

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SUZANY MENDES MOTA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO DA REGIÃO DO NORTE  
PIONEIRO DO PARANÁ**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2019**

**SUZANY MENDES MOTA**

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO DA REGIÃO DO NORTE  
PIONEIRO DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica – DAELE -, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2019**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Cornélio Procópio  
Departamento Acadêmico de Elétrica  
Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Suzany Mendes Mota**

### **ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO DA REGIÃO DO NORTE PIONEIRO DO PARANÁ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:00hs do dia 29/11/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Rafael Rorato Londero - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

## RESUMO

MOTA, Suzany Mendes. Análise Do Potencial Eólico Da Região Do Norte Pioneiro Do Paraná. 2019. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

O Brasil possui um grande potencial de geração eólica e o estudo desse recurso é muito importante para o avanço da produção de energia eólica no país. Este trabalho busca analisar o potencial eólico da região do Norte Pioneiro do estado do Paraná. Por meio de uma ferramenta computacional, são feitos os tratamentos dos dados, determinação dos parâmetros de Weibull e cálculo da energia anual gerada juntamente com o fator de capacidade considerando um aerogerador de 2,35 MW e alturas de 10 e 100 metros para as cidades de Japira, Joaquim Távora e Nova Fátima.

**Palavras-chave:** geração de energia eólica; potencial eólico; matriz energética; Paraná.

## ABSTRACT

MOTA, SUZANY. Evaluation of The Wind Resource in “Norte Pioneiro” Zone in State of Paraná. 2019. 54 f. Undergraduate thesis (Electrical Engineering). Federal Technology University - Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

Brazil has a great wind resource and studying it is very important for the development of the wind energy generation in the country. This paper evaluates the wind resource in the “Norte Pioneiro” Zone in State of Paraná. Using a numerical computational tool, data processing, determination of Weibull parameters, annual delivered energy and capacity factor were calculated, considering a 2.35MW wind turbine and heights of 10 and 100 meters in the cities of Japira, Joaquim Távora and Nova Fátima.

**Keywords:** wind energy generation; wind resource; energy matrix, Paraná.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nova Potência Instalada por estado 2017	24
Tabela 2 - Geração e Representatividade da Fonte Eólica	24
Tabela 3 - Leilões de energia eólica	28
Tabela 4 – Classificação de rugosidade (continua)	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 5 – Resultados de k, c e Velocidade média	43
Tabela 6 - Resultados de k, c e Velocidade média com dados extrapolados do Atlas Eólico Brasileiro	44
Tabela 7 – Resultados de Potência Gerada e Fator de Capacidade (continua)	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Mundial do ano de 2016	10
Figura 2 - Matriz energética brasileira atual	11
Figura 3 - Representação do Sistema Interligado Nacional de 2017	12
Figura 4 - Desenho esquemático de uma turbina eólica moderna	22
Figura 5 - Evolução da Capacidade Instalada em 2017 (MW)	23
Figura 6 - Mapa do Potencial Eólico Brasileiro a 100 m de Altura	25
Figura 7 - Mapa do Potencial Eólico Paranaense a 100 m de Altura	26
Figura 8 - Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica	29
Figura 9 - Complementaridade solar e eólica diariamente (melhor hipótese)	30
Figura 10 - Complementaridade solar e eólica anualmente	30
Figura 11 - Foto do Aerogerador E-92	32
Figura 12 - Estação meteorológica de superfície automática Japira-A871	33
Figura 13 - Fluxograma do Algoritmo de Programação	35
Figura 14 - Velocidade Média Sazonal de Velocidade do Vento a 50 m de Altura na Cidade de Japira	39
Figura 15 - Velocidade Média Sazonal de Velocidade do Vento a 50 m de Altura na Cidade de Joaquim Távora	39
Figura 16 - Velocidade Média Sazonal de Velocidade do Vento a 50 m de Altura na Cidade de Nova Fátima	40
Figura 17 - Série Temporal da Velocidade do Vento da Cidade de Nova Fátima (10 m)	41
Figura 18 - Direção e Intensidade do Vento na Cidade de Nova Fátima a 10 m	41
Figura 19 - Distribuições Extraídas da Série Temporal da cidade de Nova Fátima (10 m)	42
Figura 20 - Funções Densidade de Probabilidade e Distribuição Acumulada de Weibull (10 m) Fonte: Autoria Própria	43

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
CBEE	Centro Brasileiro De Energia Eólica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
1.1	TEMA	8
1.2	PROBLEMA	8
1.3	OBJETIVOS	8
1.4	MÉTODO DA PESQUISA	9
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>10</b>
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	10
2.2	SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	11
2.2.1	Sistema Interligado Nacional (SIN)	12
2.3	DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	13
2.4	ENERGIA EÓLICA	17
2.4.1	Produção de Energia Eólica	18
2.4.2	Recurso Eólico: Vento	18
2.4.3	Energia do vento disponível	20
2.4.4	Caracterização do Sistema Físico do Gerador Eólico	21
2.5	CAPACIDADE INSTALADA E POTENCIAL EÓLICO NO BRASIL	23
2.5.1	Potencial Eólico Paranaense	25
2.6	COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA	27
2.7	GERAÇÃO COMPLEMENTAR	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
3.1	DADOS	31
3.1.2	INMET	33
3.1.3	Atlas do Potencial Eólico Brasileiro	34
3.2	MATERIAIS	34
3.2.1	MATLAB	34
3.3	MÉTODOS DE CÁLCULO	35

3.3.1	Extrapolação dos Dados do Vento .....	35
3.3.2	Extrapolação dos Parâmetros Estatísticos de Weibull.....	37
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO E RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
4.1	ANÁLISE DO REGIME DOS VENTOS NAS REGIÕES.....	39
4.2	TRATAMENTO DE DADOS.....	40
4.2.1	Determinação dos fatores $k$ e $c$ .....	43
4.2.2	Potencial eólico.....	44
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICE A – Curvas de Potência da Turbina para 10 m de Altura.....</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE B – Histogramas das Médias de Velocidade de Vento a 10 m de Altura (Comparação) .....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da demanda de energia elétrica, intrínseco ao desenvolvimento econômico dos países exigem ampliação dos investimentos em produção de energia. Porém, atual crise ambiental também se faz relevante. Nas gerações convencionais, níveis alarmantes de poluentes são lançados na atmosfera diariamente assim como fauna e flora são degradadas. Esses fatores revelam a necessidade de encontrar formas mais limpas e sustentáveis de gerar energia, e ainda sim acompanhar o crescimento econômico e o desenvolvimento social.

As fontes alternativas de energia, utilizando-se de métodos limpos e fontes renováveis e desenvolvimento de tecnologias para o aumento da capacidade de produção energética desses novos métodos apresenta-se como uma ótima solução para tais questões.

No Brasil, a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) pela Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei n.º 10.762, de 11 de novembro de 2003, estimulou os investimentos em fontes alternativas, renováveis de energia, dentre elas, os sistemas de geração eólica.

Energia eólica é, em síntese, a energia cinética contida nos ventos. O vento rotaciona as hélices, que estão conectadas a um gerador, produzindo energia.

Os recentes avanços tecnológicos no que se referem a aerodinâmica, controle e operação das turbinas, controle de variações de tensão, capacidade de produção, reduziram significativamente os custos dos equipamentos e que associado a maior capacidade de produção, fez com que a geração de energia eólica se tornasse cada vez mais viável e vantajosa.

O presente trabalho busca abordar as questões referentes ao potencial eólico do Brasil em geral e do estado do Paraná, assim como apresenta um estudo da determinação de parâmetros eólicos e estimativa do potencial energético de três cidades do Norte Pioneiro do Paraná.

## 1.1 TEMA

Este trabalho busca abordar aspectos da produção de energia eólica com o objetivo de fomentar o estudo do recurso eólico e o desenvolvimento de projetos para a sua exploração na região do Norte Pioneiro do estado do Paraná.

## 1.2 PROBLEMA

Os poucos pontos de coleta de dados disponíveis e a baixa qualidade dos mesmos na região e no restante do estado.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem o intuito de determinar o potencial energético eólico de três cidades da região do Norte Pioneiro do estado do Paraná por meio o software MATLAB, com dados retirados do Instituto Nacional de Meteorologia e utilizando como comparativo, dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) disponibilizado pela CEPEL.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar as formas de obtenção dos parâmetros eólicos necessários para estimativa de potencial;
- Desenvolver um algoritmo capaz de realizar todo o projeto eólico;
- Comparar e discutir os resultados.

## 1.4 MÉTODO DA PESQUISA

Este trabalho apresenta um estudo exploratório e explicativo que possibilita analisar os resultados e chegar a conclusões por meio de conhecimento teórico. Utiliza-se, essencialmente, abordagens quantitativas fundamentadas por embasamento teórico de referências bibliográficas. Também, faz-se o uso de ferramenta de computação numérica para análise de dados estatísticos e gráficos.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está disposto em cinco capítulos. A introdução e apresentação do tema estão apresentados no capítulo 1, assim como a delimitação do tema, objetivos e metodologia.

No capítulo 2, desenvolvimento, apresenta-se toda a fundamentação teórica necessária para a elaboração deste trabalho. Foram expostos conceitos de energia renovável e eólica; a conjuntura da matriz energética no Brasil e no mundo; a capacidade instalada de usinas eólicas e o potencial eólico de todo o país e do Estado do Paraná; possibilidades de cogeração com usinas hidrelétricas e solares; e métodos de cálculo de produção energética e parâmetros de Weibull.

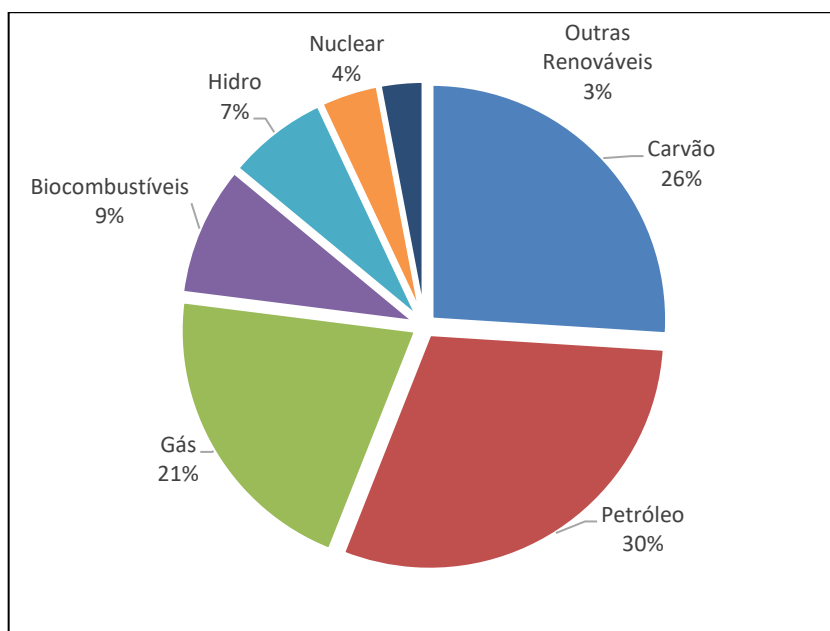
O capítulo 3 aborda a metodologia em que se baseou o trabalho, mostrando a origem dos dados e complementação dos métodos de cálculo.

O capítulo 4 apresenta os resultados e as observações sobre cada um deles e no capítulo 5 as conclusões. Finalmente, foram apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho e os apêndices.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Cada país define sua matriz energética de acordo com a disponibilidade de recursos energéticos disponíveis, do conhecimento e domínio sobre eles. Hoje, a matriz energética mundial ainda tem como sua principal fonte de energia os combustíveis fósseis tais como petróleo, carvão mineral, gás natural, como mostra a Figura 1.

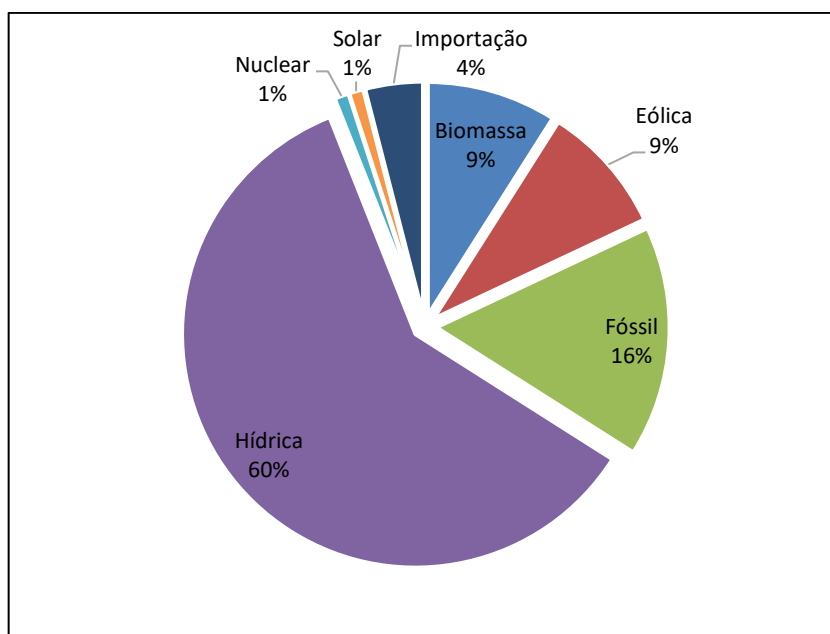


**Figura 1 - Matriz Energética Mundial do Ano de 2017**  
Fonte: IEA, 2017 (Adaptado)

Analisando o gráfico, nota-se que apenas 12% da energia ofertada do mundo provem de fontes renováveis de energia, enquanto mais de 80% tem como fonte combustíveis fósseis.

No que diz respeito à matriz de energia elétrica brasileira, é notável o crescimento da produção de energia renovável, sobretudo a eólica. Porém esse

número ainda é muito pequeno para o potencial que o país oferece. Apenas 9% da energia produzida no Brasil é de geração eólica, como apresentado na Figura 2.



**Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira Janeiro/2019**  
**Fonte: ANEEL, 2019 (Adaptado)**

Assim como mencionado anteriormente, devido à grande disponibilidade de rios de planície, ideais para a instalação de usinas hidrelétricas, é natural que no Brasil predomine esse tipo de geração. Porém, é eminente o avanço do potencial instalado das novas fontes que já somam 18% de todo potencial energético. E a previsão é que esse número aumente cada vez mais. Segundo dados da ABBEólica (2019) até 2023 serão 19,39 GW instalados em território brasileiro.

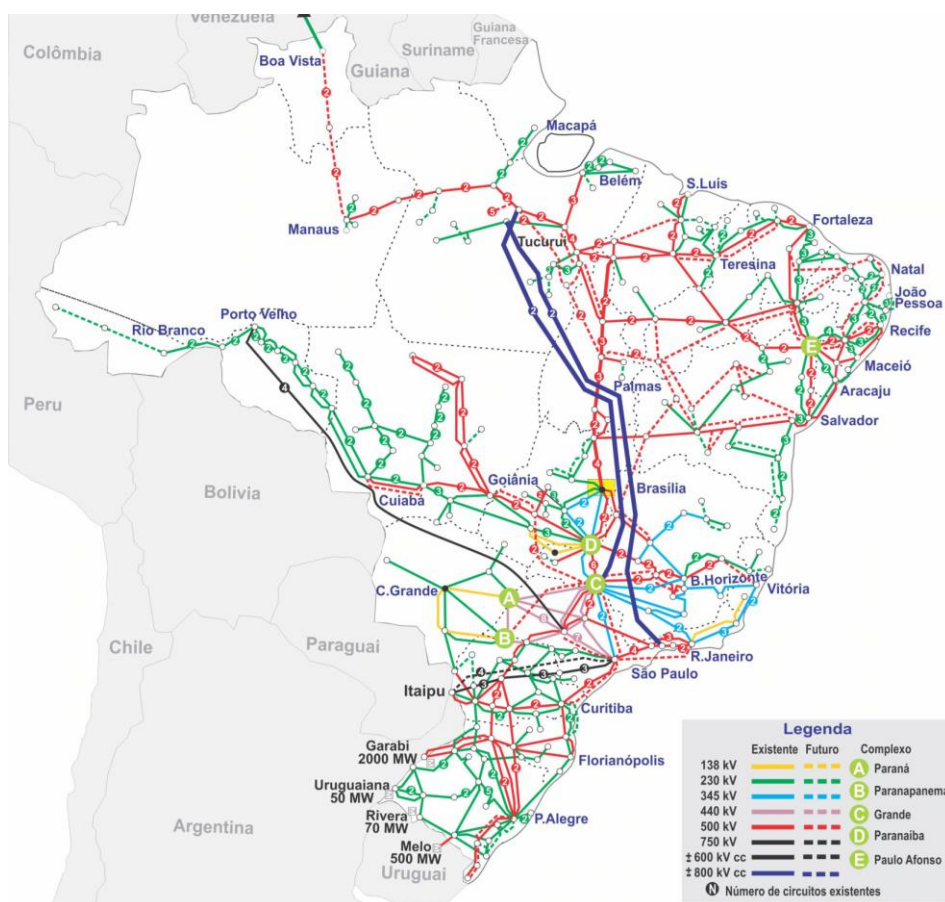
## 2.2 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O Sistema Elétrico Brasileiro é hidrotérmico composto, predominantemente hídrico. A operação do sistema deve manter o equilíbrio de oferta e demanda de energia gerenciando usinas de modo a minimizar os custos operativos. Em sistemas compostos como o brasileiro, concentram-se as estratégias de operação no correto gerenciamento do volume de água armazenado nos reservatórios do sistema.

### 2.2.1 Sistema Interligado Nacional (SIN)

O SIN é o sistema de geração e transmissão de energia elétrica do Brasil, com perfil basicamente hidrotérmico, mas com predominância absoluta de usinas hidrelétricas. É um sistema de grande porte que abrange as suas cinco regiões, porém é dividido em quatro subsistemas: Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste, Sul e Norte. Pelo grande porte e robustez, o sistema interligado do Brasil é único em suas características em relação a outros sistemas no mundo.

Esse sistema integra 96,6% da capacidade de produção de eletricidade do país, estando de fora, apenas pequenos sistemas isolados, principalmente da região amazônica. Atualmente a Rede Básica do SIN conta com mais 140.000 km de linhas de transmissão, ilustradas na Figura 3 e abrange subestações, linhas de transmissão em tensões de 230 kV e superiores.



**Figura 3 - Representação do Sistema Interligado Nacional Setembro/2019**  
 Fonte: ONS, 2019 (Adaptado)



Essa ampla rede interligada, promove a transferência de energia entre regiões e permite manobras de transmissão para a cobertura da demanda e oferta de energia elétrica em quase todo o Brasil. Com isso, explora-se principalmente o potencial das 12 bacias hidrográficas, nas diferentes regiões, evitando assim, os eventuais acionamentos de controle de demanda da geração térmica.

Segundo a ABEEólica, atualmente 601 usinas eólicas operam no Brasil, com uma capacidade instalada de 15 GW. A ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica aponta que há aproximadamente 111 empreendimentos similares em construção com uma potência outorgada de 2,5 GW e 95 com construção não iniciada com potência outorgada de 2 GW. Além disso, houve um crescimento de 26,5% da geração de energia eólica em operação comercial do SIN entre os anos de 2016 e 2017 (CCEE, 2018).

### 2.3 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Em 1951, o físico W. Weibull publicava seu artigo em que apresentava a distribuição de probabilidade, que posteriormente levaria seu nome, baseando-se nos estudos sobre a resistência de aços. Esse recurso aplica-se na Análise da Confiabilidade pois permite representar falhas típicas de partida, falhas devido a desgaste, falhas aleatórias, além de uma representação gráfica simples.

Para estudos eólicos, a distribuição de Weibull costumava ser aplicada apenas para representação da distribuição das velocidades de vento. Com o tempo, notou-se que essa distribuição fornecia uma ótima precisão na descrição das circunstâncias do vento. Mais especificamente Hennessey (1997), constatou uma grande relação entre os momentos da velocidade do vento e os parâmetros  $k$  e  $c$ , em que, para se estimar o potencial energético do vento são necessárias as informações de velocidade média do vento e desvio padrão da série temporal.

A distribuição de Weibull obedece a seguinte equação:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

onde  $c$  é o parâmetro de escala [ $m \cdot s^2$ ] e positivo,  $k$  é o parâmetro de forma, adimensional e positivo e  $V$  é a velocidade do vento em [ $m/s$ ].

A função distribuição acumulada, apresentada abaixo, indica a probabilidade de se encontrar um valor de velocidade entre 0 e  $V$ :

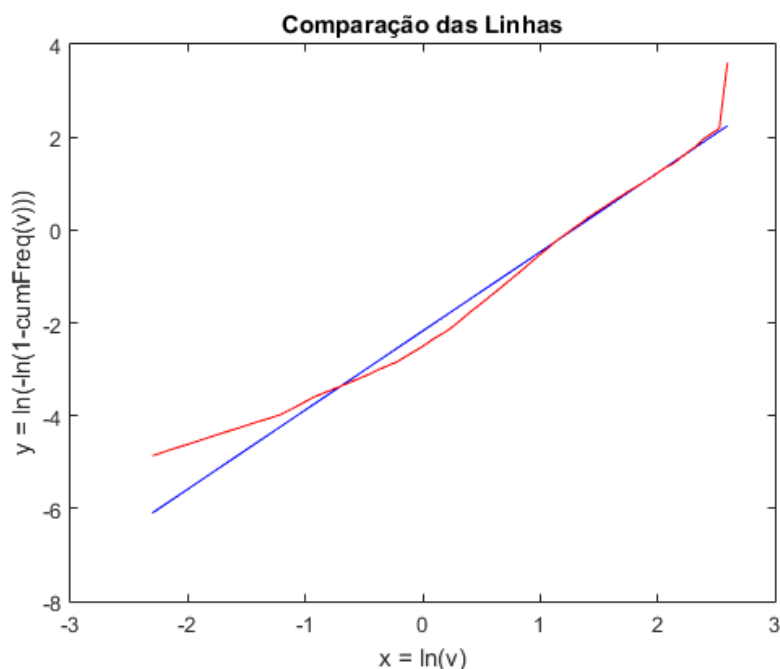
$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Para determinar os valores dos parâmetros  $k$  e  $c$  é preciso fazer o ajuste mediante o método de regressão linear (Touré, 2005; Castañeda *et al.*, 2013). Para isso faz-se  $1 - F(V)$  e aplica-se logaritmos neperianos duas vezes como mostra a equação a seguir:

$$\ln[-\ln(1 - F(V))] = k \ln(V) - k \ln(c) \quad (3)$$

Pelo método de gráfico, pode-se notar que a equação resultante a equação é linear e pode ser ajustada utilizando o método dos mínimos quadrados considerando uma reta de coeficiente angular  $a$  e coeficiente linear  $b$  (Equação 4), obtendo assim uma curva linearizada e a reta ajustada como na Figura 5.

$$y = a \cdot x + b \quad (4)$$



**Figura 4 - Curva Linearizada e Reta Ajustada para Dados de Nova Fátima**  
**Fonte: Autoria Própria**

Por fim, o ajuste linear e, portanto, os valores dos parâmetros se dão pelas seguintes equações:

$$y = \ln[-\ln(1 - F(V))] \quad (5)$$

$$a = k \quad (6)$$

$$x = \ln(V) \quad (7)$$

$$b = -k + \ln(c) \quad (8)$$

O fator  $k$  define a forma da curva da distribuição de Weibull e revela o comportamento do vento. Quanto maior o valor de  $k$ , maior será a regularidade dos ventos em termos de velocidade e mais estreita será a curva de distribuição. O parâmetro  $c$ , por sua vez, é o fator característico da distribuição (Castro, 2004).

### 2.3.1 Método dos Momentos

O método dos momentos foi introduzido por Justus e Mikhail (1978) e é baseado na velocidade média do vento e o desvio padrão levando em consideração os dados da série temporal.

$$v_m = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N v_i \quad (9)$$

Em que  $v_m$  é a velocidade média do vento [m/s],  $i$  é o número da observação da velocidade do vento, e  $N$  é o total de observações.

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{1}{N-1}\right] \sum_{i=1}^N (v_i - v_m)^2} \quad (10)$$

Onde  $\sigma$  é o desvio padrão das velocidades do vento.

Por fim, os fatores  $k$  e  $c$  são obtidos pela iteração numérica das equações (9) e (10), sendo assim apresentados nas equações (11) e (112).

$$k = \left[ \left( \frac{0,9874}{\frac{\sigma}{v_m}} \right) \right]^{1,0983} \quad (11)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left[1+\left(\frac{1}{k}\right)\right]} \quad (12)$$

Em que a função gama é dada pela expressão (13).

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} \exp^{-y} dy \quad (13)$$

Onde (14), (15) e (16):

$$y = \left(\frac{v}{c}\right)^k \quad (14)$$

$$\left(\frac{v}{c}\right) = y^{x-1} \quad (15)$$

$$x = 1 + \left(\frac{1}{k}\right) \quad (16)$$

## 2.4 ENERGIA EÓLICA

Energia eólica consiste na energia cinética das massas de ar em movimento (vento). O vento passa pelas hélices, promovendo um movimento de rotação, que com a presença das turbinas, ou aerogeradores produzem energia elétrica.

Este conceito existe desde meados do século X, onde a energia dos ventos era utilizada para bombeamento de água, através de moinhos de vento. Na década de 70, com a crise do petróleo que disparou o preço do barril, surgiu o interesse em fontes alternativas de energia. Atrelado ao início do pensamento ecológico, as fontes renováveis de energia se tornaram o foco dos investimentos e pesquisas da área. Com isso, a retomava-se as aplicações de energia eólica.

Posteriormente, com os avanços tecnológicos, sobretudo a eletrônica, foi possível o desenvolvimento de aerogeradores cada vez mais eficientes, utilizados em sistemas de grande porte. Desde então, principalmente em países como Estados Unidos, Alemanha e Suécia tem sido comum a instalação de parques eólicos, com uma larga produção de energia.

No Brasil, a exploração de energia eólica começou em 1992 com a instalação do primeiro aerogerador de grande porte, associado ao sistema com um gerador diesel no arquipélago de Fernando de Noronha. O sistema híbrido resultou numa economia de 10% no consumo de diesel. Logo depois, outros estados como Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Norte seguiram o exemplo.

Porém o verdadeiro incentivo teve início somente em 2002, após a criação do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica),

instituído pela Lei n.º 10.438, e revisado pela Lei n.º 10.762, de 11 de novembro de 2003, programa que buscava diversificar a matriz energética do país por meio de fontes alternativas de energia. Dentre outras, viabilizou o crescimento da produção eólica no Brasil, por meio de incentivos e medidas tomadas para facilitar esses projetos. Mesmo sendo medidas recentes (implantadas em 2012), um grande avanço foi a concepção dos leilões específicos de energia renovável, consolidando esse produto no mercado.

Com os leilões e tantas outras progressões, foi necessário alterar alguns valores organizacionais no Setor Elétrico Brasileiro resultando num novo modelo do setor elétrico brasileiro, que em relação ao modelo anterior, trouxera grandes impactos nas operações correntes do setor à curto, longo e médio prazo. A alteração mais significativa foi a criação de novos agentes institucionais, impactando diretamente no planejamento, regulamentação, pela fiscalização e pelo monitoramento do setor.

#### 2.4.1 Produção de Energia Eólica

Para analisar a produção de energia eólica e a viabilidade de sua instalação em determinada área, é necessário fazer dois estudos distintos. O primeiro, de “recurso eólico”, ou seja, comportamento dos ventos no que diz respeito ao tempo, direção e sentido, na localidade desejada. O segundo se refere aos aspectos construtivos e o processo físico da geração de energia.

#### 2.4.2 Recurso Eólico: Vento

O vento nada mais é que o movimento das massas de ar. Como recurso para produção de energia, classifica-se como uma fonte primária, renovável e inesgotável. Uma desvantagem dessa fonte é a sua variação de acordo com o tempo, resultando numa produção não uniforme. No entanto já existem tecnologias que se adaptam a essa irregularidade para não prejudicar o sistema.

Os ventos se originam das diferenças de pressão causadas pela variação de temperatura entre as camadas do ar. Quando uma massa de ar de baixa temperatura (alta pressão) se move em direção a uma região de alta temperatura (baixa pressão), provocam-se ventos.

Por dependerem dos fatores temperatura e pressão, os ventos não são constantes. Apesar de se fazer presente em todos os lugares, o vento varia de acordo com a época do ano e o passar do dia, tornando-o uma fonte variável no tempo; e de acordo com a superfície terrestre, ou seja, fonte variável no espaço.

A fim de prever o comportamento dos ventos numa determinada área, estuda-se o chamado “regime dos ventos” a partir de dados coletados periodicamente no local desejado.

Fatores que influenciam no regime dos ventos são:

- Variação da velocidade devido à altura;

Há variação de velocidade do vento de acordo com a altura, então é necessário determinar a camada limite atmosférica para que as turbinas sejam instaladas numa altura em que não estejam sujeitas a turbulências.

- Rugosidade do terreno;

É formada por um grupo de fatores, sendo eles árvores, arbustos, vegetação rasteira e construções sob a superfície, determinada pela altura e distribuição de seus elementos. Quanto mais densa e alta for sua formação, maior a rugosidade e maior a dificuldade de deslocação do vento.

- Presença de obstáculos na região ao redor;

Esse tipo de obstáculo pode alterar a velocidade e a trajetória do vento.

- Relevo.

Quanto pior e mais irregular o terreno, mais difícil é para o vento se deslocar.

Em costas de oceanos e lagos há um fenômeno muito similar aos ventos: as brisas. O surgimento das brisas parte do mesmo princípio. A diferença de temperatura entre terra e água causa diferença de pressão e movimento de massas de ar. Durante o dia, a brisa marinha se dá porque o ar sobre a água demora mais pra esquentar do que o ar sobre a terra fazendo com que a brisa corra da água para a terra. O processo contrário chama-se brisa terrestre.

### 2.4.3 Energia do vento disponível

A potência disponível ( $P_d$ ) no vento de velocidade  $v$  pode ser calculada pela seguinte equação:

$$P_d = k v^3 \quad (17)$$

onde  $k = \frac{1}{2} \rho A$ , em que  $\rho$  é a massa específica do ar [ $kg/m^3$ ] e  $A$  é a área do rotor da turbina eólica [ $m^2$ ].

Porém, um aerogerador não consegue extrair toda a energia disponível no vento. Na turbina, a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do motor é chamado de coeficiente de potência ( $C_p$ ). Este conceito foi apresentado pelo físico alemão Albert Betz em 1927, cujo também indicou que o limite máximo de  $C_p$  é 0,59, ou seja, que o máximo aproveitamento eólico num escoamento permanente nunca ultrapassaria os 59%.

A potência mecânica gerada pelo aerogerador, depende de vários fatores, mas o modelo geralmente utilizado para estudos elétricos é apresentado nas Equações (18) e (19) (PAVIANATTO, 2005).

$$P_g = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (18)$$

Com:

$$\lambda = R \omega_{wt} / v \quad (19)$$

Onde  $C_p$  é o coeficiente de potência do aerogerador;  $\lambda$  é a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);  $\beta$  é o ângulo de passo das pás (*pitch*) do aerogerador  $\omega_{wt}$  é a velocidade angular da aerogerador [ $rad/s$ ];  $R$  é o raio da aerogerador [ $m$ ].



Com a curva de potência do gerador eólico e a distribuição de Weibull do vento da região, é possível calcular a energia para um determinado período de tempo por meio da Equação (20) (IEC 61400-12-1,2005).

$$E = T \sum_{i=1}^n \{ [F(v_i) - F(v_{i-1})] [P_{i-1} + P_i / 2] \} \quad (20)$$

Em que  $E$  é a produção anual de energia elétrica [ $Wh$ ];  $T$  é o número de horas do período (8760 horas para a estimativa anual);  $F(v_i)$  função probabilidade cumulativa de Weibull para a classe de velocidade do vento; e  $P_i$  é a potência fornecida pela curva de potência para a velocidade de vento [ $W$ ].

Com isso, pode-se determinar outro parâmetro importante em um projeto eólico: o fator de capacidade. Esse fator se refere à proporção entre a produção efetiva da usina e a capacidade nominal daquele projeto em um período de tempo.

$$FC = \frac{P_g}{t P_n} \quad (21)$$

em que  $FC$  é o fator de capacidade do projeto,  $P_n$  a potência nominal dos aerogeradores [ $W$ ].

#### 2.4.4 Caracterização do Sistema Físico do Gerador Eólico

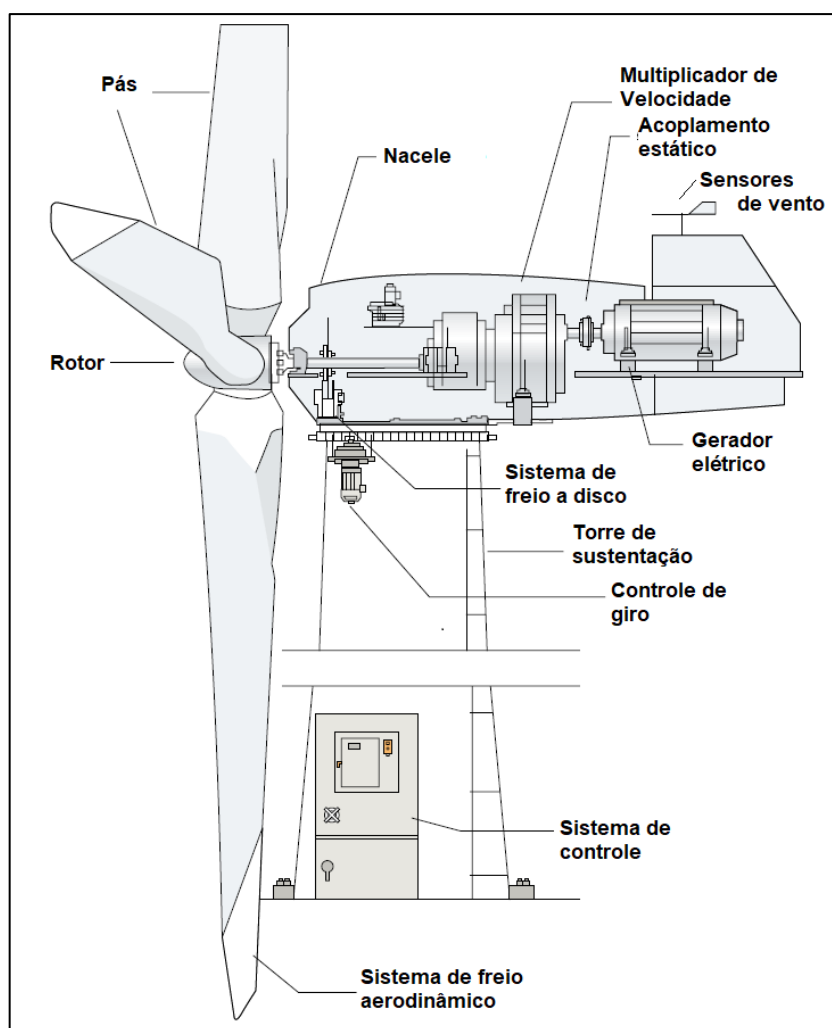
A captação da energia cinética do vento se dá pelo mecanismo de sustentação, baseado na força aerodinâmica resultante das forças exercidas ao redor de um cilindro em repouso, permitindo a conversão de energia com boa eficiência por possuírem maiores velocidades e torques relativamente baixos no eixo. A ilustração do sistema de um aerogerador é apresentado na Figura 4.

Deste ponto de vista, tem-se os principais componentes de um sistema eólico:

- Rotor eólico;
- Sistema de transmissão e;
- Conversor de energia.

O Rotor eólico, constituído de pá e suas conexões, é responsável pela conversão de energia dos ventos em mecânica. Podem ser horizontais ou verticais, porém os primeiros são os mais comuns nesse tipo de geração.

O Sistema de transmissão, envia, através da caixa multiplicadora, a energia mecânica obtida no rotor e entrega ao gerador. Identifica-se por um conjunto de eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamento. Em algumas situações esse sistema trás desvantagens como a grande complexidade mecânica, perda no sistema e necessidade de manutenção. Atualmente no mercado há muitos projetos de sistemas eólicos sem esse componente de transmissão.



**Figura 5 - Desenho esquemático de uma turbina eólica moderna**  
Fonte: CBEE / UFPE, 2000, apud ANEEL (2005) (Adaptado)

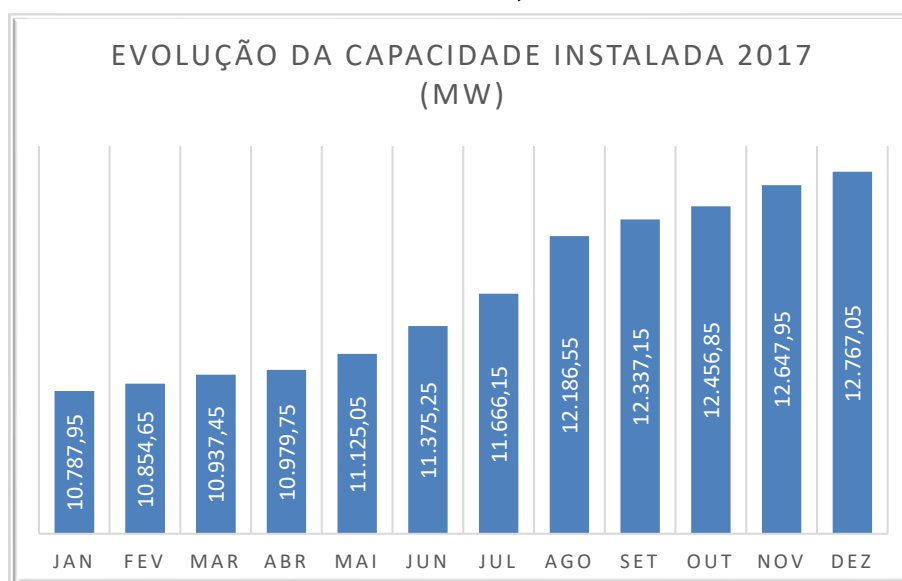
A conversão final de energia mecânica em elétrica acontece devido ao gerador elétrico presente no sistema, instalado com as configurações requeridas pelo sistema.

A turbina eólica, ou conversor de energia eólica, é classificada de acordo com a quantidade de energia cinética do vento que ela pode converter em energia elétrica. Normalmente medida em quilowatts-hora (kWh) ou megawatts-hora (MWh), essa aferição deve ser feita na sua máxima performance, ou seja, medir a máxima capacidade de geração de energia da turbina, enquanto a potência pode ser simplesmente medida a qualquer instante.

## 2.5 CAPACIDADE INSTALADA E POTENCIAL EÓLICO NO BRASIL

De acordo com dados da ABEEólica e ANEEL, em 2017, 508 usinas proporcionaram uma capacidade instalada de 12,77 GW de potência, aumento de 18,87% em relação ao final do ano anterior como mostra a Figura 6.

**Figura 6 - Evolução da Capacidade Instalada em 2017 (MW)**  
Fonte: ANEEL, 2018



Essa nova capacidade instalada em 2017 se deve à inauguração de 79 usinas eólicas em oito estados brasileiros, sendo seis da região Nordeste, um na região Norte e um na região Sul totalizando um 2.027,00 MW, mostradas nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1 - Nova Potência Instalada por estado 2017**

Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2018

UF	Potência (MW)	Nº de Parques
PI	528,20	19
BA	517,10	20
RN	259,30	10
MA	220,80	8
CE	147,00	6
PE	131,10	5
RS	129,00	8
PB	94,50	3
<b>Total Geral</b>	<b>2.027,00</b>	<b>79</b>

**Tabela 2 - Geração e Representatividade da Fonte Eólica**

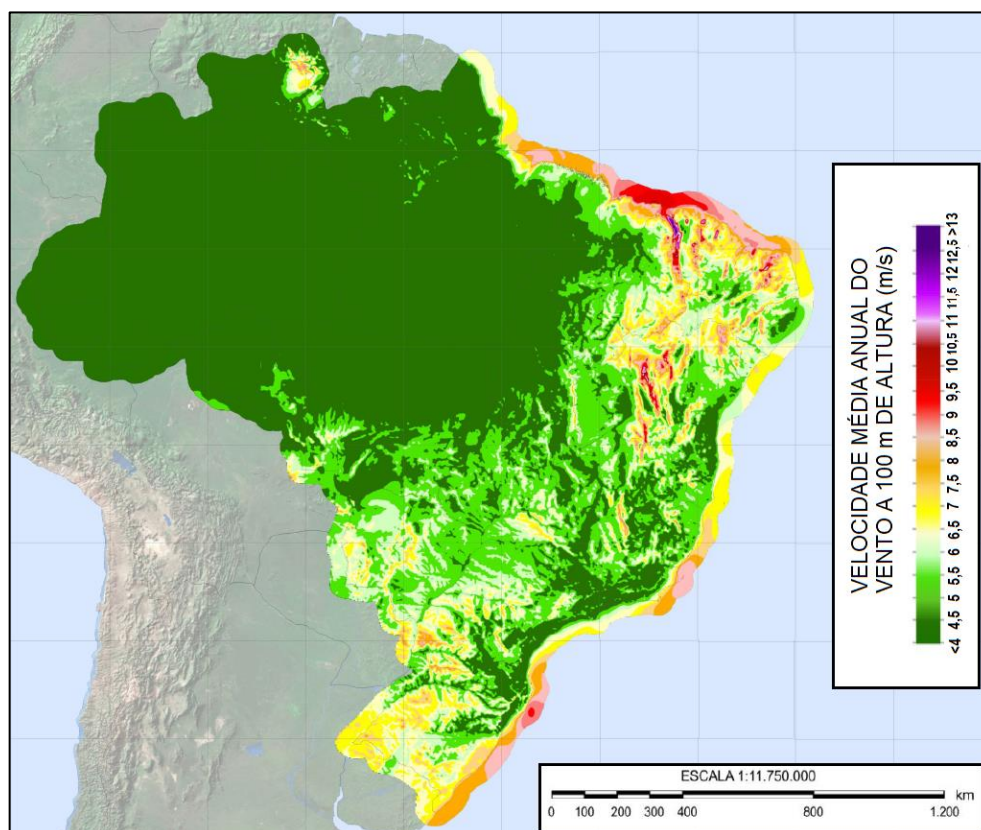
Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2018

Região	2016		2017		%de crescimento
	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	
Sudeste	0,07	0,20%	0,08	0,20%	13%
Sul	4,83	15,10%	5,84	14,40%	21%
Nordeste	21,17	84,70%	33,99	84,00%	25%
Norte			0,55	1,40%	
<b>Total</b>	<b>23,07</b>	<b>100%</b>	<b>40,46</b>	<b>100%</b>	<b>26,20%</b>

É necessário pontuar que o SIN é composto pelos subsistemas Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul, porém essa divisão não é a mesma estabelecida geograficamente. Neste caso, a geração apontada para a região Norte, na verdade é a que está localizada no estado do Maranhão.

Nas tabelas acima (1 e 2), nota-se que a maior geração de energia eólica e o maior investimento se encontra na região Nordeste, que em 2017 representou 84% de toda energia eólica produzida no Brasil.

Isso se deve ao fato do grande potencial eólico da região que é rica em ventos constantes em boa parte do ano. O Atlas de Potencial Eólico Brasileiro (2013) ilustra isso com um mapa da média de ventos anuais no território brasileiro, na Figura 7.



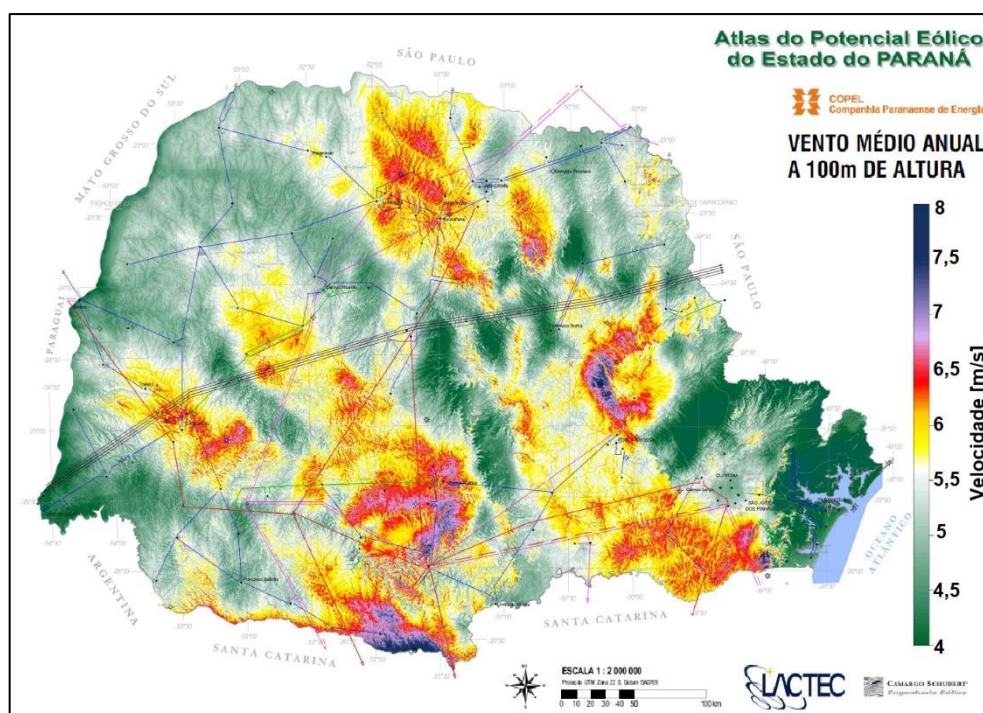
**Figura 7 - Mapa do Potencial Eólico Brasileiro a 100 m de Altura**  
Fonte: CEPEL, 2013

### 2.5.1 Potencial Eólico Paranaense

Atualmente o Paraná possui apenas um parque eólico instalado operando comercialmente. A Usina Eólio-Elétrica de Palmas, no extremo sul do estado, possui uma capacidade instalada de 3 MW divididos em seis aerogeradores de 500 kW. Apesar de ser a única do estado, foi a primeira da região Sul do país, entrando em operação em fevereiro de 1999.

Segundo o Atlas do Potencial Eólico do Paraná de 2007, os resultados da integração dos mapas e do potencial eólico do estado apontam um potencial instalável de 310 MW, 1360 MW e 3370 MW para áreas com velocidade média do vento superiores a 7,0 m/s, para as alturas de 50m, 75m e 100 m, respectivamente.

A Companhia Paranaense de Energia (Copel), estima que esse potencial, se aproveitado, seria o suficiente para suprir aproximadamente 40% da energia consumida no ano de 2008 no estado. Isso mostra que o estado do Paraná explora somente uma ínfima parte do recurso disponível e revela um grande campo disponível a se expandir.



**Figura 8 - Mapa do Potencial Eólico Paranaense a 100 m de Altura**  
Fonte: LATEC, 2003

O mapa ilustrado na Figura 8 mostra visualmente as médias anuais de velocidade de vento a 100 metros de altura. Apesar do Paraná possuir, em geral, terreno acidentado, existem boas áreas para exploração da energia dos ventos. O Atlas do Potencial Eólico do Paraná destaca as regiões de Cascavel, Maringá, Campos de Castro e Tibagi, Campos de Guarapuava, Serra do Quiriri, o já explorado Planalto de Palmas e uma parte da Região do Norte Pioneiro do Paraná.

### 2.5.1.1 Região do norte pioneiro do Paraná

Essa mesoregião abrange 43 cidades divididas nas microrregiões de Assaí, Cornélio Procópio, Jacarezinho, Ibaiti e Wenceslau Braz. Do Norte Pioneiro, os arredores de São Gerônimo da Serra se sobressaem em questão de velocidade de vento que varia entre 7,0 e 7,5 m/s a 75 m de altura. Além disso, a área fica próxima a Londrina, cidade com 485,822 mil habitantes, grande centro consumidor que poderia se beneficiar com a produção de energia nesse local. Porém, essa área possui terrenos acidentados e a viabilidade de um projeto na região está limitado a investimentos em acesso aos locais mais promissores, ou seja, os mais elevados.

Observando o restante do mapa, e o Global Wind Atlas nota-se que outras regiões também se destacam, como as regiões de Cornélio Procópio, Nova Fátima, Assaí, Joaquim Távora, Quatiguá e Japira.

## 2.6 COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA

A principal forma de contratação de energia no Brasil são os leilões de energia. Esses eventos são uma forma de controlar os níveis de oferta e demanda, através do Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Os leilões são realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e a ANEEL é o agente institucional responsável pela concessão dos procedimentos licitatórios destes.

### 2.6.1 Comercialização de Energia Eólica

Enquanto os valores das fontes convencionais de energia são da ordem de R\$ 100,00/MWh, os valores de energia eólica no PROINFA já chegaram à ordem de R\$ 280,00/MWh. Mas, com os incentivos governamentais por meio do programa, e investimento de capital estrangeiro atraído pelo pouco proveito de empresas nacionais no potencial eólico brasileiro, esse preço reduziu substancialmente como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Leilões de energia eólica

Fonte: ANEEL

<b>Venda da energia eólica</b>	<b>Potência instalada negociada (MW)</b>	<b>Valores médios do MWh (R\$)</b>
<b>PROINFA</b>	1.423	298,00
<b>LER 2009</b>	1.805	148,39
<b>A-3 2010</b>	1.685	134,10
<b>LER 2010</b>	2.047	122,69
<b>A-3 2011</b>	1.929	101,64
<b>LER 2011</b>	1.929	99,59
<b>A-5</b>	979,5	105,53

## 2.7 GERAÇÃO COMPLEMENTAR

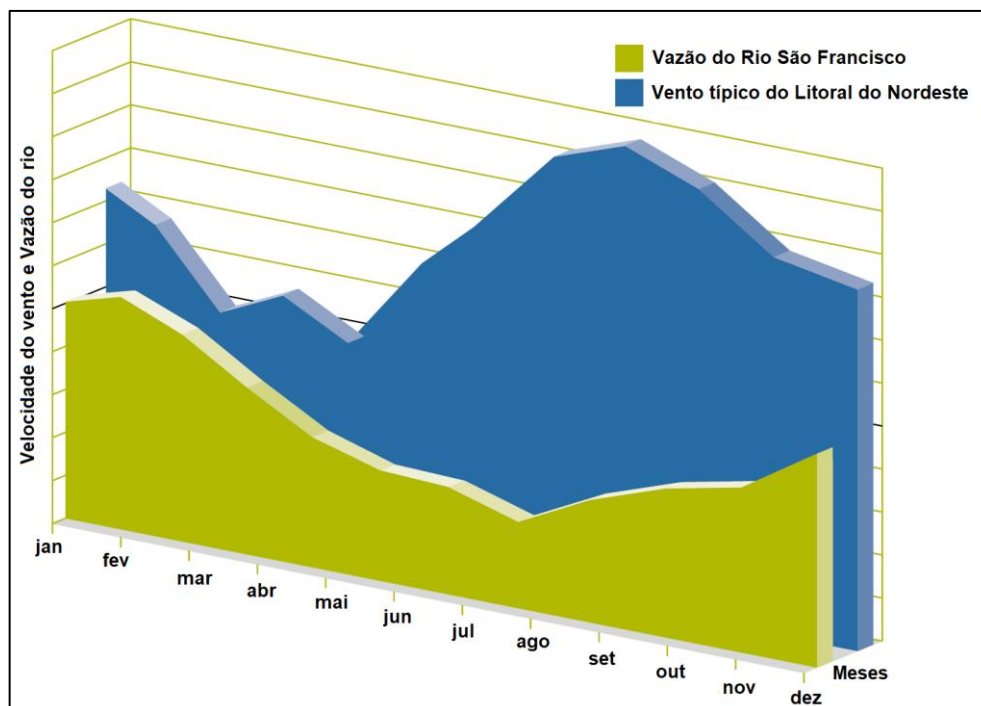
Outra vantagem da energia eólica é a flexibilidade da sua produção, fazendo-se possível, complementar com outras formas de geração.

### 2.7.1 Geração Complementar Hídrica e Eólica

Apesar da grande produção de energia hídrica no Brasil, a afluência dos rios não é tão previsível como era a alguns anos atrás, devido aos vários fenômenos climáticos ocasionados pelo efeito estufa e outros problemas ambientais. Além disso, nem todos os rios com potencial hídrico para geração de energia podem ser explorados. Existem leis ambientais e sociais que impedem a produção em boa parte dos rios na região, Norte, por exemplo. Alternativamente, há a exploração de usinas de fio d'água, porém, estas tornam o sistema cada vez mais sazonal.

Com uma região com grande potencial energético, mas pouca geração de energia, faz-se necessária a complementação com outro tipo de geração. De forma oportuna, geralmente a sazonalidade dos ventos ocorre justamente ao contrário da sazonalidade das chuvas na região Norte e Nordeste, como mostra a Figura 9:





**Figura 9 - Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica**  
**Fonte: CBEE / UFPE, 2000 apud ANEEL (2005)**

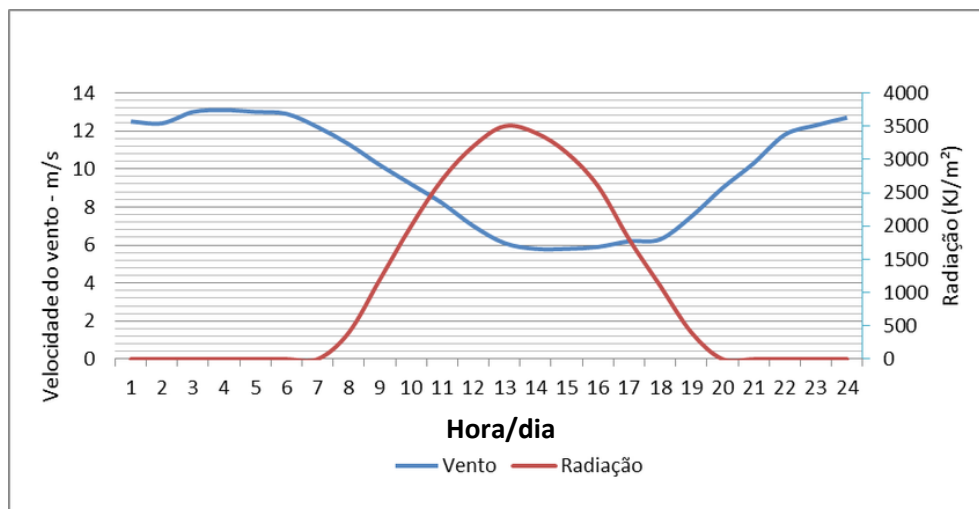
Então, quando a produção das hidrelétricas diminuir devido ao período de seca, comumente, será o período de maior incidência de ventos, chamado de “safra dos ventos”. Na região Sul não há essa complementariedade, pois as sazonalidades hídricas e eólicas coincidem.

Isso proporciona mais confiabilidade ao sistema, garantindo que as hidrelétricas não necessitem esvaziar seus reservatórios, pois haverá produção de energia eólica o suficiente para suprir a demanda.

### 2.7.2 Geração Complementar Solar Eólica

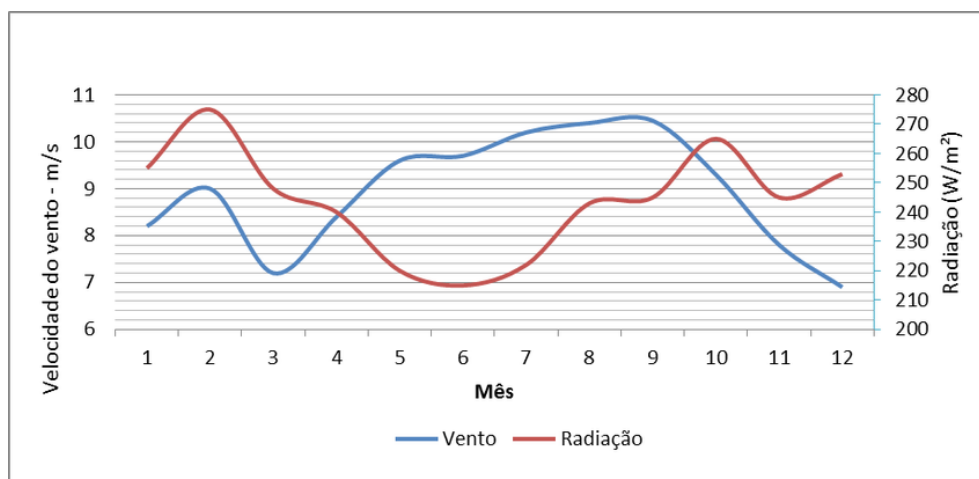
Outra possibilidade de cogeração com a produção de energia eólica é a geração solar. Para determinar se esse tipo de cogeração é viável, primeiramente, leva-se em consideração o período de um dia. A radiação solar tem um comportamento previsível (em caso de dia ensolarado, sem nebulosidade) que consiste em iniciar o dia com valores baixos, ter um pico ao meio dia e decrescer até o fim da tarde. Em contrapartida os ventos não possuem tal constância, porém

possuem uma velocidade média alta no começo da manhã e fim de tarde e menor nos períodos de mais irradiação solar (meio dia) como apresentado na Figura 10.



**Figura 10 - Complementaridade solar e eólica diariamente (melhor hipótese)**  
**Fonte: Rampinelli (2012)**

Além disso, fazendo médias anuais de velocidade de vento média e irradiância média ao longo do ano, nota-se uma sazonalidade inversa entre as essas duas fontes, como mostrado na Figura 11.



**Figura 11 - Complementaridade solar e eólica anualmente**  
**Fonte: Rampinelli (2012)**

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DADOS

##### 3.1.1 Escolha do Aerogerador

Para esse trabalho, o aerogerador escolhido foi o modelo Enercon E-92/2350kW com torre de concreto de 104 metros, representado na Figura 12.

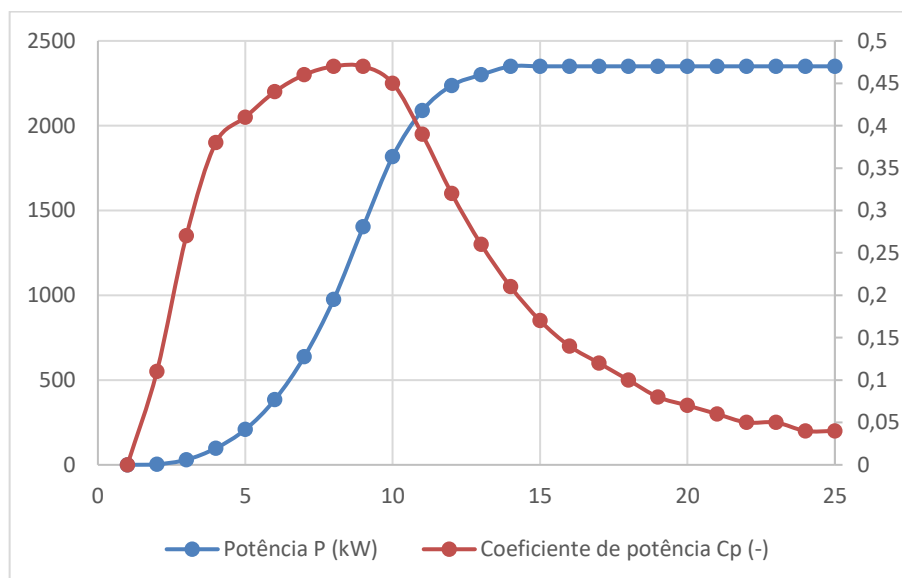
Os dados técnicos e a curva de potência calculada obtidos no catálogo do fabricante são apresentados no Quadro 1 e na Figura 13:

<b>Potência nominal:</b>	2.350 kW
<b>Diâmetro do rotor:</b>	92 m
<b>Altura do hub em metros:</b>	78 / 84 / 85 / 98 / 104 / 108 / 138
<b>Zona de vento (DIBt):</b>	WZ III
<b>Classe de vento (IEC):</b>	IEC/EN IIA
<b>Características do aerogerador:</b>	Sem engrenagem, rotação variável, controle individual das pás
<b>ROTOR Tipo:</b>	Rotor a barlavento com controle do ângulo de passo das pás ativo
<b>Direção da rotação:</b>	Horária
<b>Número de pás:</b>	3
<b>Área varrida:</b>	6.648 m <sup>2</sup>
<b>Material da pá:</b>	PRFV (resina epóxi); para-raios integrado
<b>Velocidade:</b>	Variável, 5 - 16 rpm
<b>Controle do pitch:</b>	Sistema Wobben/ENERCON de regulação individual das pás, cada pá tem um sistema autônomo de regulação, com fonte de alimentação de emergência
<b>Rolamento principal:</b>	Rolamento de rolos cônicos / rolos cilíndricos de duas filas
<b>Gerador:</b>	Gerador circular Wobben/ENERCON com acionamento direto
<b>Abastecimento da rede:</b>	Inversor Wobben/ENERCON
<b>Sistema de travagem:</b>	3 sistemas autônomos de controle das pás com alimentação de energia de emergência, travão do rotor, sistema de bloqueio do rotor
<b>Controle do yaw:</b>	Ativado por engrenagens de regulação, amortecimento dependente da carga
<b>Sistema de monitorização remota:</b>	ENERCON SCADA

Quadro 1 - Dados técnicos Aerogerador E-92  
Fonte: ENERCON (Adaptado)



**Figura 12 - Foto do Aerogerador E-92**  
**Fonte: ENERCON**



**Figura 13 - Curva de Potência Calculada e Curva de Valores de Cp**  
**Fonte: ENERCON (Adaptado)**

### 3.1.2 INMET

Alguns dos dados utilizados nesse estudo são provenientes do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibilizados online. São informações de pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento obtidas de minuto a minuto pelas estações meteorológicas de superfície automáticas a uma altura de 10 metros e disponibilizadas em intervalos de uma hora. A análise do presente trabalho compreende o período entre as datas de 10/11/2018 a 09/11/2019 das estações Japira-A871, Joaquim Távora-A821 e Nova Fátima-A842 na região do Norte Pioneiro do Paraná.



**Figura 14 - Estação meteorológica de superfície automática Japira-A871**  
**Fonte: INMET**

### 3.1.3 Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, disponibilizado pelo site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – CRESESB, apresenta dados baseados nas simulações realizadas com o software de modelamento numérico MesoMAP a partir de um banco de dados validado para o período de 1983/1999. O Atlas tem o objetivo de tornar-se suporte ao aproveitamento eólico no Brasil, fornecendo informações que apontem áreas com potencial.

As informações são apresentadas por meio de mapas temáticos de velocidade média do vento, direções predominantes, parâmetros  $c$  e  $k$  de Weibull e fluxo de potência eólica na altura de 50m e na resolução de 1km x 1km, para todo o território nacional.

Para o trabalho, os dados de médias sazonais de velocidade do vento e parâmetros estatísticos de Weibull foram obtidos por meio da ferramenta de busca por coordenada, onde foram inseridas as coordenadas geográficas de cada torre meteorológica, disponibilizadas pelo INMET.

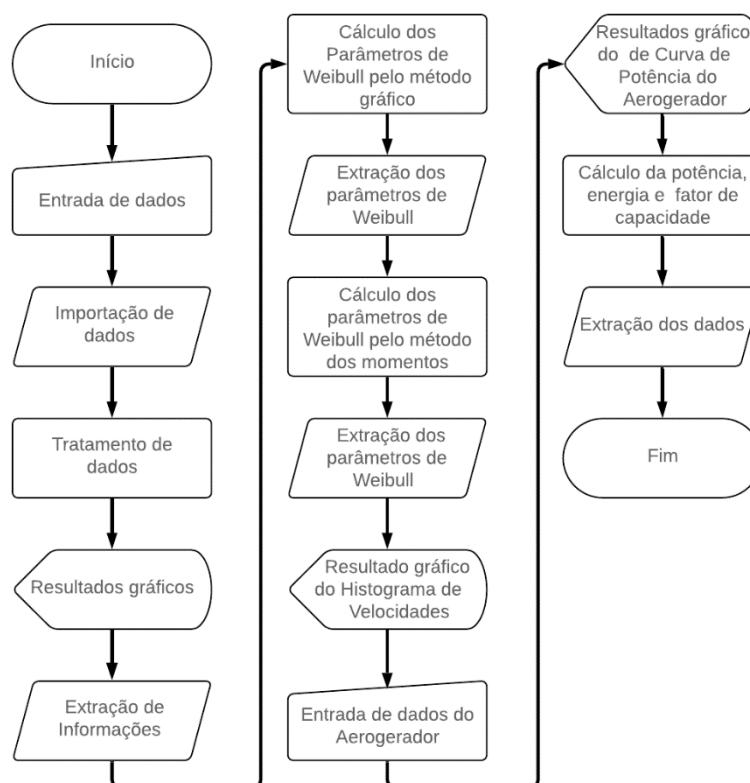
## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 MATLAB

MATLAB é um software interativo de alta performance que combina análise numérica, processamento de sinais, construção de gráficos cujo elemento básico de informação é uma matriz.

Por meio dessa ferramenta, foi feito um *script* cujo o objetivo é calcular todo o projeto eólico, desde a formatação dos dados inseridos até a estimativa de potencial eólico da região desejada, de acordo com os métodos apresentados no presente trabalho.

Para fins de compreensão, o fluxograma do algoritmo implementado é apresentado a seguir:



**Figura 15 - Fluxograma do Algoritmo de Programação**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.3 MÉTODOS DE CÁLCULO

#### 3.3.1 Extrapolação dos Dados do Vento

Nem sempre é possível fazer medições de velocidade do vento em muitas alturas pertinentes a um projeto eólico. Os dados medidos pelo INMET, por exemplo, são medidos somente a uma altura de 10 metros. Portanto, é necessário recorrer a artifícios matemáticos para fazer a extrapolação de uma velocidade medida em diferentes alturas.

É necessário determinar um perfil vertical de velocidades e alguns dos métodos utilizados são descritos pela lei logarítmica e pela lei de potência. Manwell

(2002) determinou a expressão (23) da lei logarítmica para a variação de velocidade do vento modelada em uma condição de terreno específica:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\ln(h_1/z_0)}{\ln(h_2/z_0)} \quad (22)$$

onde  $h_1$  é a altura de referência (em relação ao solo),  $h_2$  é a altura que se deseja determinar a velocidade,  $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades nas alturas de referência e desejada, respectivamente e  $z_0$  é o comprimento de rugosidade da região.

Lopes (2003) define comprimento de rugosidade como sendo “altura a partir do solo onde a velocidade do vento é igual a zero, se o perfil do vento tiver uma variação logarítmica com a altitude”, que se refere aos elementos e obstáculos dispostos na superfície da região em questão (construções, vegetação). Esse parâmetro pode ser calculado a partir de alguns fatores que definem um determinado elemento de rugosidade (Caldas, 2010):

$$z_0 = 0,5 h \frac{S}{A_H} \quad (23)$$

sendo  $h$  a altura do elemento de rugosidade em metros,  $S$  seção transversal na direção do vento do elemento de rugosidade em  $m^2$  e  $A_H$  a área média horizontal de cada elemento ( $m^2$ ).

Apesar da correta estimativa da rugosidade do terreno ser fundamental para o cálculo mais preciso das velocidades do vento em diferentes alturas, na prática, não é necessário calculá-lo. É utilizado como base, a classificação de rugosidade tabelados no European Wind Atlas (1989) apresentado na Tabela 4:

**Tabela 4 - Classificação de rugosidade (continua)**  
**Fonte: European Wind Atlas (Adaptado)**

$z_0$	Característica do terreno	Classe de Rugosidade
1,00	Cidade	3
0,80	Floresta	
0,50	Subúrbios	



**Tabela 4 - Classificação de rugosidade (conclusão)**  
**Fonte: European Wind Atlas (Adaptado)**

<b>z0</b>	<b>Característica do terreno</b>	<b>Classe de Rugosidade</b>
<b>0,30</b>	Cinturões de árvores	3
<b>0,20</b>	Árvores e arbustos	
<b>0,10</b>	Fazenda com vegetação fechada	2
<b>0,05</b>	Fazenda com vegetação aberta	
<b>0,03</b>	Fazenda com poucas árvores/edificações	
<b>0,02</b>	Áreas de aeroportos com edificações e árvores	
<b>0,01</b>	Áreas de pista de aeroporto	
<b>0,008</b>	Pasto	1
<b>0,005</b>	Solo arado	
<b>0,001</b>	Neve	
<b>0,0003</b>	Areia	
<b>0,0001</b>	Água (lagos, rios e oceanos)	0

### 3.3.2 Extrapolação dos Parâmetros Estatísticos de Weibull

A mudança da intensidade e do comportamento do vento em relação a altura faz com que os fatores  $k$  e  $c$  de Weibull também se alterem. Segundo Custódio (2009), é importante que esses fatores estejam de acordo com as novas alturas, para que se possa fazer uma boa estimativa do comportamento do vento. Para obtenção dos novos parâmetros, utilizou-se as equações (24), (25) e (26):

$$n = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c1)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h1}{h2}\right)} \quad (24)$$

$$c2 = c1 \left(\frac{h2}{h1}\right)^n \quad (25)$$

$$k2 = k1 \frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h2}{10}\right)} \quad (26)$$

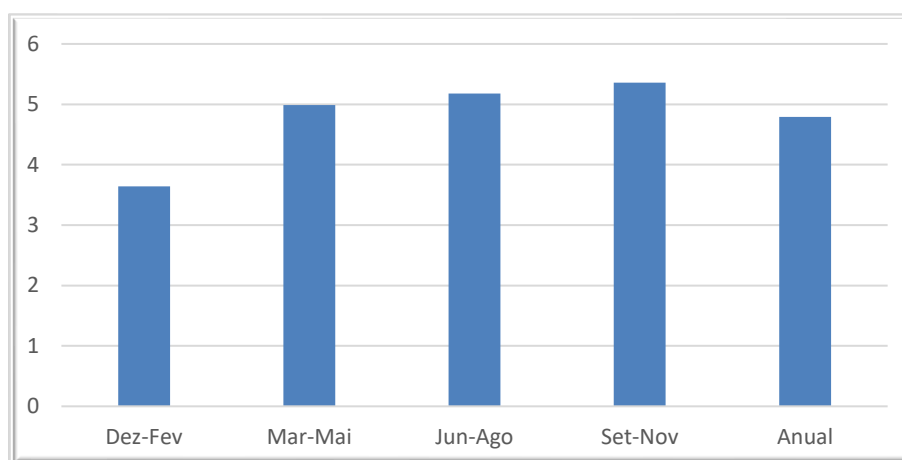
onde  $h_1$  é a altura de referência [m],  $h_2$  a altura onde se deseja determinar os parâmetros;  $c_1$  e  $c_2$  são os fatores de escala nas alturas  $h_1$  e  $h_2$  respectivamente [m/s];  $k_1$  e  $k_2$  são os fatores de forma nas alturas  $h_1$  e  $h_2$ , adimensionais; e  $n$  é o expoente da equação também adimensional.

Nota-se que diferentemente da extrapolação da velocidade do vento, esse procedimento não leva em consideração o comprimento de rugosidade  $z_0$ , o que pode gerar resultados imprecisos. Para áreas com menos obstáculos, portanto com valores menores de  $z_0$ , apresenta resultados satisfatórios.

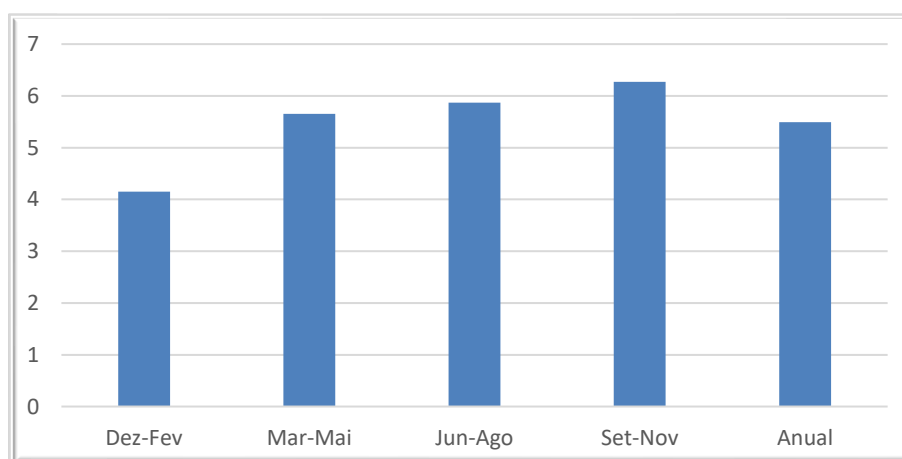
## 4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DO REGIME DOS VENTOS NAS REGIÕES

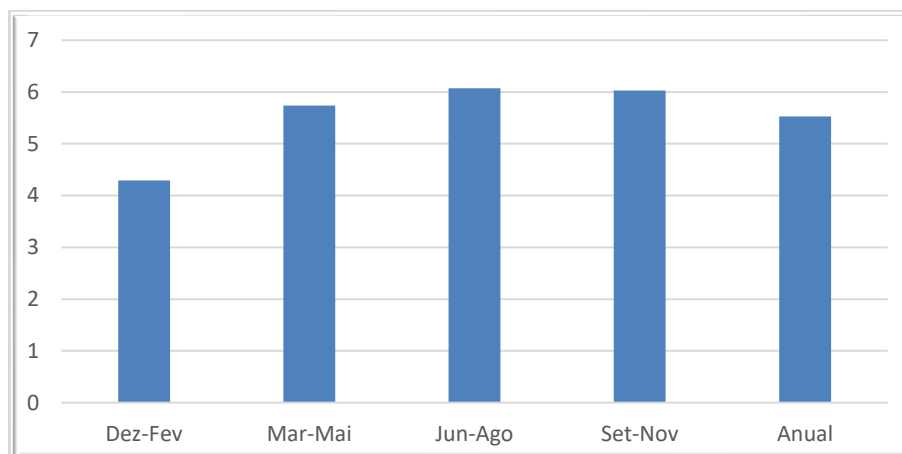
As Figuras abaixo foram obtidos com os dados provenientes do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) para cada cidade:



**Figura 16 - Velocidade Média Sazonal de Velocidade do Vento a 50 m de Altura na Cidade de Japira**  
(Fonte: Autoria Própria)



**Figura 17 - Velocidade Média Sazonal de Velocidade do Vento a 50 m de Altura na Cidade de Joaquim Távora**  
(Fonte: Autoria Própria)



**Figura 18 - Velocidade Média Sazonal de Velocidade do Vento a 50 m de Altura na Cidade de Nova Fátima**  
(Fonte: Autoria Própria)

As figuras mostram que as maiores velocidades de vento acontecem no segundo semestre do ano, no inverno e primavera, oportunamente no período de seca, quando a produção de energia hídrica é mais baixa, confirmando a possibilidade de integração das duas formas de produção de energia.

## 4.2 TRATAMENTO DE DADOS

Após a formatação dos dados de campo fora do padrão, foram processados os dados brutos, obtendo a representação da série temporal da velocidade do vento (Figura 19) e uma ilustração das direções das massas de ar por meio de uma rosa dos ventos (Figura 20).

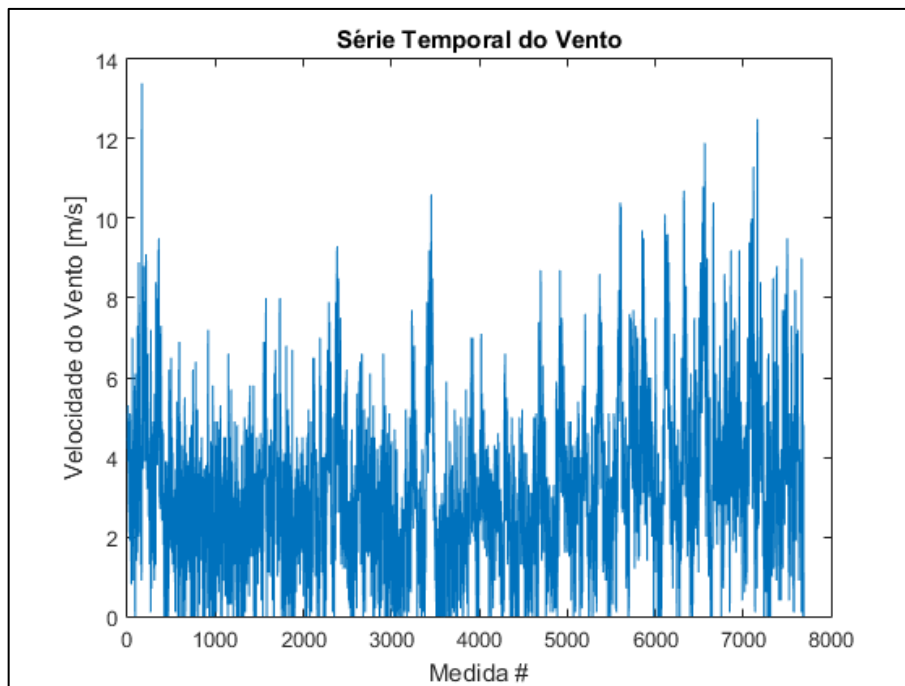


Figura 19 - Série Temporal da Velocidade do Vento da Cidade de Nova Fátima (10 m)  
Fonte: Autoria Própria

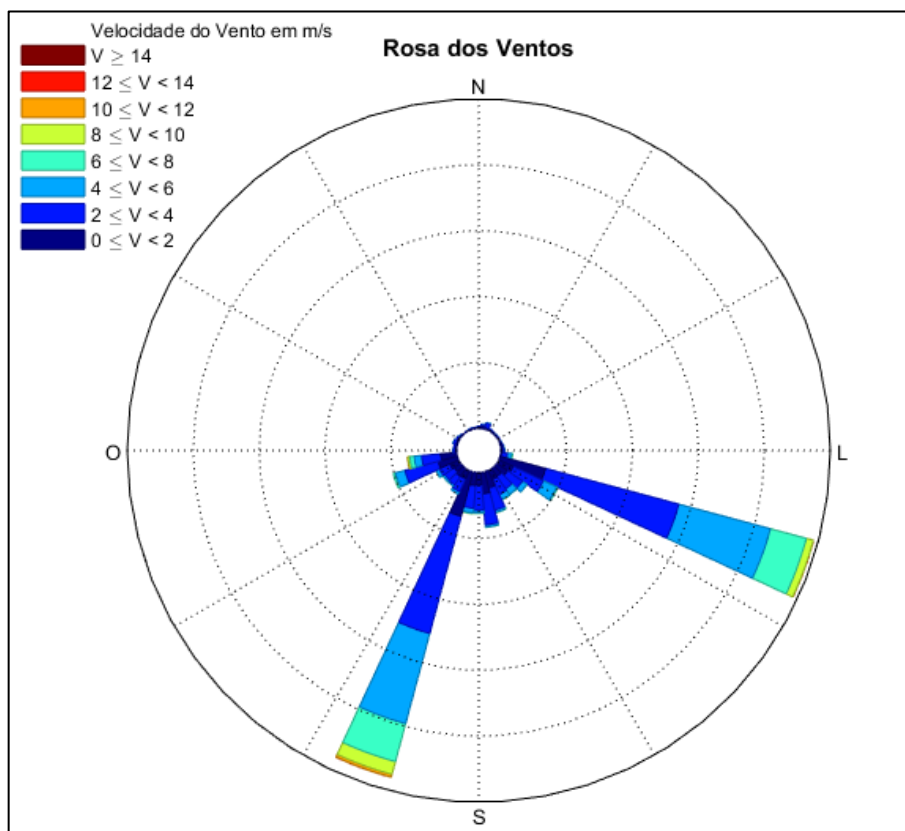
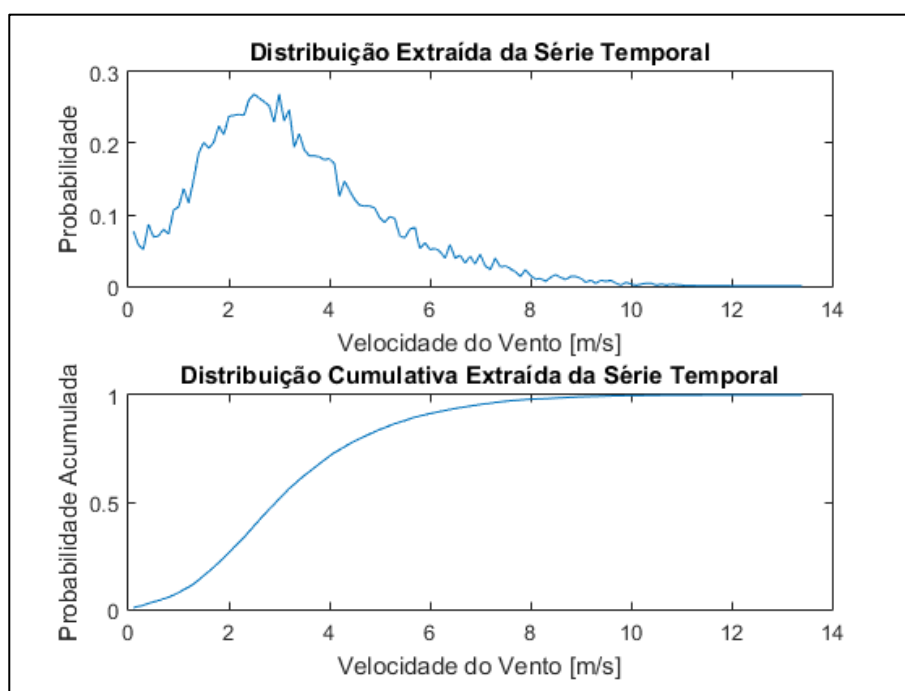


Figura 20 - Direção e Intensidade do Vento na Cidade de Nova Fátima a 10 m  
Fonte: Autoria Própria

Posteriormente, foram extraídos os valores únicos presentes nos dados, sendo possível, assim, calcular a frequência de ocorrência de cada valor único. Com frequência dos valores únicos da série em função da velocidade do vento é possível representar as distribuições de probabilidade extraída da série temporal, como mostra a Figura 21:



**Figura 21 - Distribuições Extraídas da Série Temporal da cidade de Nova Fátima (10 m)**  
**Fonte: Autoria Própria**

Com essas informações é possível, então, utilizar a distribuição de probabilidade de Weibull e apresentar as funções Densidade de Probabilidade e Distribuição de Weibull e Densidade de Probabilidade e Distribuição Acumulada de Weibull que são obtidas em função da frequência relativa e velocidade do vento (Figura 22):

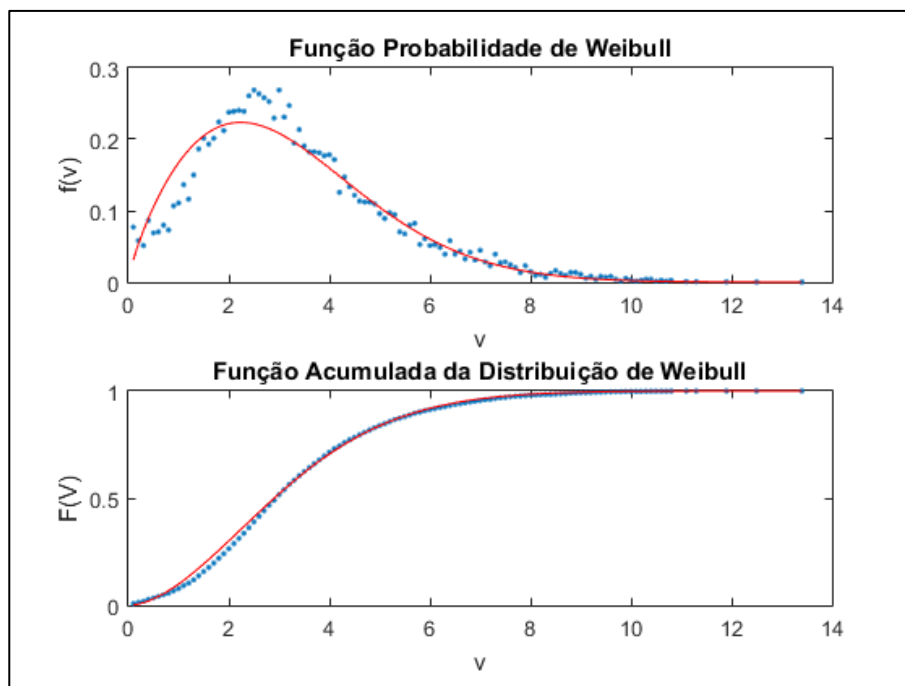


Figura 22 - Funções Densidade de Probabilidade e Distribuição Acumulada de Weibull (10 m)  
Fonte: Autoria Própria

#### 4.2.1 Determinação dos fatores $k$ e $c$

Assim como mostrado na seção 2.4, foram calculados os fatores  $k$  e  $c$  pelo método gráfico, por meio das Equações (6) e (8) e pelo método dos momentos utilizando as Equações (11) e (12) com base no tratamento de dados da série temporal e os melhores resultados para cada cenário são mostrados na Tabela 5:

Tabela 4 – Resultados de  $k$ ,  $c$  e Velocidade média  
Fonte: Autoria Própria

Cidade	Altura	$k$	$c$	V média
Japira	10 m	1,73	2,78	2,54
	100 m	1,76	4,61	4,22
Joaquim Távora	10 m	1,17	1,51	1,87
	100 m	1,19	3,20	3,09
Nova Fátima	10 m	1,77	3,56	3,30
	100 m	1,81	5,94	5,26

Para os dados obtidos pelo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001), fez-se a extrapolação de  $k$ ,  $c$  por meio das Equações (25) e (26) e velocidade média para as alturas de 10 m e 100 m utilizando a Equação (22), e os resultados foram apresentados na Tabela 6 para fins de comparação.

**Tabela 5 - Resultados de  $k$ ,  $c$  e Velocidade média com dados extrapolados do Atlas Eólico Brasileiro**

**Fonte: Autoria Própria**

<b>Cidade</b>	<b>Altura</b>	<b><math>k</math></b>	<b><math>c</math></b>	<b>V média</b>
<b>Japira</b>	10 m	1,77	3,76	3,28
	100 m	1,82	6,30	5,44
<b>Joaquim Távara</b>	10 m	1,80	4,40	3,75
	100 m	1,85	7,16	6,22
<b>Nova Fátima</b>	10 m	1,90	4,43	3,79
	100 m	1,96	7,20	6,28

Observando as tabelas, pode-se confirmar a variação da velocidade do vento e dos parâmetros estatísticos de Weibull de acordo com a altura. Além disso, nota-se que os resultados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro apresentam, em geral, médias maiores de velocidade do vento.

#### 4.2.2 Potencial eólico

Utilizando os dados obtidos pelas curvas de potências apresentadas no Apêndice A e as Equações (20) e (21), foram obtidos os valores de Energia Anual Gerada e de Fator de Capacidade com os dados do INMET, mostrados na Tabela 7.

**Tabela 6 – Resultados de Potência Gerada e Fator de Capacidade (continua)**

**Fonte: Autoria Própria**

<b>Cidade</b>	<b>Altura</b>	<b>Energia Anual Gerada [kWh]</b>	<b>FC(%)</b>
<b>Japira</b>	10 m	486,165	2,45
	100 m	2482,27	12,51
<b>Joaquim Távara</b>	10 m	516,49	4,06
	100 m	1713,16	13,49



**Tabela 7 - Resultados de Potência Gerada e Fator de Capacidade (conclusão)**

Fonte: Autoria Própria

<b>Cidade</b>	<b>Altura</b>	<b>Energia Anual Gerada [kWh]</b>	<b>FC(%)</b>
	10 m	966,565	5,55
<b>Nova Fátima</b>	100 m	3685,68	21,18

Esses são os dois parâmetros que caracterizam o potencial eólico de uma região e comparando os resultados obtidos para diferentes alturas, nota-se que o aerogerador é mais eficiente quando instalado a uma altura e 100 m.

O melhor resultado obtido foi da cidade de Nova Fátima a uma altura de 100 m com energia gerada de 3685,68 kWh e fator de capacidade de 21,18%.

A pior média de velocidade do vento é na cidade de Joaquim Távora no nível de 10 m tanto para os dados provenientes do INMET como para os do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Porém, ao analisar a Tabela 7, nota-se que a energia anual gerada nessa conjuntura não é a menor como é o esperado. Isso se deve ao fato dos dados provenientes do INMET para essa cidade serem de baixa qualidade, possuindo grande número de valores nulos de velocidade, como mostrado no Apêndice B pelos histogramas de velocidade do vento. Isso implica na dificuldade de estimar satisfatoriamente o comportamento do vento e conseqüentemente a potência a ser extraída dele.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia eólica mostrou-se ser uma ótima alternativa de geração de energia limpa e de poucos impactos ambientais, tornando-se umas das mais favoráveis fontes de energia para investimento. Sobretudo no Brasil, que possui um imenso potencial energético ainda não explorado.

Este trabalho mostrou o grande avanço da geração de energia eólica no Brasil e um panorama sobre o potencial eólico disponível no país e especificamente no estado do Paraná e o quanto já é explorado.

Além disso, foi apresentado como vantagem, a complementariedade da produção eólica, associando-a a outras gerações, como eólica e hídrica para fins de suprirem possíveis déficits devido fatores de sazonalidade, inclusive no estado do Paraná.

Com o uso do software MATLAB, foi possível validar o potencial eólico de uma parte do Norte Pioneiro do Paraná, comparando com dados dos Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Com o método da distribuição de Weibull foi possível estimar o comportamento do vento em relação ao tempo para quase todos os casos, o que é de suma importância para a obtenção de um bom projeto eólico.

Apesar de dados de campo serem mais vantajosos para o cálculo de potencial, o maior empecilho para a realização do trabalho foi a falta de qualidade dos dados adquiridos pelo INMET. Além de poucas torres de medição na região, algumas não fornecem dados temporais concisos e acumulam valores nulos, o que dificulta a estimativa da distribuição de probabilidade do vento e conseqüentemente a determinação do real potencial eólico da região.

Além do fato de apenas pequena parte do potencial eólico ser aproveitado no estado, tais problemas mostram que há pouco interesse dos órgãos paranaenses em obter mais informações sobre o recurso do vento e conseqüentemente em explorá-lo.

Para projetos futuros são sugeridos a estimativa de energia gerada de um projeto eólico com mais aerogeradores ou com mais tipos, para fins de comparação de rendimento; utilização de outros métodos para calcular os parâmetros de Weibull; e determinar preço de produção e tempo de *payback* do projeto eólico.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: Aneel, 2005. 243 p. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_eolica/6\\_4.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_4.htm)>. Acesso em: 07 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de Geração do Brasil**. Brasil: Aneel, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 02 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz de Energia Elétrica**. Brasil: Aneel, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 02 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo). **Números ABEEólica**: Fevereiro de 2019. São Paulo: Abeeólica, 2019. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo). **Potencialidades da energia solar associada à geração eólica**. São Paulo, 2012. Disponível em <http://www.abeeolica.org.br>. Acesso em: 02 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo). **BOLETIM ANUAL DE GERAÇÃO EÓLICA 2017**. São Paulo: Abeeólica, 2018. 15 p. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

BARCELLOS, Silvana Nunes. **AVALIAÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO PARA AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE – REGIÃO DE ESTUDO: ESPÍRITO SANTO**. 2014. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

**BRASIL CHEGA A 13 GW DE CAPACIDADE INSTALADA DE ENERGIA EÓLICA**. São Paulo, 21 fev. 2018. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/noticias/brasil-chega-a-13-gw-de-capacidade-instalada-de-energia-eolica/>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

**BRASIL SOBE MAIS UMA POSIÇÃO NO RANKING MUNDIAL DE CAPACIDADE INSTALADA DE ENERGIA EÓLICA.** São Paulo, 15 fev. 2018. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/noticias/brasil-sobe-mais-uma-posicao-no-ranking-mundial-de-capacidade-instalada-de-energia-eolica/>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

CALDAS, Danilo Monteiro. **Estudo do Potencial Eólico e Estimativa de Geração de Energia de um Projeto Eólico na cidade do Rio de Janeiro Utilizando o WindPro e WAsP.** 2010. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. **InfoMercado mensal: geração eólica cresce 26,5% em 2017.** 2018. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/noticias-opinio/noticias/noticia leitura?contentid=CCEE\\_614032&\\_afrLoop=43901024233051&\\_adf.ctrl-state=qg8kikhbz\\_1#!%40%40%3Fcontentid%3DCCEE\\_614032%26\\_afrLoop%3D43901024233051%26\\_adf.ctrl-state%3Dqg8kikhbz\\_5](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opinio/noticias/noticia leitura?contentid=CCEE_614032&_afrLoop=43901024233051&_adf.ctrl-state=qg8kikhbz_1#!%40%40%3Fcontentid%3DCCEE_614032%26_afrLoop%3D43901024233051%26_adf.ctrl-state%3Dqg8kikhbz_5)>. Acesso em: 20 maio 2018.

CASTRO, R.M.G. **Introdução à energia eólica.** Lisboa: Portugal: Universidade Técnica de Lisboa, 2004. 82 p. (Série Energias Renováveis e Produção Descentralizada).

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013.** Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL – Rio de Janeiro: CEPEL, 2017. 50 p. il.

CUSTÓDIO, R. S.. **Energia eólica para produção de energia elétrica.** Rio de Janeiro. 2007.

**ENERGY MARKET DESIGN FOR RENEWABLE RESOURCES: Imbalance Settlements and Efficiency-Robustness Tradeoffs.** Cambridge, MA, 08 ago. 2015.

HENNESSEY, J. P. J.. **Some Aspects of Wind Power Statistics.** Journal of Applied Meteorology, Corvallis, v. 16, p.119-128, 1977

IEA. **Data and statistics.** 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 02 out. 2019.

IEC. IEC 61400-12-1 **Wind Turbine Generator Systems – Part 12-1: Power Performance measurements of electricity producing wind turbines.** International Standard. Geneva, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Nota Técnica N° 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET: Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2011.

JUSTUS, C. G. et al. **Methods of Estimating Wind Speed Frequency Distributions.** *Journal of Applied Meteorology*. [s.l.], v. 17, p.350-353, 1978.

KUMAR, K. S. P.; GADDADA, S.. **Statistical scrutiny of Weibull parameters for wind energy potential appraisal in the area of northern Ethiopia.** *Renewables: Wind, Water, and Solar*. ISSN: 2198-994X (Online). 2015.

LOPES, A. M. S.. **Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano: vento, ilha de calor de superfície e balanço energético.** Lisboa, 2003. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L.. **Wind energy explained.** New York. Wiley. 2002. 569 p.

NASCIMENTO, Marcio Henrique Lima. **IMPACTO DE CENTRAIS EÓLICAS NO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA.** 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

OZAWA, Maurilio Takeshi. **APLICAÇÃO DE PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL NA ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM MICROGERADOR EÓLICO EM CIDADES DO ESTADO DO PARANÁ.** 2017. 110 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini, 2005. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica.** Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; ROSA JUNIOR, Celso Generoso da. **Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica. Revista Ciências Exatas e Naturais**, Criciúma, SC, v. 14, n. 2, p.273-302.

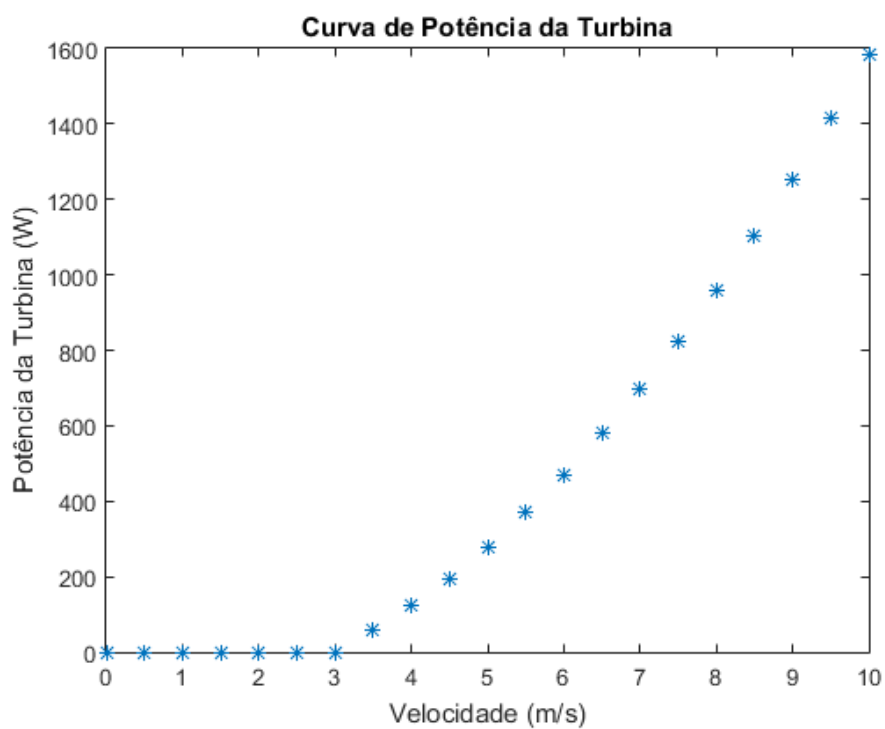
RAMPINELLI, Giuliano Arns; ROSA JUNIOR, Celso Generoso da. **Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica**. 2012. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade Satc, Criciúma-SC, 2012.

REIS, André Luiz dos. **INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DO TERRENO PARA O PERFIL VERTICAL DO VENTO**. 2016. 77 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal Itajubá, Itajubá, 2016.

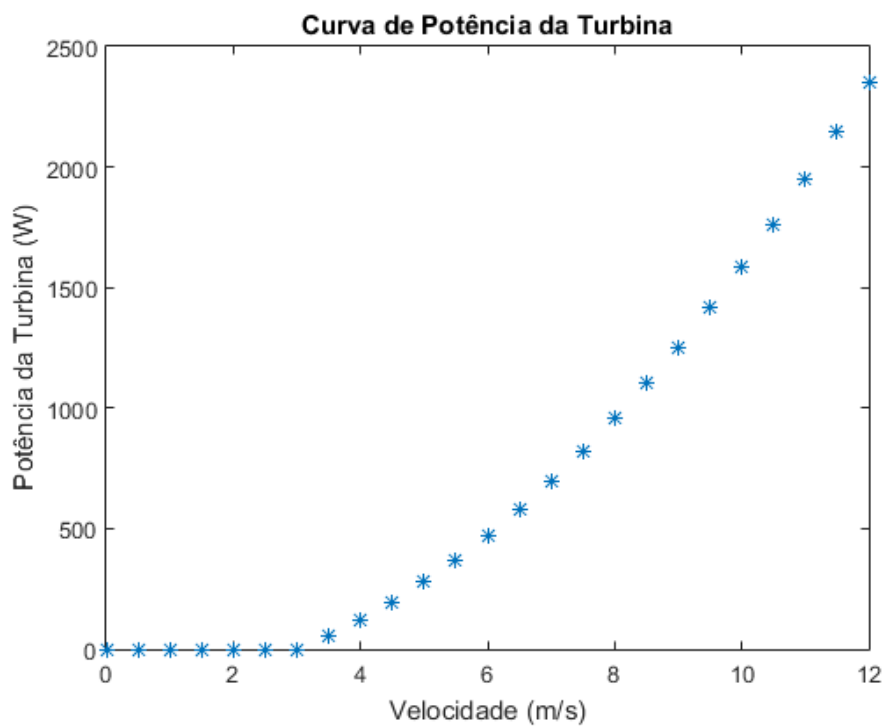
SCHUBERT, Camargo. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná**. Curitiba: LATEC, 2007. 53 p.

SILVEIRA, Stevan Ruschel da. **Geração descentralizada de energia através de fonte alternativa**. 2011. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

**APÊNDICE A – Curvas de Potência da Turbina para 10 m de Altura**

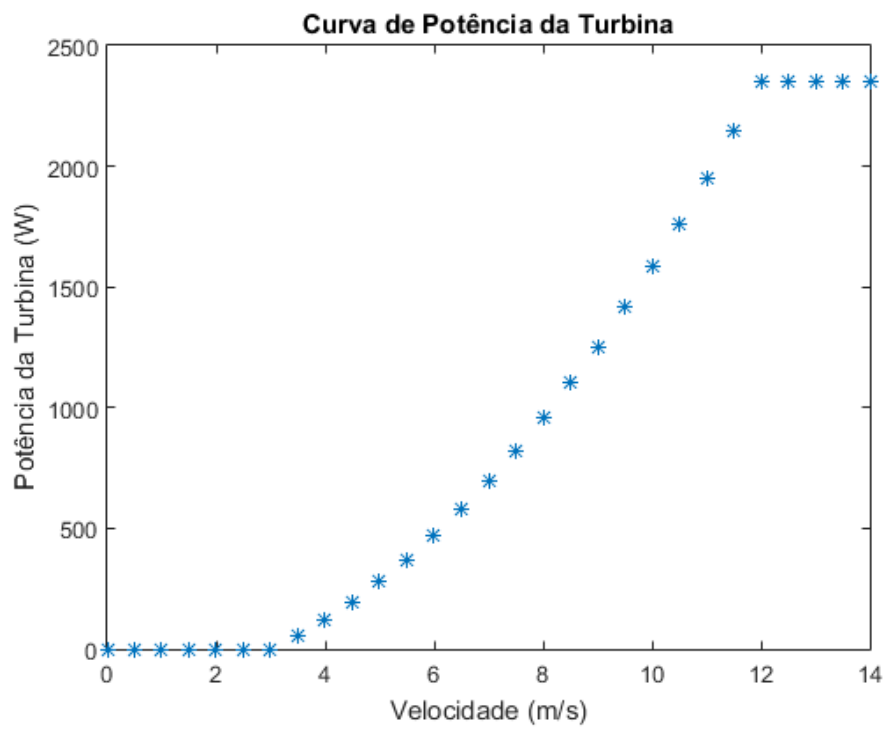


**Figura A. 1 – Japira**  
(Fonte: Autoria Própria)



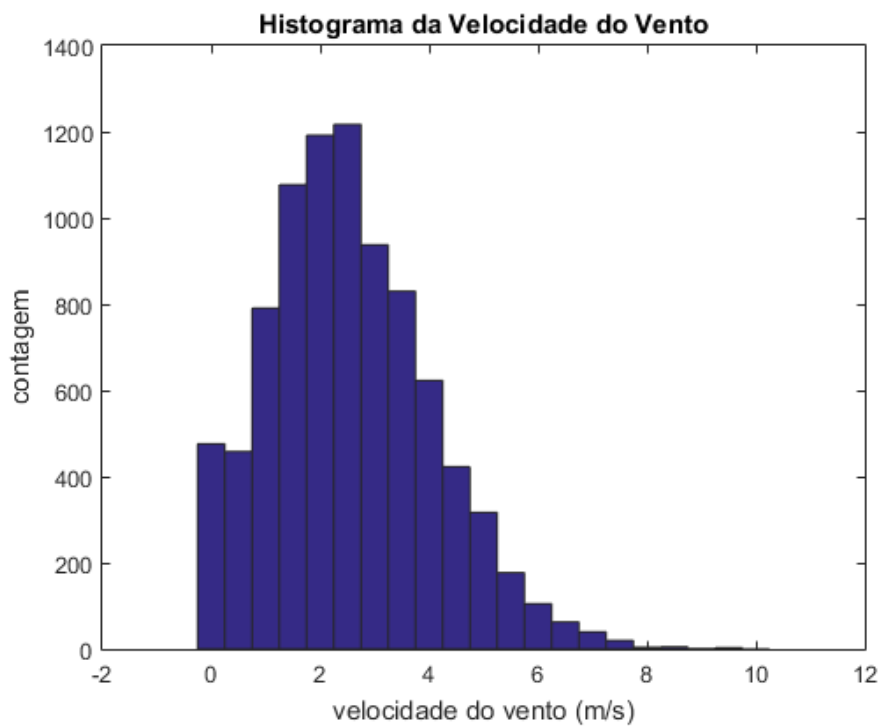
**Figura A. 2 - Joaquim Távora**  
(Fonte: Autoria Própria)



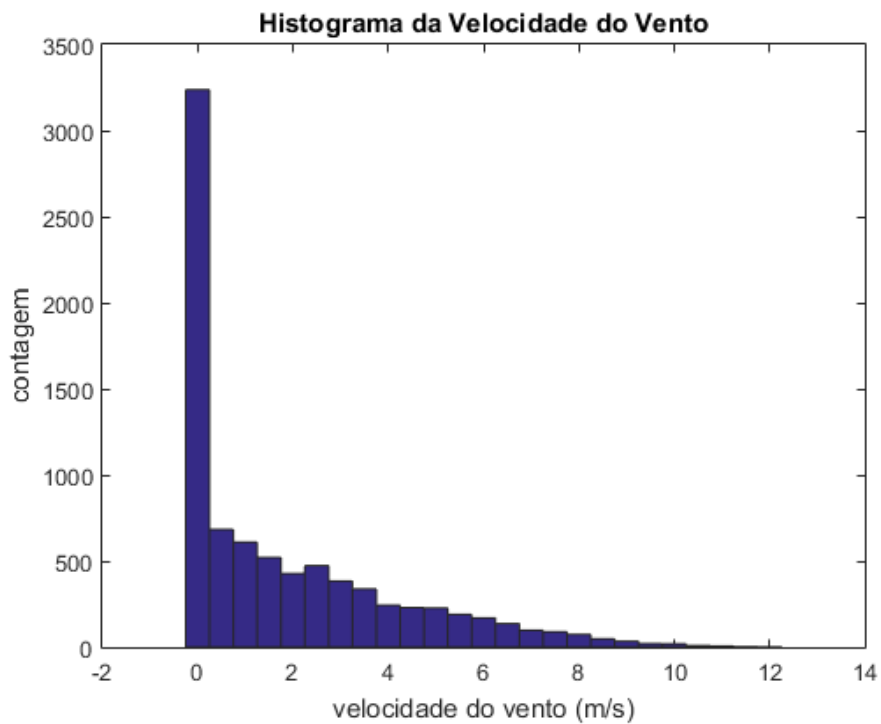


**Figura A. 3 - Nova Fátima**  
(Fonte: Autoria Própria)

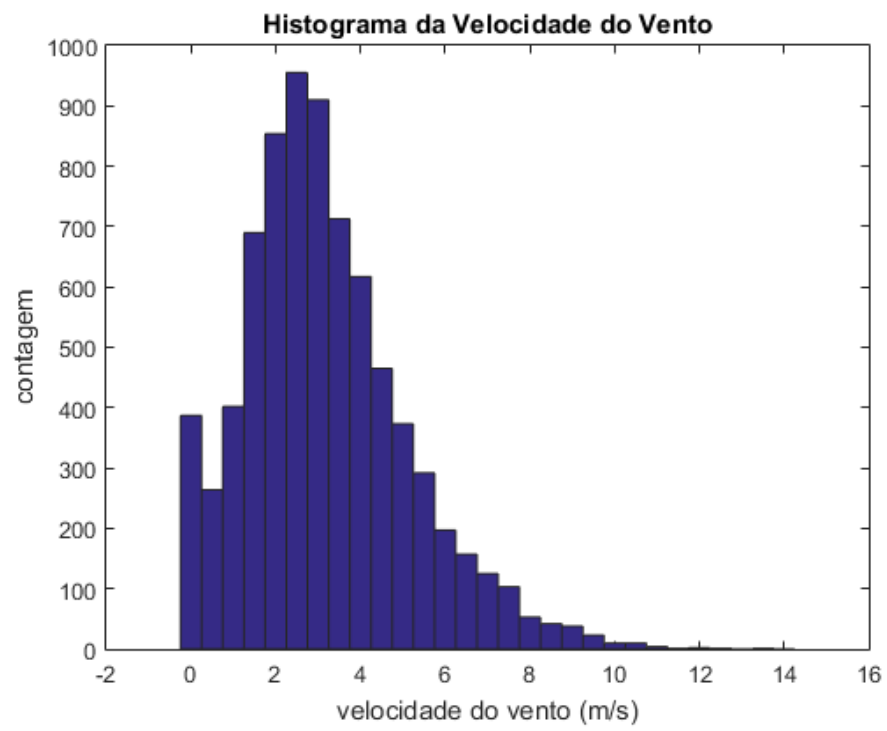
**APÊNDICE B – Histogramas das Médias de Velocidade de Vento a 10 m de Altura  
(Comparação)**



**Figura B. 1 – Japira**  
(Fonte: Autoria Própria)



**Figura B. 2 - Joaquim Távora**  
(Fonte: Autoria Própria)



**Figura B. 3 – Nova Fátima**  
(Fonte: Autoria Própria)