53
<b>14</b>	46,98	107,40	838,99
<b>15</b>	16,19	34,34	486,01
<b>16</b>	3,66	9,60	254,19
<b>17</b>	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>795,79 [kWh]</b>	<b>2512,96 [kWh]</b>	<b>19187,03 [kWh]</b>

**Fonte: Autoria Própria.**

Com base nos dados da Tabela 14 acima, foi aplicada a Equação (16), obtendo-se os fatores de capacidade de cada um dos aerogeradores. Além disso, estes dados foram utilizados em conjunto com os dados de custo dos equipamentos da Tabela 13 para estabelecer relações entre custo dos equipamentos e energia efetivamente gerada, para assim verificar qual aerogerador é mais vantajoso, como mostra a Tabela 15 a seguir:

**Tabela 15 – Fatores de Capacidade e relações de R\$/kWh dos aerogeradores**

<b>Modelo</b>	<b>Notus 138</b>	<b>Gerar 246</b>	<b>Verne 555</b>
<b>Potência Nominal [W]</b>	420	1000	6000
<b>Geração Anual [kWh]</b>	795,79	2512,96	19187,03
<b>Valor do Equipamento</b>	R\$ 3.100	R\$ 7.500	R\$ 36.000
<b>Fator de Capacidade</b>	<b>22%</b>	<b>29%</b>	<b>37%</b>
<b>Relação R\$/kWh</b>	<b>3,90</b>	<b>2,98</b>	<b>1,88</b>

**Fonte: Aatoria Própria.**

Outro modo de se estimar a viabilidade dos aerogeradores é utilizar-se das razões de preço entre geradores e compará-los com as razões de geração entre geradores. Sabendo disso, obteve-se a Tabela 16 e a Tabela 17 que seguem:

**Tabela 16 – Razões de Preço entre geradores**

<b>Modelo</b>	<b>Notus 138</b>	<b>Gerar 246</b>	<b>Verne 555</b>
<b>Notus 138</b>	1,00	0,41	0,09
<b>Gerar 246</b>	2,42	1,00	0,21
<b>Verne 555</b>	11,61	4,80	1,00

**Fonte: Aatoria Própria.**

**Tabela 17 – Razões de Geração entre geradores**

<b>Modelo</b>	<b>Notus 138</b>	<b>Gerar 246</b>	<b>Verne 555</b>
<b>Notus 138</b>	1,00	0,32	0,04
<b>Gerar 246</b>	3,16	1,00	0,13
<b>Verne 555</b>	24,11	7,64	1,00

**Fonte: Aatoria Própria.**

Por fim, um fator tão importante quanto os anteriores é em quanto tempo o investimento em um aerogerador trará retorno, utilizando-se os valores de geração anual, tarifa da concessionária e o valor de reajuste desta.

Utilizando-se dos dados fornecidos pela Copel (2019) foi obtido um valor de tarifa convencional de R\$ 0,76897 por kWh, assim como os valores de reajuste em um período de 10 anos, resultando em um valor médio de 12,22%, como mostra a Tabela 18.

**Tabela 18 – Reajustes de tarifas**

Data do processo tarifário	Efeito médio para consumidor
23/06/2009	5,00%
24/06/2010	2,46%
24/06/2011	2,99%
24/06/2012	-0,65%
24/01/2013	-19,28%
24/06/2013	9,55%
24/06/2014	24,86%
02/03/2015	36,79%
24/06/2015	15,32%
24/06/2016	-12,87%
01/05/2017	5,85%
24/06/2018	15,99%
<b>Média</b>	<b>12,22%</b>

Fonte: Autoria Própria, com dados da COPEL (COPEL, 2019).

Logo, utilizando-se dos dados acima, foi calculada a economia de energia de cada aerogerador ao longo de cinco anos, como mostra a Tabela 19 abaixo:

**Tabela 19 – Economia de Energia**

Aerogerador	Notus 138	Gerar 246	Verne 555
Potência Nominal [W]	420	1000	6000
Energia Gerada Anualmente [kWh]	795,79	2512,96	19187,03
Valor do Equipamento [R\$]	3.100	7.500	36.000
Economia Total em 1 ano [R\$]	611,94	3.864,78	14.754,25
Economia Total em 2 anos [R\$]	1.298,64	8.201,69	31.310,88
Economia Total em 3 anos [R\$]	2.069,22	13.068,40	49.890,07
Economia Total em 4 anos [R\$]	2.933,94	18.529,62	70.738,89
Economia Total em 5 anos [R\$]	3.904,29	24.657,98	94.134,61
Economia Total em 6 anos [R\$]	4.993,18	31.534,98	120.388,34
Economia Total em 7 anos [R\$]	6.215,09	39.252,08	149.849,23

Fonte: Autoria Própria.

Com base nos dados obtidos na Tabela 15, nota-se que o aerogerador Verne 555 possui o maior Fator de Capacidade assim como a maior Relação R\$/kWh.

Além disso, como mostra a Tabela 16, embora as razões de preço entre o Verne 555 e os aerogeradores Notus 138 e Gerar 246 sejam altas, com custos respectivamente 11,61 e 4,80 maiores, as relações de geração entre eles mostradas na Tabela 17 é ainda maior, ou seja, o aerogerador Verne 555 produz 24,11 e 7,64 vezes mais do que os aerogeradores Notus 138 e Gerar 246. Sendo assim, desconsiderando-se os valores de consumo da produção de leite, o aerogerador Verne 555 é o mais indicado para a propriedade.

Entretanto, nota-se que o consumo da produção de leite indicado na Tabela 12 corresponde a um valor muito abaixo da capacidade de geração do aerogerador Verne 555, sendo que este possui capacidade de suprir aproximadamente a unidade consumidora inteira, incluindo as outras três residências da propriedade. Além disso, o cálculo de economia de energia da Tabela 19 indica que o aerogerador Gerar 246 consegue abater seu valor em dois anos, enquanto o aerogerador Verne 555 necessita de mais um ano para isso. Porém, o aerogerador Gerar 246 não atinge a capacidade de geração suficiente para suprir o consumo das cargas de produção de leite, correspondendo a apenas pouco mais de 30% deste consumo.

Por fim, o aerogerador Notus 138 não é viável em nenhuma situação, pois além de ser inferior ao Gerar 246 em todos os fatores, supre ainda menos o consumo das cargas e só possui retorno de investimento em aproximadamente cinco anos.

Vale ressaltar que os dados utilizados para retorno financeiro consideram apenas os custos dos aerogeradores, não levando em conta custos de instalação, infraestrutura e equipamentos adicionais. Além disso, outro ponto a se levar em consideração no cálculo de retorno é a tarifa, pois em muitos casos os consumidores rurais podem ter tarifas diferenciadas. Entretanto, para fins de comparação apenas entre geradores, foi utilizada a tarifa convencional.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer do trabalho, foram analisadas quais regiões são mais apropriadas para a implementação de um aerogerador em uma propriedade rural, sendo escolhida a região de Castro/Tibagi. A partir disso, foi realizado um estudo sobre as principais atividades da região, onde foi estabelecido que uma das bases desta região é a produção de leite. Sendo assim, informações de cargas e consumo foram obtidas de um estudo de caso e utilizadas a fim de simular uma propriedade de produção de leite na região.

A partir disso, foram extraídos dados dos ventos da região e estes foram cruzados com aerogeradores, com o propósito de estabelecer qual aerogerador seria mais apropriado para a utilização. No caso da propriedade em questão, que possui um consumo médio anual de aproximadamente 19135 kWh, o aerogerador Verne 555 se mostrou mais indicado, pois este possui propriedades como fator de capacidade e produção de energia muito acima dos outros aerogeradores, além de um tempo de retorno de investimento relativamente baixo.

Entretanto, devido a proximidade do consumo da propriedade ser muito próximo ao de geração, deve-se levar em consideração a possibilidade de este gerador tornar-se superdimensionado para a instalação proposta, resultando em maior injeção de energia na rede da concessionária do que consumo, sendo esta uma situação não benéfica.

Portanto, conclui-se que o aerogerador Verne 555 torna-se mais indicado para um caso de aumento de carga pois, devido a produção de leite corresponder a um consumo significativo da unidade consumidora, uma expansão na produção de leite impossibilitaria a situação em que a geração ultrapasse o consumo da propriedade. Além disso, esta expansão torna-se vantajosa pois também proporcionaria um aumento de produtividade e, conseqüentemente, lucratividade na propriedade.

Por fim, como sugestão para futuros trabalhos, um estudo mais aprofundado dos ventos no local, com dados obtidos experimentalmente seria interessante, visto que possibilitaria uma análise de erros em relação aos dados extraídos neste trabalho. Outra sugestão é a realização de experimentos práticos com os aerogeradores em questão que, assim como os dados dos ventos, permitiria um comparativo entre os valores calculados e práticos.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Kauê Ramai Moura. **PROJETO MECÂNICO DE UM AEROGERADOR DARRIEUS PARA GERAÇÃO RESIDENCIAL DE ENERGIA EM AMBIENTE URBANO**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AMARAL, L. A.; ROMANO, A. P. M.; NADER FILHO, A.; ROSSI JÚNIOR, O. D. Qualidade da água em propriedades leiteiras como fator de risco à qualidade do leite e à saúde da glândula mamária. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 71, n. 4, p. 417-421, 2004.

AMARANTE, O. A.; et al. Atlas do potencial eólico brasileiro. In: **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Ministerio de Minas e Energia Eletrobras, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **BIG - BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO**. Brasília, DF: ANEEL. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cf> m. Acesso em 11 jun. 2018.

CAMELO, H. N.; MARIA, P. H. S.; CARVALHO, P. C. M.; PEREIRA, T. B. **Métodos de Extrapolação de Velocidade do Vento para Regiões Litorâneas do Nordeste Brasileiro**. Xvi Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada**; Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa, Portugal, 2009.

CEBOLO, A. S. Comercialização com Fonte de Energia Eólica. **Encontro Internacional de Energia Eólica, Natal, RN, 2005**.

CHESF-BRASCEP, 1987. **Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário/Tecnologia. Energia Eólica**. V.1 De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento, Rio de Janeiro.

Coordenadas 24°50'47.0"S 50°16'31.0"W, **Google Maps**. Disponível em: [https://www.google.com.br/maps/place/24°50'47.0"S+50°16'31.0"W](https://www.google.com.br/maps/place/24°50'47.0). Acesso em 30 out. 2018.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Taxas e Tarifas**. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/tarifas/>. Acessado em 27 de Mai de 2019.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, mar. 2005

CRESESB, **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - Simulador**. Disponível em [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico). Acesso em 30 out. 2018.

Darrieus vertical axis wind turbine. **ECOSOURCES**. Disponível em: [https://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus\\_vertical\\_axis\\_wind\\_turbine](https://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus_vertical_axis_wind_turbine). Acesso em: 15 out. 2018.



DUTRA, R. Energia eólica—princípios e tecnologia. **Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Britto**, 2008.

EMBRAPA GADO DE LEITE. **Informações técnicas – Estatísticas do leite. 2016**. Disponível em <http://www.cnp.gl.embrapa.br>. Acesso em 17 out. 2018.

ENERSUD. **Lista de Produtos Enersud®**. Disponível em <http://www.enersud.com.br>. Acesso em 13 de Mai. de 2019.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2017: Ano Base 2016. **EPE, Rio de Janeiro**, 2016

Food and Agriculture Organization of the United Nations, **MARKET MONITORING – MILK AND MILK PRODUCTS**. Disponível em [http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM\\_MARKETS\\_MONITORING/Dairy/Documents/FO\\_Dairy\\_Nov17.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Dairy/Documents/FO_Dairy_Nov17.pdf). Acesso em 17 out. 2018.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 2008.

História, **Centro Cultural Castrolanda**. Disponível em: <http://www.moinhocastrolanda.com.br/historias/centro-cultural-castrolanda-10>. Acesso em 17 out. 2018.

IPARDES. **Agropecuária cresceu 11,5%, melhor resultado em quatro anos**. 2018. Disponível em: [http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg\\_conteudo=1&cod\\_noticia=927](http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg_conteudo=1&cod_noticia=927). Acesso em: 11 jun. 2018.

IPARDES. **Caderno Estatístico Município de Castro**. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=84160>. Acesso em 18 out. 2018.

KUMARA, E. A. D.; HETTIARACHCHI, N.; JAYATHILAKE, R. **Overview of the Vertical Axis Wind Turbines**, 2017.

MAIA, G. B. S.; et al. Produção leiteira no Brasil. **BNDES Setorial**, n. 37, mar. 2013, p. 371-398, 2013.

MAIA, Guilherme Baptista da Silva et al. Produção leiteira no Brasil. **BNDES Setorial**, n. 37, mar. 2013, p. 371-398, 2013.

MENDONÇA; I. M.; CASTRO J. L.; FRACETTI, T.P. **GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA: ESTUDOS DE VIABILIDADE VIA ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VELOCIDADE DOS VENTOS**. 2017.

MIGLIAVACCA, A.; SCARTAZZINI, L. S. **A Energia Solar Aplicada à Atividade Leiteira em Pequena Propriedade do Sul do Brasil**. Universidade de São Paulo, 2015.

NERO. **Leite cru de quatro regiões leiteiras brasileiras: Perspectivas de atendimento dos requisitos microbiológicos estabelecidos pela Instrução Normativa 51**, Campinas, 2005

**PAÍS PODERÁ VIVER DRAMA CLIMÁTICO EM 2040, INDICAM ESTUDOS DA PRESIDÊNCIA. OBSERVATÓRIO DO CLIMA.** Disponível em: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/pais-podera-viver-drama-climatico-em-2040/>. Acesso em: 12 jun. 2018.

PARIZOTTO, R. R.; et al. Análise e viabilidade técnica de implantação de aerogeradores eólicos de pequeno porte em residências. **Acta Iguazu**, v. 1, n. 4, p. 55-64, 2012.

PAVINATTO, E. F. Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica. **Electrical Engineering Master Thesis. COPPE/UFRJ**, 2005.

PEREIRA, R. S.; GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2010. Série Sustentabilidade Vol. 4. Gestão & Regionalidade, v. 27, n. 79, 2011.

PINTO, M. O. **Fundamentos de energia eólica**. Grupo Gen-LTC, 2013.

Produtos de Energia Eólica. **Eletrovento**. Disponível em: <https://eletrovento.com.br/produto/categoria/energia-eolica>. Acesso em: 02 nov. 2018.

REIS, J. M. V. S. **Comportamento dos Geradores Eólicos Síncronos com Conversores Diante de Curto-Circuitos no Sistema**. 2013. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Coppe, UFRJ, Rio de Janeiro.

REN21, **Renewables. Global Status Report, 2018**. 2018.

RESENDE, F. O. **Evolução tecnológica dos sistemas de conversão de energia eólica para ligação à rede**. 2011.

**RESUMO EXECUTIVO BRASIL 2040**. GOVERNO FEDERAL. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80182/BRASIL-2040-Resumo-Executivo.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2018.

SANTOS, T.; et al. **Belo Monte: Impactos sociais, ambientais, econômicos e políticos**, v. 13, n. 2, p. 214-227, 2012.

SCHULTZ, D. J. ; et al. **Atlas do potencial eólico do Estado do Paraná**. Curitiba: Agência Nacional de Energia Elétrica-Copel, 2007.

Série Energia e Sustentabilidade - Energias Renováveis - **Nota Técnica DEA 10/17 – ONS 44/2017 – CCEE 21/2017 - 1ª Revisão Quadrimestral (2017) produzida pela EPE juntamente com a ONS**. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE\\_389438](https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_389438). Acesso em: 11 jun. 2018.

SQUAREZI FILHO, A. J. CARDOSO, J. G.; **Energia Eólica: Tipos de Geradores e Conversores Usados Atualmente**; IEEE; 2014

SILVA, E. R. R. G. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal**. Rio de Janeiro, 2014.

SOUZA, R. **Atividade leiteira em Castro alavanca economia regional**. 2018. Disponível em: <http://d.aredo.info/campos-gerais/225732/atividade-leiteira-em-castro-alavanca-economia-regional>. Acesso em: 28 out. 2018.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. McGraw-Hill do Brasil, 1974.

SULINOX. **Manual do Proprietário – Tanque Refrigerador de Leite a Granel, 1992**. Castro/PR. Disponível em: [http://sulinox.com/manuais/Resfriador\\_de\\_Leite.pdf](http://sulinox.com/manuais/Resfriador_de_Leite.pdf). Acesso em: 15 mai. 2019.

TIBOLA, G. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009.

**Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica**, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Equipe CEP/CRESESB, 2008. Disponível em [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=231](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231). Acesso em 30 out. 2018.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. CENERGIA, COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia, UFRJ-Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL / ON-SHORE. **ARCHIEXPO**. Disponível em: [http://www.archiexpo.com/pt/prod/windside/product-88530-959470.html#product-item\\_1575773](http://www.archiexpo.com/pt/prod/windside/product-88530-959470.html#product-item_1575773). Acesso em: 15 out. 2018.

VITORINO, Cássia Resende Silva. **Modelagem dinâmica de caixa multiplicadora de velocidades de aerogeradores**. 2012.