



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUCAS DE SOUZA MARQUES**

**ESTUDO DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE PARA DESCRIÇÃO DE  
DADOS DE FREQUÊNCIA DE VELOCIDADE DE VENTO E DE POTÊNCIA  
EÓLICA**

**FORTALEZA**

**2019**

LUCAS DE SOUZA MARQUES

ESTUDO DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE PARA DESCRIÇÃO DE DADOS DE  
FREQUÊNCIA DE VELOCIDADE DE VENTO E DE POTÊNCIA EÓLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
do Centro de Tecnologia da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Freitas de  
Andrade

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M319e Marques, Lucas de Souza.

Estudo de distribuições de probabilidade para descrição de dados de frequência de velocidade de vento e de potência eólica / Lucas de Souza Marques. – 2019.  
41 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade.

1. Energia Eólica. 2. Distribuição de Probabilidade. 3. Weibull. 4. Gama. 5. Nakagami. I. Título.

CDD 620.1

---

LUCAS DE SOUZA MARQUES

ESTUDO DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE PARA DESCRIÇÃO DE DADOS DE  
FREQUÊNCIA DE VELOCIDADE DE VENTO E DE POTÊNCIA EÓLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
do Centro de Tecnologia da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: 01 de Julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Freitas de Andrade (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos mentores, em suas mais diversas formas,  
com quem tive a honra de conviver, por me ensinar a importância de tentar ser uma pessoa  
melhor a cada dia.

## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho representa o fim de uma importante etapa da minha vida, período de crescimento profissional e crescimento pessoal incalculáveis. Encerro meu vínculo como estudante de engenharia mecânica da Universidade Federal do Ceará, após mais de 5 anos, com imensa alegria, gratidão, nostalgia e um pouco da incerteza inerente ao amadurecimento.

Como em toda boa história de aventura, mais importante que o fim é a jornada que nos leva até ele, e essa jornada não teria sido tão engrandecedora sem a presença das pessoas com quem pude compartilhar inúmeras experiências nesse período.

Dessa forma, gostaria de agradecer de todo o meu coração aos meus pais, Marcelo e Liana, por estarem presentes desde sempre, nos momentos de intensas emoções, sejam elas de alegria, ao compartilhar as conquistas da vida acadêmica, ou de angústia, diante dos desafios que apareciam ao longo das disciplinas. Obrigado pelos conselhos, pela paciência, pelo estímulo constante e pelo amor que têm por mim, saibam que ele é mútuo e "vai até a lua, ida e volta".

Agradeço a minha avó Anita pelo carinho, Irene pela criação e Mariana pelas risadas, brigas e questões de física. Gostaria de dispor de mais espaço para agradecê-las por tudo.

Agradeço também a Luana, é claro, companheira de tempos anteriores à graduação, responsável por uma parcela considerável desse crescimento pessoal. Obrigado por partilhar comigo desse amor que vai além do que consigo expressar em palavras, pelas experiências vividas e pelos sonhos que alimentamos.

Agradeço aos meus companheiros nessa jornada, com quem tive a honra de aprender as teorias de engenharia mecânica e muito mais. Dividimos aulas e experiências, alegrias e tensões, estudos em grupo e rodas de conversa, viagens e projetos de extensão. Nossa amizade é maior do que um mero companheirismo de colegas de curso e, além de saber que pude aprender com os que ainda serão reconhecidos como os melhores engenheiros formados pela UFC, sei, também, que fiz amigos pro resto da vida.

Agradeço ao Grande Moinho Cearense pelas oportunidades e pelo aprendizado e às pessoas com quem trabalhei no PET, LEECA, Diferencial Jr e LAERO.

Por fim, agradeço aos professores que tive ao longo da graduação que conseguiram ir além de um mero cumprimento de carga horária para serem grandes mentores, que não apenas ensinaram o conteúdo previsto na grade curricular de forma espetacular, mas instalaram em muitos alunos o desejo de aprender e se superar. Meu mais sincero obrigado, são professores como vocês que tornam a UFC uma universidade de excelência.

"As pessoas pensam na educação como algo que podem terminar."

(Isaac Asimov)

## RESUMO

No presente trabalho, realizou-se um estudo estatístico para determinação, dentre três funções de distribuição de probabilidade (Weibull, Gama e Nakagami), da melhor alternativa para representação dos dados eólicos de velocidade do vento e potência. O tratamento e a parametrização dos dados, a elaboração dos gráficos e os testes de desempenho estatístico foram desenvolvidos na linguagem de programação R no software RStudio. Os dados foram medidos ao longo dos anos 2009 e 2010 por meio de uma estação anemométrica de coleta de dados meteorológicos na cidade de Petrolina. Os dados obtidos por meio da rede Sonda de organização de dados ambientais passaram por um tratamento para remoção de erros de medição apresentando um aproveitamento final de 92,77% pós-tratamento. Para parametrização das curvas de distribuição, foram utilizados dois métodos determinísticos no estudo: o método empírico e o método da máxima verossimilhança. As curvas elaboradas foram comparadas aos dados empíricos dos histogramas de ambas propriedades e, por meio de três testes de desempenho estatístico, determinou-se que, para o período escolhido, a distribuição Weibull foi a melhor alternativa dentre as três para representação de dados de velocidade de vento e densidade de potência pois apresentou o melhor desempenho em ambos os métodos determinísticos utilizados para todos os testes de desempenho aplicados, apresentando  $R^2$  de 0,987 frente a 0,925 e 0,972 para as distribuições Gama e Nakagami, respectivamente. Além disso, observou-se um desempenho superior do método empírico frente ao método da máxima verossimilhança para as três curvas de distribuição estudadas, com uma diferença de até 2,6% no teste  $R^2$ .

**Palavras-chave:** Energia eólica. Distribuição de probabilidade. Distribuição weibull. Distribuição gama. Distribuição nakagami.



## ABSTRACT

In this study, a statistical analysis was developed for the determination, between three probability distribution functions (Weibull, Gamma and Nakagami), of the best alternative to wind velocity and wind power data representation. The treatment and the parameterization of the data, the charts elaboration and the statistical performance tests were all developed in R programming language in RStudio software. The data was measured in 2009 and 2010 by an anemometric station of meteorologic data collection based in the city of Petrolina. The data gathered by *Rede SONDA* of environmental data passed through a treatment to remove measurement errors resulting in a 92.7% effectiveness post-treatment. For the probability distribution functions parameterization, two deterministic methods were used: the empirical method and the maximum-likelihood method. The calculated curves were compared to the empirical measured data histograms for both studied properties and, through three statistical performance tests, it was determined that, for the chosen time, the Weibull distribution was the best alternative, between the three, for wind speed and power density data representation since it showed the best overall performance in representation for both chosen deterministic methods in all applied performance tests, with a  $R^2$  of 0.987 versus 0.925 and 0.972 for Gama and Nakagami distributions, respectively. Besides that, it was noted a slightly higher performance from the empirical mode to the maximum-likelihood method for the three studied distribution curves, with a difference of until 2.6%. in  $R^2$  test.

**Palavras-chave:** Wind Power. Probability Distribution. Weibull distribution. Gamma distribution. Nakagami distribution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de Weibull com $k = 2$ (constante). . . . .	19
Figura 2 – Distribuição Weibull com $c = 3$ m/s (constante). . . . .	19
Figura 3 – Distribuição Gama com $\alpha = 2$ (constante). . . . .	21
Figura 4 – Distribuição Gama com $\beta = 3$ (constante). . . . .	21
Figura 5 – Distribuição Nakagami com $m = 2$ (constante). . . . .	23
Figura 6 – Distribuição Nakagami com $\Omega = 3$ (constante). . . . .	23
Figura 7 – Localização da estação PTR - 11 via satélite. . . . .	27
Figura 8 – Histograma: Velocidade x Frequência relativa. . . . .	29
Figura 9 – Histograma: Potência x Frequência relativa. . . . .	30
Figura 10 – Método Empírico para Velocidade (m/s). . . . .	34
Figura 11 – Método da Máxima Verossimilhança para Velocidade (m/s). . . . .	35
Figura 12 – Método Empírico para Densidade de Potência ( $W/m^2$ ). . . . .	35
Figura 13 – Método da Máxima Verossimilhança para Densidade de Potência ( $W/m^2$ ). . . . .	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para distribuições de velocidade de vento . . . . .	33
Tabela 2 – Parâmetros para distribuições de potência eólica . . . . .	34
Tabela 3 – Resultado dos testes de desempenho: Velocidade . . . . .	37
Tabela 4 – Resultado dos testes de desempenho: Potência . . . . .	37
Tabela 5 – Classificação dos testes de desempenho: Velocidade . . . . .	38
Tabela 6 – Classificação dos testes de desempenho: Potência . . . . .	38

## LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência
$\rho$	Densidade do ar atmosférico
V	Velocidade do vento
A	Área
x	Propriedade estudada: velocidade do vento ou potência
k	Parâmetro k da distribuição Weibull
c	Parâmetro c da distribuição Weibull
$\beta$	Parâmetro $\beta$ da distribuição Gama
$\alpha$	Parâmetro $\alpha$ da distribuição Gama
$\Omega$	Parâmetro $\Omega$ da distribuição Nakagami
m	Parâmetro m da distribuição Nakagami
$\Gamma$	Função Gama
$\gamma$	Função Gama incompleta
$\mu$	Média aritmética
s	Variância
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrado médio
MAE	Erro absoluto médio
$R^2$	Coefficiente de determinação
n	Número de dados no espaço amostral
$y^{calculado}$	Frequência relativa de x obtida pelas distribuições de probabilidade
$y^{medido}$	Frequência relativa de x obtida pelo histograma de dados medidos

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
2	<b>OBJETIVOS</b>	15
2.1	Objetivos gerais	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	16
3.1	Potencial Eólico	16
3.2	Recurso Eólico	16
3.3	Distribuições de Probabilidade	17
3.3.1	<i>Distribuição Weibull</i>	17
3.3.2	<i>Distribuição Gama</i>	20
3.3.3	<i>Distribuição Nakagami</i>	22
3.4	Métodos determinísticos para parâmetros	24
3.4.1	<i>Método Empírico</i>	24
3.4.2	<i>Método da Máxima Verossimilhança</i>	25
4	<b>METODOLOGIA</b>	26
4.1	Dados de vento	26
4.2	Tratamento de dados	28
4.3	A linguagem R	30
4.4	Aplicação dos métodos determinísticos	30
4.5	Testes de desempenho	31
4.5.1	<i>Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio</i>	31
4.5.2	<i>Erro Absoluto Médio</i>	31
4.5.3	<i>Coefficiente de Determinação</i>	32
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	33
5.1	Aproveitamento de dados	33
5.2	Gráficos	33
5.3	Resultados Testes de Desempenho	37
6	<b>CONCLUSÕES</b>	39
	<b>REFERÊNCIAS</b>	40

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de fontes alternativas para geração de energia tem sido um dos assuntos mais debatidos no ambiente científico nas últimas décadas. A crescente dificuldade em explorar combustíveis fósseis, por limitações físicas ou até mesmo geopolíticas, aliada a pressão global para uma redução na emissão de gases do efeito estufa, apresentaram a alguns países a possibilidade de tornarem-se percursores na exploração dos recursos naturais e, conseqüentemente, cada vez mais independentes do mercado petrolífero e de suas oscilações.

Nesse contexto, essas perspectivas trazem ao Brasil a possibilidade, devido a sua geografia singular, vasta extensão territorial e abundância de recursos naturais, de possuir em sua matriz energética uma porcentagem cada vez maior de energia oriunda de recursos renováveis, destacando-se a geração de energia elétrica por meio dos ventos, que recebeu investimentos governamentais ao longo dos últimos anos e corresponde a uma fração cada vez maior da matriz energética brasileira.

A velocidade do vento, principal parâmetro a ser considerado em um estudo do potencial eólico de uma região, pode apresentar variações bruscas em pequenos intervalos de tempo, causando uma grande oscilação na quantidade de energia gerada. Esse fato, acrescido do alto investimento necessário para a instalação de um parque eólico, ilustram a necessidade de aprofundados estudos preliminares nas regiões onde se planeja a instalação de parques eólicos.

Uma das ferramentas mais importantes no estudo do potencial eólico de uma região é a coleta de dados para análise das características do vento. Levando-se em consideração a alta taxa de variabilidade e aleatoriedade, estudos das distribuições de probabilidade estatística permitem ter uma melhor noção acerca do comportamento da velocidade do vento.

Para representar as distribuições de frequência de velocidades de vento e potência de geração, considera-se, na literatura especializada, a distribuição de Weibull como a melhor alternativa. Entretanto, novos estudos apontam casos onde outras distribuições apresentam um grau de confiança comparável ou até mesmo superior ao obtido com a distribuição de Weibull em condições específicas, como foi observado por Alavi *et al.* (2016), onde as distribuições Gama e Nakagami apresentaram resultados promissores como alternativas para representação do comportamento de frequência de velocidade de vento e potência de geração.

Para utilizar tais curvas de probabilidade estatística é necessário, anteriormente, determinar os parâmetros específicos para cada uma das distribuições. No presente estudo, foram utilizados dois métodos determinísticos, isto é, métodos onde são utilizadas informações obtidas

a partir do espaço amostral para parametrização.

Optou-se pela utilização do método empírico devido a sua versatilidade de aplicação e do método da máxima verossimilhança, devido a sua elevada confiabilidade.

Sendo assim, esse estudo visa utilizar a linguagem de programação R para parametrizar as distribuições de probabilidade Weibull, Gama e Nakagami na representação de dados de velocidade do vento e densidade de potência obtidos na estação meteorológica de Petrolina ao longo dos anos de 2009 e 2010 e compará-los a fim de determinar, para a estação e período estudados, qual é a distribuição de probabilidade mais confiável dentre as três.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

O presente trabalho apresenta como objetivo principal comparar diferentes distribuições de probabilidade estatística como ferramentas para representação de dados de velocidade de vento e densidade de potência obtidos em Petrolina ao longo dos anos de 2009 e 2010. Serão aplicados dois métodos determinísticos para parametrização das distribuições probabilísticas e os resultados serão comparados aos dados medidos na estação meteorológica a fim de determinar a melhor distribuição para a representação de dados eólicos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Obter dados de velocidade de vento na estação meteorológica de Petrolina ao longo do ano de 2009 e 2010 por meio da Rede SONDA;
- Tratar os dados obtidos a fim de suprimir eventuais erros de medição e garantir maior confiabilidade do estudo;
- Determinar por meio de métodos determinísticos os parâmetros para as distribuições de probabilidade escolhidas;
- Comparar as distribuições utilizadas com os dados medidos por meio de gráficos e testes de desempenho estatístico;
- Analisar os resultados a fim de determinar a melhor alternativa, dentre as apresentadas, para a representação destes dados eólicos.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Potencial Eólico

A geração de energia elétrica por meio do aproveitamento da energia oriunda dos ventos ganhou bastante espaço nas últimas décadas e apresenta perspectivas otimistas de continuar crescendo. Segundo o Relatório Eólico Global de 2018 (GWR 2018), elaborado anualmente pelo conselho global de energia eólica (*Global Wind Energy Council (2018)*), espera-se um crescimento médio anual de 2,7% da capacidade instalada no mundo até 2023.

Dos 51,3 GW de capacidade de geração de energia eólica instalada em 2018, o Brasil foi responsável por 1,939 GW, ocupando a posição de 5º país que mais instalou usinas *onshore* no ano e possui uma capacidade total instalada de 14,707 GW no seu território, o que corresponde a cerca 8,5% da potência instalada na matriz energética nacional (GWR 2018).

O Brasil possui a 6ª maior capacidade de energia eólica instalada no mundo, posição notável, porém comparando-se aos outros países percebe-se que ainda há uma grande discrepância. A França, por exemplo (5º colocado), possui capacidade de 15,037 GW com um território cerca de 13 vezes menor que o brasileiro (GWR 2018).

A importância de ampliar a fração da energia eólica na matriz energética brasileira é ainda reforçada por estudos que afirmam que é possível suprir a demanda da sazonalidade oriunda dos recursos hídricos por meio da energia eólica.

#### 3.2 Recurso Eólico

Segundo Pinto (2014), em seu livro *Fundamentos da Energia Eólica*:

"O vento é o ar em movimento."

Segundo o autor, esse movimento de ar é causado pela circulação das camadas de ar provocada pelo aquecimento desigual do planeta, as regiões próximas a linha do Equador recebem mais radiação solar que os polos do planeta, por exemplo. Cerca de 3% a 5% da radiação que o planeta recebe é convertida em energia cinética, que provoca o movimento da atmosfera devido às diferenças de temperatura.

Em linhas gerais, o princípio de funcionamento de um aerogerador consiste no aproveitamento da energia cinética do vento para mover pás eólicas e rotacionar os eixos de

aerogeradores acoplados a um gerador que transforma essa energia cinética em energia elétrica, que ao ser transmitida para as redes de transmissão pode ser utilizada pela população.

Por ser um recurso originado pela variação de temperatura e pressão da região, o vento apresenta sensíveis variações aleatórias das suas propriedades, ressaltando-se a velocidade, grandeza de importância crítica para a geração de energia. Dessa forma, a velocidade do vento é considerada uma variável aleatória e há variações da energia gerada por meio de aerogeradores ao longo do tempo.

A potência da energia eólica que pode ser obtida por um aerogerador pode ser calculada pela Equação 3.1 (PINTO, 2014).

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (3.1)$$

Onde, P é a potência em W,  $\rho$  é a densidade do ar atmosférico na região em  $\text{kg/m}^3$ , V é a velocidade do vento em m/s e A em  $\text{m}^2$  representa a área.

### 3.3 Distribuições de Probabilidade

Distribuições de probabilidade estatística funcionam como formas de representar a frequência de eventos aleatórios em diversos fenômenos de forma contínua, isto é, fenômenos estocásticos. Esse estudo propôs-se utilizá-las para representar dados de velocidade de vento e densidade de potência de uma região escolhida devido ao caráter aleatório dessas propriedades.

Para esse estudo, foram testadas três diferentes distribuições de probabilidades a fim de determinar a melhor alternativa para a localidade e período estudados.

As distribuições escolhidas para o estudo foram:

- Distribuição Weibull
- Distribuição Gama
- Distribuição Nakagami

#### 3.3.1 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull atualmente é considerada pela literatura especializada a melhor alternativa para representação da distribuição do vento segundo Akdag e Dinler (2009) e Pinto (2014), entretanto, como observado por Jung e Schindler (2018), seu uso pode ser limitado em algumas circunstâncias, podendo existir melhores alternativas para a representação desses dados.

A função Weibull é uma distribuição de probabilidade contínua e pode ser representada por 2 ou 3 parâmetros. Nesse estudo, optou-se pela abordagem de apenas 2 parâmetros, sendo o fator de forma de Weibull, representado pela letra  $k$ , que é adimensional e o fator de escala de Weibull, representado pela letra  $c$ , também chamado de fator de escala, cuja unidade é m/s.

Sua função de densidade de probabilidade, conforme utilizada por Celik (2004), pode ser utilizada para representar o gráfico de frequência x velocidade (m/s) ou densidade de potência ( $W/m^2$ ) e é dada pela Equação 3.2.

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp - \left[\left(\frac{x}{c}\right)^k\right], x \geq 0, c, k > 0 \quad (3.2)$$

Onde a variável  $x$  pode ser substituída pela velocidade ou densidade de potência.

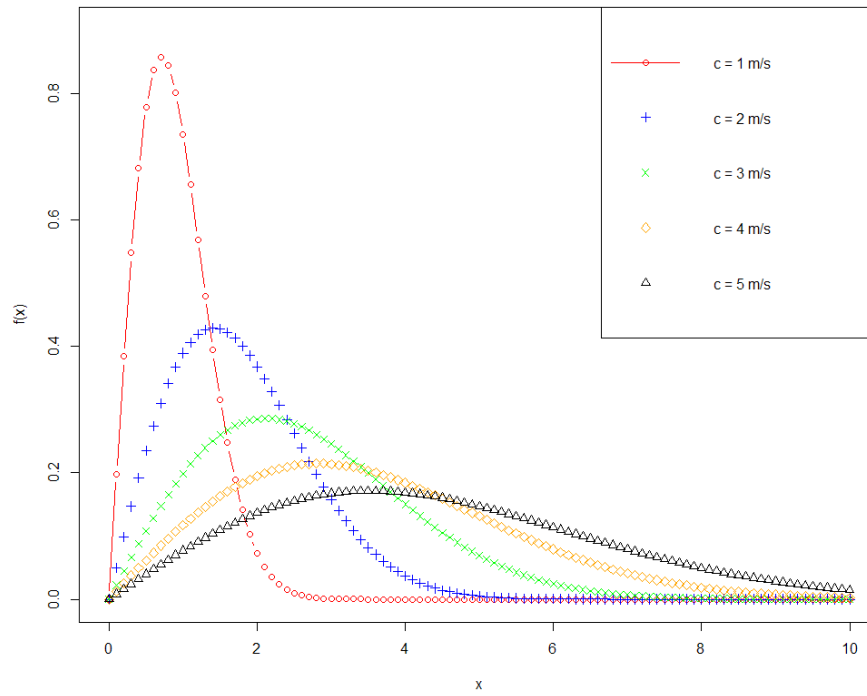
Além disso, a função de probabilidade acumulada, que apresenta uma maneira de obter-se a duração da velocidade do vento, está descrita na Equação 3.3, de acordo com Celik (2004).

$$F(x) = 1 - \exp - \left[\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (3.3)$$

Os parâmetros para a Função Weibull são independentes entre si e o seu comportamento com a variação do parâmetro  $c$  pode ser analisada de acordo com a Figura 1.

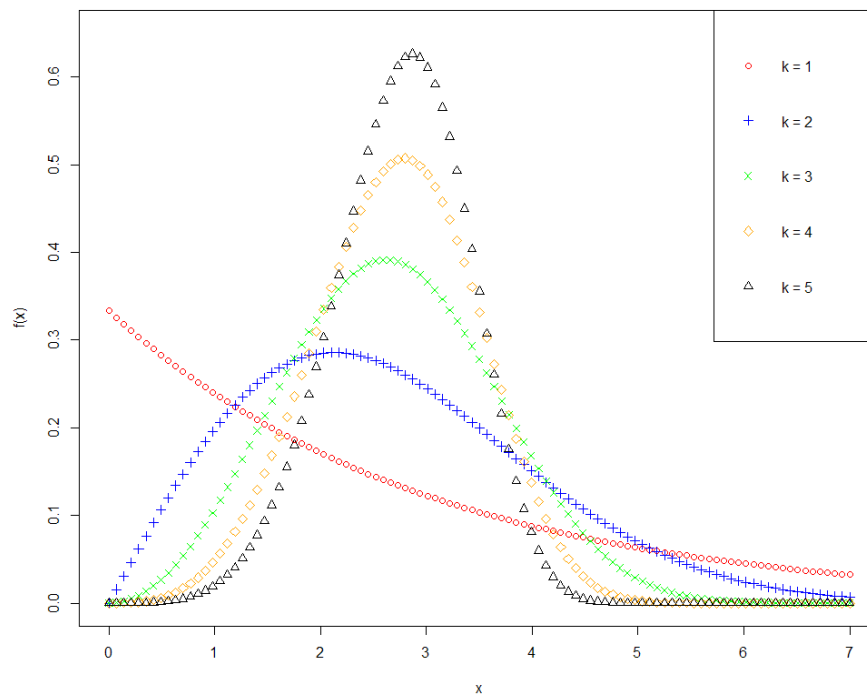
Similarmente, a variação do parâmetro  $k$  pode ser analisada de acordo com a Figura 2, onde o parâmetro  $c$  foi mantido constante em  $c = 3$  m/s.

Figura 1 – Distribuição de Weibull com  $k = 2$  (constante).



Fonte: Autor.

Figura 2 – Distribuição Weibull com  $c = 3$  m/s (constante).



Fonte: Autor.

### 3.3.2 Distribuição Gama

A distribuição gama é uma distribuição de probabilidade contínua de 2 parâmetros, alfa e beta. A distribuição gama já foi estudada como alternativa à distribuição Weibull para representação de dados de vento e bons resultados como alternativa viável foram encontrados por Aries *et al.* (2018) e Alavi *et al.* (2016).

Os parâmetros utilizados pela função gama são os parâmetros  $\alpha$  (alfa), também chamado de fator de forma e  $\beta$  (beta), ou fator de taxa, ambos adimensionais.

Sua função de densidade de probabilidade (frequência x velocidade ou potência) está representada na Equação 3.4, Masseran *et al.* (2012).

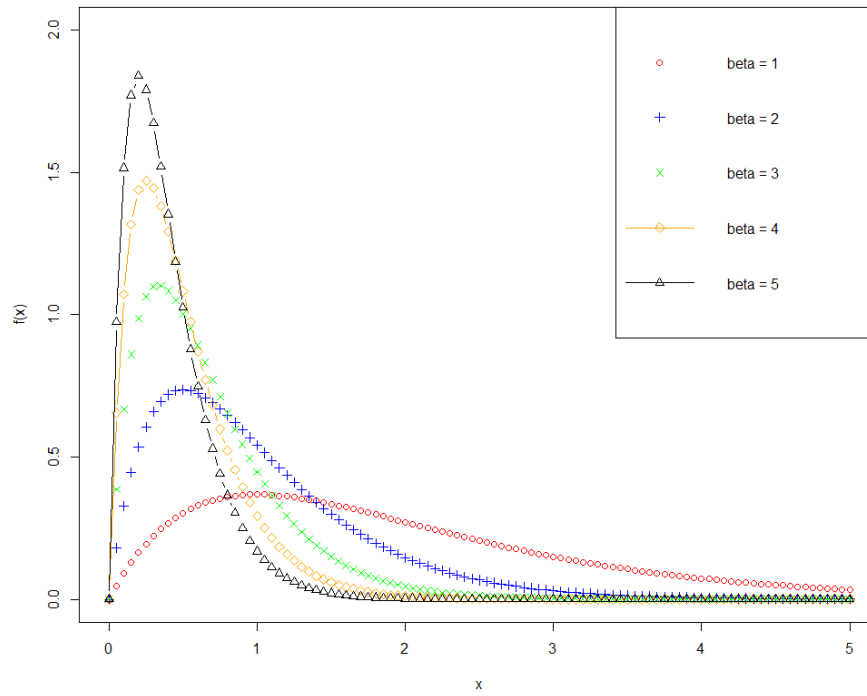
$$f(x) = \frac{x^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}\Gamma(\beta)} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right), x \geq 0, \alpha, \beta > 0 \quad (3.4)$$

A função de probabilidade acumulada, que pode ser utilizada para representar a duração da velocidade do vento, por exemplo, está representada na Equação 3.5, onde,  $\gamma(\alpha, \beta x)$  é a função gama incompleta, Masseran *et al.* (2012).

$$F(x) = \frac{\gamma(\beta, \frac{x}{\alpha})}{\Gamma(\beta)} \quad (3.5)$$

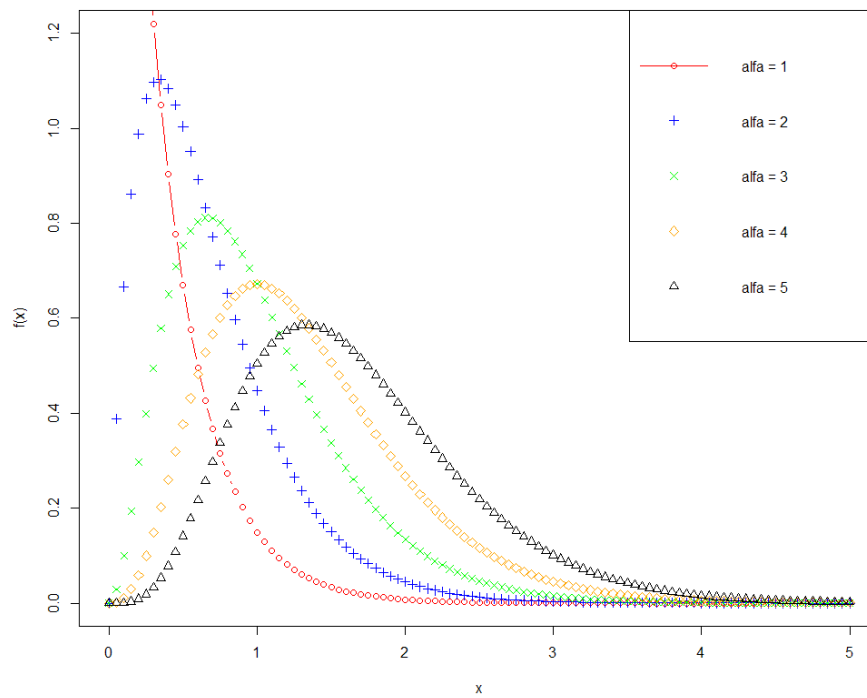
O comportamento da distribuição gama com a variação dos parâmetros pode ser observado nas Figuras 3 e 4, onde na Figura 3, o parâmetro  $\alpha$  foi mantido constante a 2 e na Figura 4, o parâmetro  $\beta$  foi mantido constante em 3.

Figura 3 – Distribuição Gama com  $\alpha = 2$  (constante).



Fonte: Autor.

Figura 4 – Distribuição Gama com  $\beta = 3$  (constante).



Fonte: Autor.

### 3.3.3 Distribuição Nakagami

Também conhecida como distribuição Nakagami- $m$  é bastante utilizada em diferentes campos científicos, e foi utilizada para descrição de dados eólicos por Alavi *et al.* (2016) com resultados promissores.

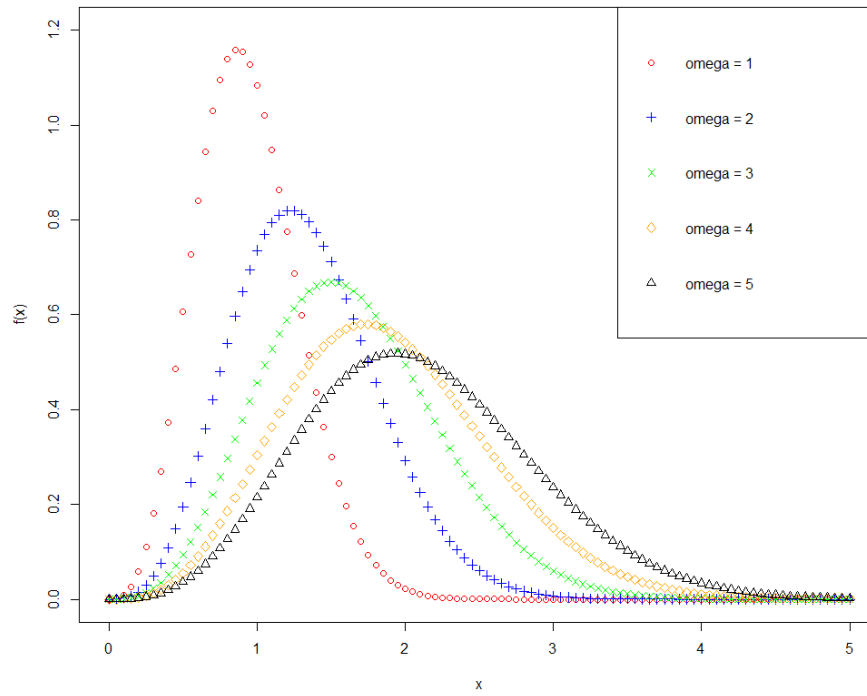
A distribuição Nakagami utiliza dois parâmetros,  $\Omega$ , fator de escala, e  $m$ , fator de forma, ambos adimensionais. As funções de densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada estão representadas, respectivamente nas Equações 3.6 e 3.7, onde,  $\gamma$  é função gama incompleta, de acordo com Nakagami (1960) e Lopez-Martinez *et al.* (2013).

$$f(x) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega}x^2\right), x \geq 0, m \geq 1/2, e \Omega > 0 \quad (3.6)$$

$$F(x) = \frac{\gamma\left(m, \frac{m}{\Omega}x^2\right)}{\Gamma(m)} \quad (3.7)$$

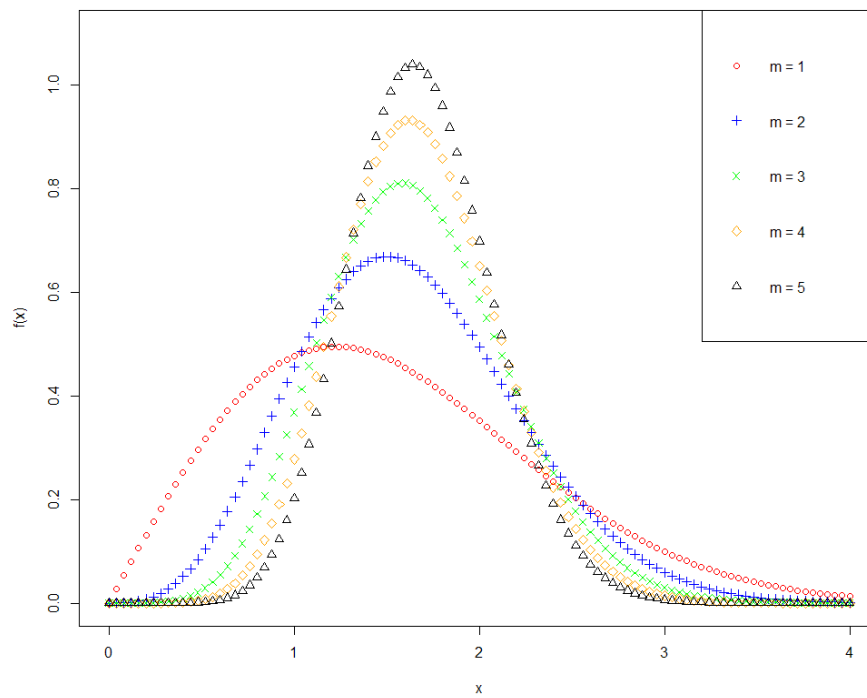
De maneira similar às distribuições apresentadas anteriormente, foram elaborados gráficos apresentando o comportamento dos parâmetros para a distribuição Nakagami e estão representados na Figuras 5, onde o parâmetro  $m$  foi mantido constante a 2, e na Figura 6, onde o parâmetro  $\Omega$  foi mantido constante a 3.

Figura 5 – Distribuição Nakagami com  $m = 2$  (constante).



Fonte: Autor.

Figura 6 – Distribuição Nakagami com  $\Omega = 3$  (constante).



Fonte: Autor.



### 3.4 Métodos determinísticos para parâmetros

Os métodos determinísticos são ferramentas onde dados obtidos a partir de um espaço amostral são utilizados para obter-se parâmetros sobre o comportamento dessa amostra. São baseados nos cálculos de derivadas de primeira ou segunda ordem, ou aproximação de derivadas.

Em problemas de otimização, nesse caso específico, na determinação de parâmetros ótimos para uma curva de distribuição, métodos determinísticos são bastante utilizados.

Exemplos de métodos determinísticos utilizados para determinar parâmetros para distribuição de probabilidade para dados de vento, por Rocha *et al.* (2012) são:

- Método Gráfico
- Método da Máxima Verossimilhança
- Método do Fator de Energia Padrão
- Método do Momento
- Método Empírico
- Método da Energia Equivalente

Para esse estudo, foram empregados os seguintes métodos por apresentarem resultados promissores por Rocha *et al.* (2012) e Andrade *et al.* (2014) e em estudos iniciais feitos pelo autor para o espaço amostral em questão:

- Método Empírico
- Método da Máxima Verossimilhança

#### 3.4.1 Método Empírico

Método de resolução bastante efetiva onde apenas o conhecimento prévio de valores estatísticos dos dados coletados é necessário para sua aplicação, especificamente, a média aritmética e o desvio padrão para cada uma das propriedades estudadas.

As equações utilizadas serão diferentes para cada parâmetro das distribuições de probabilidade utilizadas no estudo

Para a distribuição Weibull, as equações para determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ , encontrados por Chang (2011), estão representados nas Equações 3.8 e 3.9, respectivamente.

$$k = \left( \frac{\sigma}{x} \right)^{-1,086} \quad (3.8)$$

$$c = \frac{\mu(x)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.9)$$

Na distribuição Gama, para a determinação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são utilizadas as Equações 3.10 e 3.11 determinadas por Gomes *et al.* (2008).

$$\alpha = \frac{\mu(x)^2}{s(x)} \quad (3.10)$$

$$\beta = \frac{\mu(x)}{s(x)} \quad (3.11)$$

Para determinar empiricamente os parâmetros  $m$  e  $\Omega$  na distribuição Nakagami, são utilizadas as Equações 3.12 e 3.13, determinadas por Nakagami (1960).

$$m = \frac{\mu(x^2)^2}{s(x^2)} \quad (3.12)$$

$$\Omega = \mu(x^2) \quad (3.13)$$

### 3.4.2 Método da Máxima Verossimilhança

O método da máxima verossimilhança é um método bastante utilizado devido a sua elevada confiabilidade e robustez. São utilizados métodos numéricos sofisticados para parametrização e diversas iterações podem ser necessárias até obter-se um resultado adequado, sendo exigido, portanto, uma estrutura computacional mais robusta que os outros métodos.

O método foi implementado na linguagem R por meio da utilização de funções computacionais específicas para essa finalidade. Foi utilizado o mesmo método de otimização às três distribuições para garantia de condições semelhantes em todos os casos abordados.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu em obter dados de velocidade de vento que atendessem a uma série de pré-requisitos estabelecidos para garantia de confiabilidade do espaço amostral utilizado no estudo. Após coleta e tratamento desses dados, foram estudadas as principais propriedades estatísticas da amostra com o intuito de fornecer valores de entrada na aplicação de métodos determinísticos para obtenção dos parâmetros necessários na elaboração de três curvas de distribuição estatística diferentes para cada método aplicado.

Com as distribuições obtidas por meio dos diferentes métodos determinísticos foram elaborados gráficos para análise posterior dos resultados e seus valores foram testados estatisticamente para análise da sua aplicabilidade como alternativas para ilustração de dados de velocidade de vento.

### 4.1 Dados de vento

Os dados utilizados referentes às medidas anemométricas desse estudo foram obtidos por meio da Rede SONDA (2019) de dados de recursos de energia no território brasileiro.

Nessa plataforma, é possível ter acesso a um banco de dados meteorológicos de diversas estações no território brasileiro, onde as estações são classificadas de acordo com o escopo das suas medições:

- Estações Radiométricas;
- Estações Anemométricas;
- Estações Radiométricas e Anemométricas.

Considerando o escopo do estudo, foram abordadas apenas as estações anemométricas, onde a medição dos dados é focada em estudos de potencial eólico. A medição nessas estações é feita em uma torre de 50 metros de altura com dois pontos de coleta, aos 25 metros de altura e aos 50 metros, sendo os dados coletados a cada 10 minutos, fornecendo as seguintes características:

- Velocidade do Vento a 25 metros;
- Direção do Vento a 25 metros;
- Temperatura a 25 metros;
- Velocidade do Vento a 50 metros;
- Direção do Vento a 50 metros;

- Temperatura a 50 metros.

Além dos dados principais (radiométricos ou anemométricos), em todas as estações são medidas variáveis informativas, sobre a data e hora em que os dados foram medidos, e variáveis meteorológicas referentes às condições climáticas na estação (temperatura, pressão, umidade do ar, por exemplo).

Os dados estão disponíveis na plataforma para acesso livre e gratuito em arquivos no formato .CSV, divididos por estação e mês/ano.

Os dados utilizados no estudo foram obtidos na estação meteorológica PTR - 11, pertencente ao instituto de pesquisa Embrapa Semiárido, localizado a cerca de 40 quilômetros da cidade de Petrolina no interior de Pernambuco. Suas coordenadas geográficas são: 09° 04' 08"S de latitude e 40° 19' 11"O de longitude. A estação está localizada a 387 metros acima do nível do mar.

Figura 7 – Localização da estação PTR - 11 via satélite.



Fonte: Google Maps.

A estação utilizada está localizada no sudoeste do estado de Pernambuco, na fronteira com a Bahia, em uma região conhecida como depressão sertaneja nas proximidades do Rio São Francisco. O clima da região é semiárido quente e a estação está localizada a 420 quilômetros do Oceano Atlântico.

## 4.2 Tratamento de dados

Para garantir maior confiabilidade do estudo, foi necessário respeitar uma série de fatores estabelecidos para os dados utilizados, entre esses, destacam-se:

1. Dados de velocidade medidos acima de 50 metros de altura:

Para reduzir a influência da turbulência nos dados de velocidade, sugere-se a utilização de dados de velocidade obtidos por anemômetros localizados a pelo menos 50 metros de altura do chão.

2. Número mínimo de 52560 dados no estudo:

A Norma IEC 61400 Part 12-1 (2005b) define para a validação do estudo um tempo mínimo de um ano de dados integrados em um período de 10 minutos, resultando um total de 52560 valores.

3. Aproveitamento mínimo de 90% dos dados:

Na obtenção de dados por meio de instrumentos de medição, principalmente durante longos períodos de tempo, é possível haver a presença de erros de medição, dados que podem ocasionar erros na computação dos dados ou *outliers*, que podem ter um peso significativo no resultado. Exemplos disso no caso de um anemômetro são dados com valores "N/A", valores negativos e valores com medições irreais.

Esses valores devem ser removidos do espaço amostral e, para que os dados restantes ainda sejam suficientemente representativos, é necessário que a razão entre o número de dados restante e o número inicial seja maior que 90%.

Dessa forma, após a coleta de dados, para garantia de que não haveria interferências nos resultados causados por erros no processo de medição ou *outliers* e respeitar os requisitos estabelecidos para garantia de uma boa qualidade do estudo, foi realizado um tratamento nos dados coletados, onde foram removidos:

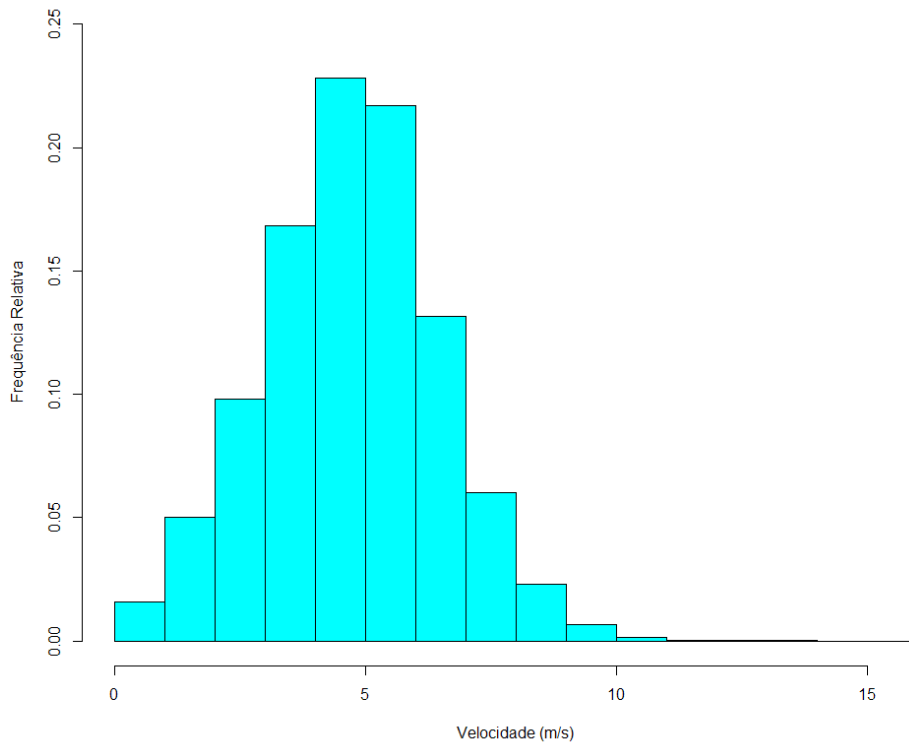
- Dados de velocidade com valores negativos;
- Dados de velocidade com valores superiores a 20 m/s;
- Dados com erro de medição.

Após o tratamento, foi analisada a razão de aproveitamento final dos dados comparando a quantidade de dados antes e depois do tratamento. Foi verificado se o requisito de aproveitamento de dados superior a 90% estabelecido anteriormente foi respeitado para que dados pudessem ser utilizados no estudo.

Os dados de vento pós-tratamento para velocidade e densidade de potência, medidos

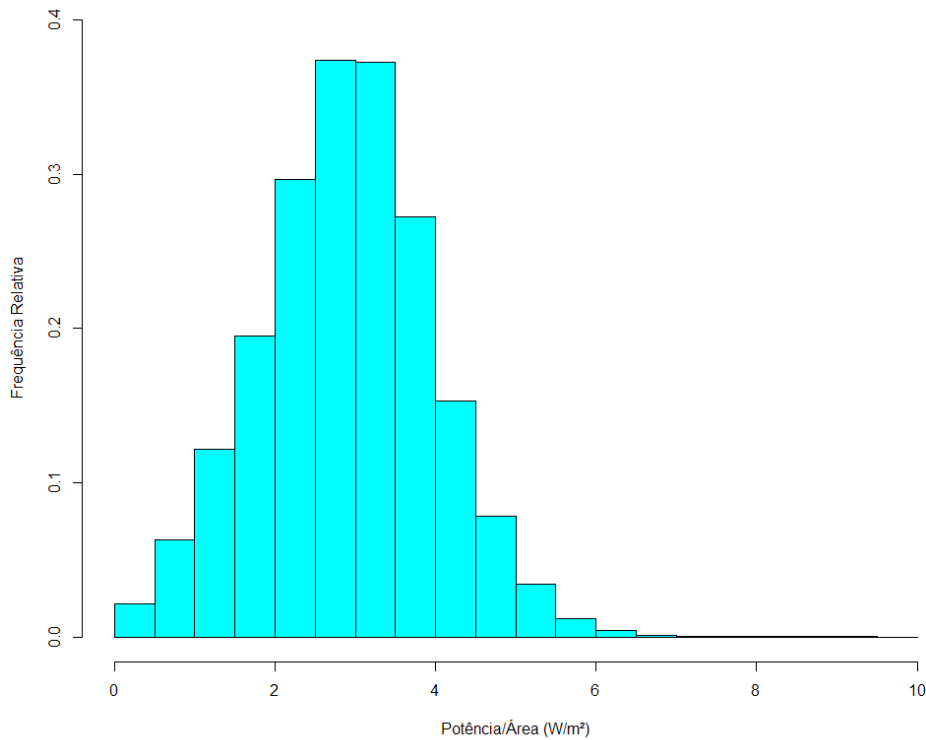
na estação de Petrolina no período escolhido, estão representados nos histogramas das Figuras 8 e 9. Cabe ressaltar a similaridade entre ambos os histogramas devido a natureza proporcional da velocidade e densidade de potência do vento.

Figura 8 – Histograma: Velocidade x Frequência relativa.



Fonte: Autor.

Figura 9 – Histograma: Potência x Frequência relativa.



Fonte: Autor.

### 4.3 A linguagem R

Todo o estudo, incluindo o tratamento dos dados, aplicação dos métodos determinísticos e testes estatísticos, foi elaborado na linguagem R de programação, que, atualmente, é bastante utilizada para estudos estatísticos devido a variedade e qualidade das funções estatísticas embutidas no programa e facilidade de manipulação de dados e de gráficos.

Também foi utilizado o software RStudio, um software de acesso livre que funciona como interface para a utilização da linguagem R entre a máquina e o programador e apresenta uma vasta gama de funcionalidades, como correção da sintaxe em tempo real e repositório de bibliotecas, que tornam o processo de escrita dos *scripts* para o estudo mais flexível e produtivo.

### 4.4 Aplicação dos métodos determinísticos

Posteriormente, os métodos determinísticos escolhidos foram aplicados utilizando informações obtidas por meio dos próprios dados de vento, para determinação dos parâmetros que seriam utilizados na construção das curvas de distribuição para cada caso.

Os parâmetros obtidos foram aplicados no software R para geração de curvas, que ao serem comparadas com o histograma dos dados, possibilitaram visualizar a semelhança de cada caso com o histograma de dados, quão mais semelhante, mais adequada a distribuição.

#### 4.5 Testes de desempenho

Para validar de maneira mais definitiva a confiabilidade da aplicação de cada curva como alternativa para reprodução dos dados de vento, foram utilizados testes estatísticos de confiabilidade que compararam os valores do histograma com os mesmos valores das curvas.

Foram comparados os valores medidos pelo anemômetro, valores reais das propriedades de vento, para cada intervalo do histograma e os valores calculados pelas curvas de distribuição para a mesma velocidade.

Os testes utilizados foram:

- Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE);
- Erro Absoluto Médio (MAE);
- Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ).

##### 4.5.1 Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio

A raiz quadrada do erro quadrático médio, do inglês *root mean squared error (RMSE)* é uma medida de erro baseada na dispersão de variáveis previstas e reais em torno de um valor esperado médio para determinar a eficácia da previsão realizada. Seu valor é sempre maior que zero, onde valores menores representam uma previsão mais próxima da realidade. Seu valor pode ser determinado por meio da Equação 4.1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{calculado} - y_i^{medido})^2}{n}} \quad (4.1)$$

##### 4.5.2 Erro Absoluto Médio

O erro absoluto médio, do inglês *mean absolute error (MAE)*, Equação 4.2, é um teste estatístico que mede o afastamento médio das previsões em relação aos valores observados. Seu resultado é sempre positivo e valores menores representam previsões mais precisas.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i^{calculado} - y_i^{medido}| \quad (4.2)$$



### 4.5.3 Coeficiente de Determinação

O coeficiente de determinação, também chamado de coeficiente  $R^2$ , é uma medida da capacidade do método para estimar corretamente as variáveis. Seu valor pode ser determinado pela Equação 4.3. Seu resultado varia de zero a um, onde previsões que obtém resultado mais próximo a um apresentam uma acurácia superior.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{medido} - \bar{y}^{medido})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i^{medido} - y_i^{calculado})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{medido} - \bar{y}^{medido})^2} \quad (4.3)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Aproveitamento de dados

Após aplicar o tratamento de dados ao espaço amostral coletado, seguindo a metodologia estabelecida, foram removidos 7599 dados, de um total de 105120, contabilizando um aproveitamento final de 92.77% de dados utilizáveis no estudo. Fração suficientemente representativa do número inicial, respeitando o critério estabelecido e permitindo a utilização dos dados pós-tratamento no estudo.

### 5.2 Gráficos

O resultado da parametrização do espaço amostral de velocidade de vento e potência por meio de métodos determinísticos está representado nas Tabelas 1 e 2 para cada curva de distribuição estudada e método aplicado.

Tabela 1 – Parâmetros para distribuições de velocidade de vento

Distribuição	Método determinístico	Parâmetro	Valor
Weibull	Empírico	k	2,953769
		c	5,287458
	Máxima Verossimilhança	k	2,925639
		c	5,273961
Gama	Empírico	$\alpha$	7,349455
		$\beta$	1,557613
	Máxima Verossimilhança	$\alpha$	5,589574
		$\beta$	1,184631
Nakagami	Empírico	$\Omega$	25,292622
		m	2,172175
	Máxima Verossimilhança	$\Omega$	25,291894
		m	1,751827

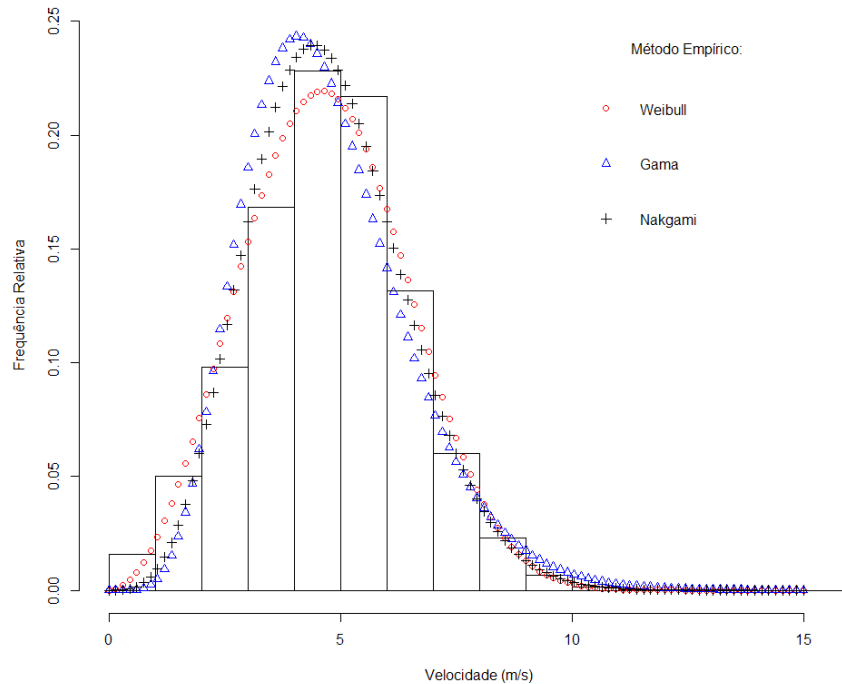
Esses parâmetros foram utilizados na composição das curvas de distribuição probabilística para cada método e comparados aos histogramas dos dados medidos pelo anemômetro.

Tabela 2 – Parâmetros para distribuições de potência eólica

Distribuição	Método determinístico	Parâmetro	Valor
Weibull	Empírico	k	2,925641
		c	3,230302
	Máxima Verossimilhança	k	2,953769
		c	3,238568
Gama	Empírico	$\alpha$	7,349455
		$\beta$	2,543041
	Máxima Verossimilhança	$\alpha$	5,589561
		$\beta$	1,934085
Nakagami	Empírico	$\Omega$	9,488685
		m	2,172175
	Máxima Verossimilhança	$\Omega$	9,488686
		m	1,751828

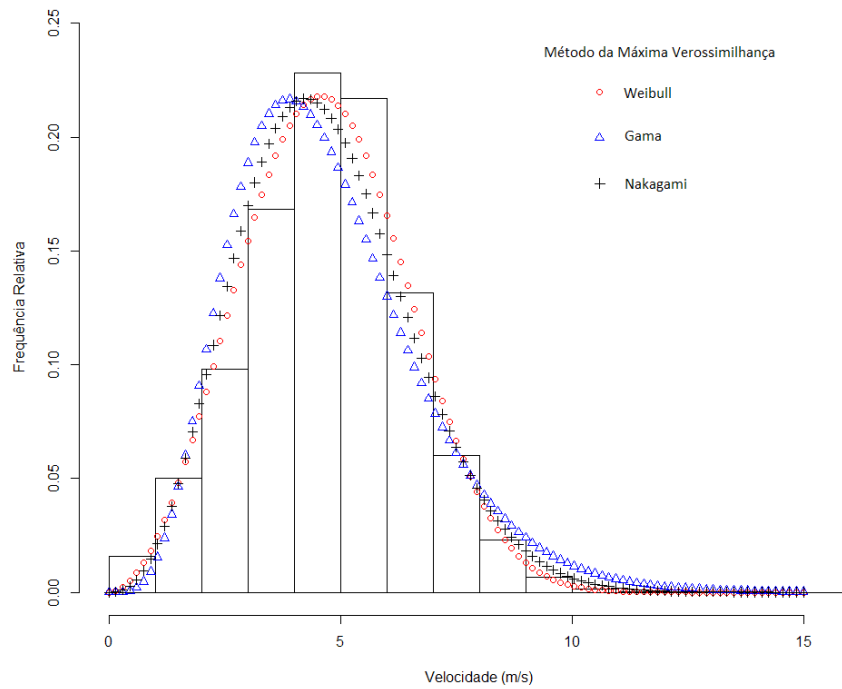
Os gráficos representados nas Figuras 10 e 11, para os dados de velocidade, e nas Figuras 12 e 13 para os dados de potência, permitem uma análise gráfica inicial da eficácia de cada método na representação dos dados medidos.

Figura 10 – Método Empírico para Velocidade (m/s).



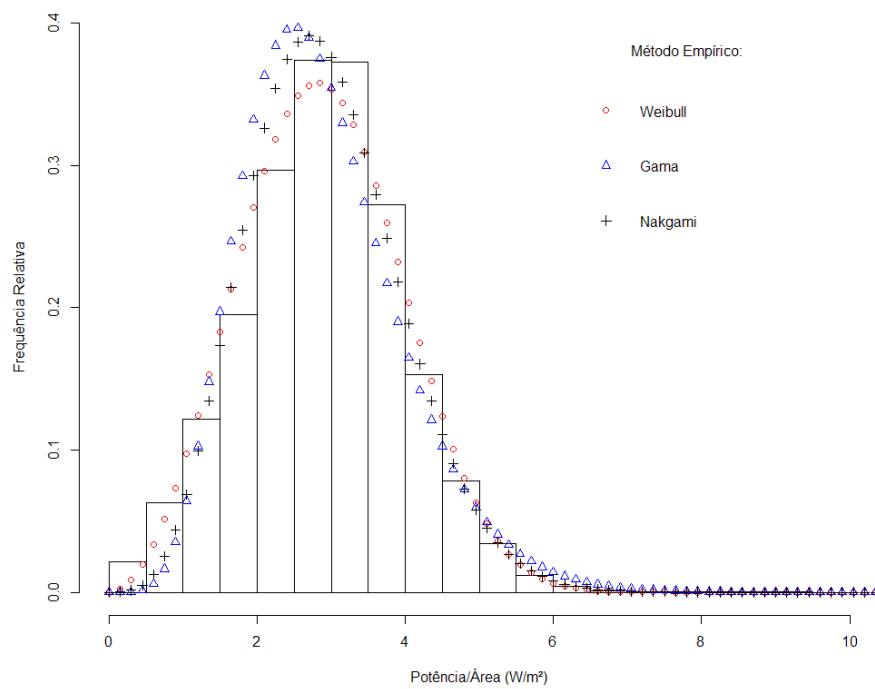
Fonte: Autor.

Figura 11 – Método da Máxima Verossimilhança para Velocidade (m/s).



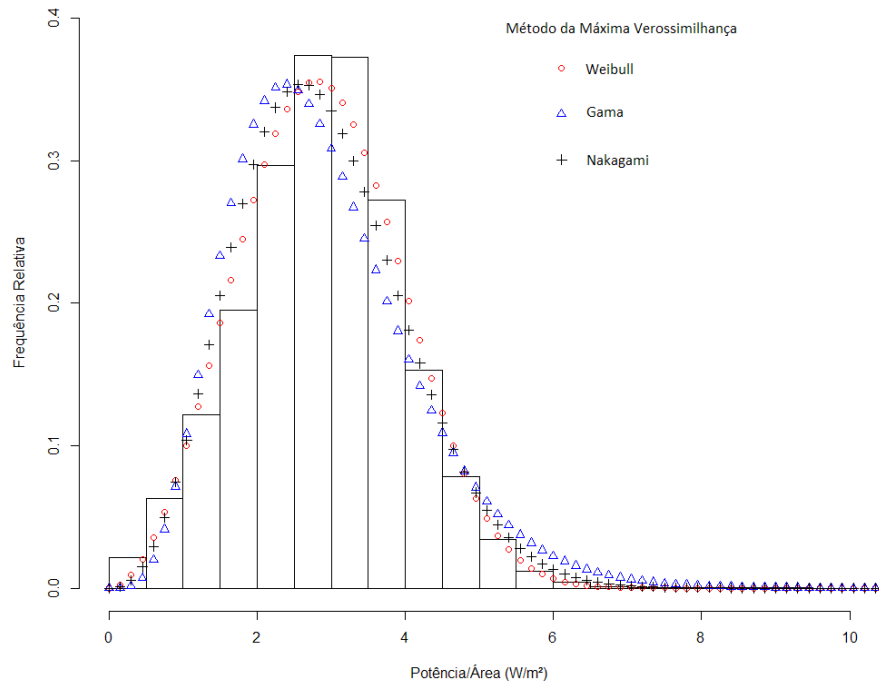
Fonte: Autor.

Figura 12 – Método Empírico para Densidade de Potência ( $W/m^2$ ).



Fonte: Autor.

Figura 13 – Método da Máxima Verossimilhança para Densidade de Potência ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



Fonte: Autor.

Em todas os gráficos apresentados, ao comparar-se os seus resultados com o histograma de dados, é possível observar que a distribuição Weibull obteve um desempenho superior em relação às outras curvas. Porém é necessária uma análise mais aprofundada da eficácia de cada curva por meio dos testes de desempenho.

### 5.3 Resultados Testes de Desempenho

A fim de garantir uma análise mais confiável sobre o desempenho das curvas de distribuição, foi necessário utilizar testes de desempenho estatístico, onde os resultados das funções calculadas foram comparados aos dados medidos, resultando variáveis que podem ser comparadas a fim de determinar o desempenho de cada curva.

O resultado desses testes para cada curva e método determinístico está representado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Resultado dos testes de desempenho: Velocidade

Distribuição	Método determinístico	Testes de Desempenho		
		RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
Weibull	Empírico	0,00899	0,00557	0,98691
	Máxima Verossimilhança	0,00961	0,00570	0,98506
Gama	Empírico	0,02156	0,01356	0,92472
	Máxima Verossimilhança	0,02458	0,01604	0,90217
Nakagami	Empírico	0,01313	0,00786	0,97208
	Máxima Verossimilhança	0,01606	0,01006	0,95825

Tabela 4 – Resultado dos testes de desempenho: Potência

Distribuição	Método determinístico	Testes de Desempenho		
		RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
Weibull	Empírico	0,01512	0,00956	0,98611
	Máxima Verossimilhança	0,01612	0,01008	0,98422
Gama	Empírico	0,03505	0,02087	0,92541
	Máxima Verossimilhança	0,04024	0,02668	0,90165
Nakagami	Empírico	0,02132	0,01241	0,97241
	Máxima Verossimilhança	0,02645	0,01651	0,95752

Os resultados dos testes de desempenho foram organizados de maneira a facilitar a visualização apresentando a classificação de cada distribuição e método, e podem ser observados de maneira nas Tabelas 5 e 6.

Pode-se observar que, segundo o resultado dos testes de desempenho aplicado, para as propriedades de velocidade do vento e densidade de potência, a parametrização da distribuição Weibull pelo método empírico obteve o melhor desempenho. O método da máxima verossimilhança para Weibull também apresentou resultados bastante adequados e semelhantes aos obtidos com o método empírico, apesar de inferiores em todos os testes aplicados.

Tabela 5 – Classificação dos testes de desempenho: Velocidade

Distribuição	Método determinístico	Testes de Desempenho		
		RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
Weibull	Empírico	1	1	1
	Máxima Verossimilhança	2	2	2
Nakagami	Empírico	3	3	3
	Máxima Verossimilhança	4	4	4
Gama	Empírico	5	5	5
	Máxima Verossimilhança	6	6	6

Tabela 6 – Classificação dos testes de desempenho: Potência

Distribuição	Método determinístico	Testes de Desempenho		
		RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
Weibull	Empírico	1	1	1
	Máxima Verossimilhança	2	2	2
Nakagami	Empírico	3	3	3
	Máxima Verossimilhança	4	4	4
Gama	Empírico	5	5	5
	Máxima Verossimilhança	6	6	6

Para as outras distribuições, é possível observar, mais uma vez, um melhor desempenho do método empírico frente ao método da máxima verossimilhança em todos os testes de desempenho estatístico. O resultado da distribuição Gama na representação de dados de vento foi considerado insatisfatório.

Não há grandes variações entre os resultados obtidos entre as propriedades de velocidade de vento e potência. A classificação dos testes de desempenho para as curvas e métodos foi a mesma para ambas propriedades.

Percebeu-se, com base nos resultados, que a distribuição Weibull obteve o melhor desempenho entre as alternativas estudadas para representação de dados de velocidade de vento e potência.

## 6 CONCLUSÕES

Os dados anemométricos obtidos na estação meteorológica de Petrolina ao longo dos anos 2009 e 2010 foram estudados, utilizaram-se dois métodos determinísticos (método empírico e método da máxima verossimilhança) para determinação dos parâmetros para as curvas de distribuição de probabilidade de Weibull, Gama e Nakagami e assim determinar-se a melhor alternativa para representação de dados de velocidade de vento e potência para a região e o período escolhidos.

Os dados obtidos foram tratados e obteve-se um aproveitamento final de 92,77%. Os dados pós-tratamento foram aplicados no estudo para elaboração de histogramas de dados medidos e, com base em propriedades estatísticas desse espaço amostral, parametrizou-se por meio de métodos determinísticos as curvas de distribuição que foram comparadas aos resultados reais obtidos na estação meteorológica.

Com base nos resultados obtidos no estudo, por meio de gráficos comparativos e testes estatísticos de desempenho aplicados às curvas de distribuição elaboradas utilizando os métodos determinísticos e os histogramas representativos dos dados reais medidos para ambas as propriedades analisadas, a distribuição Weibull apresentou-se como uma boa alternativa para representação de dados de vento em comparação às distribuições Gama e Nakagami com RMSE de 0,009, MAE de 0,006 e  $R^2$  de 0,987 para o método empírico.

Foi perceptível um desempenho superior entre os resultados obtidos pelo método empírico em relação ao método da máxima verossimilhança com uma diferença média de 0,65% entre ambos, chegando até 2,7% no RMSE da distribuição Gama. Credita-se esse fato ao grande número de iterações realizadas no método da máxima verossimilhança o que pode ocasionar um acúmulo de erros ao longo do processo.

Além disso, foi observada uma discrepância notável entre os resultados dos testes estatísticos das três curvas, notavelmente, a distribuição Gama apresentou o pior desempenho dentre as três estudadas, com um  $R^2$  de 0,925. A distribuição Nakagami apresentou resultados levemente satisfatórios, com  $R^2$  de 0,972, mas ainda inferiores aos obtidos com a distribuição Weibull.

Por fim, o estudo apresentado serve para confirmar o elevado grau de confiabilidade da distribuição Weibull para representação de dados de vento e afirmar que entre as distribuições estudadas, para a região de Petrolina, a distribuição Weibull representa a melhor alternativa na representação de dados eólicos.



## REFERÊNCIAS

- AKDAG, S. A.; DINLER, A. A new method to estimate weibull parameters for wind energy applications. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 50, p. 1761–1766, 2009.
- ALAVI, O.; MOHAMMADI, K.; MOSTAFAEIPOUR, A. Evaluating the suitability of wind speed probability distribution models: A case of study of east and southeast parts of iran. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 119, p. 101–108, 2016.
- ANDRADE, C. F. de; NETO, H. F. M.; ROCHA, P. A. C.; SILVA, M. E. V. da. An efficiency comparison of numerical methods for determining weibull parameters for wind energy applications: A new approach applied to the northeast region of brazil. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 86, p. 801–808, 2014.
- ARIES, N.; BOUDIA, S. M.; OUNIS, H. Deep assessment of wind speed distribution models: A case study of four sites in algeria. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 155, p. 78–90, 2018.
- CELIK, A. N. On the distributional parameters used in assessment of the suitability of wind speed probability density functions. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 45, p. 1735–1747, 2004.
- CHANG, T. P. Performance comparison of six numerical methods in estimating weibull parameters for wind energy application. **Applied Energy**, Elsevier, v. 88, p. 272–282, 2011.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2018**. 2018. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2018/>>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- GOMES, O.; COMBES, C.; DUSSAUCHOY, A. Parameter estimation of the generalized gamma distribution. **Mathematics and Computers in Simulation**, Elsevier, v. 79, p. 955–963, 2008.
- JUNG, C.; SCHINDLER, D. Sensitivity analysis of the system of wind speed distributions. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 117, p. 376–384, 2018.
- LOPEZ-MARTINEZ, F. J.; MORALES-JIMENEZ, D.; MARTOS-NAYA, E.; PARIS, J. F. On the bivariate nakagami-m cumulative distribution function: closed-form expression and applications. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 61, p. 1404–1414, 2013.
- MASSERAN, N.; RAZALI, A.; IBRAHIM, K. An analysis of wind power density derived from several wind speed density functions: The regional assessment on wind power in malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 16, p. 6476–6487, 2012.
- NAKAGAMI, M. The m-distribution—a general formula of intensity distribution of rapid fading. **Statistical Methods in Radio Wave Propagation**, Faculty of Engineering, Kobe University, v. 1, p. 3–6, 6a, 7–36, 1960.
- PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica**. [S.l.]: LTC, 2014. v. 1ed.
- ROCHA, P. A. C.; SOUSA, R. C. de; ANDRADE, C. F. de; SILVA, M. E. V. da. Comparison of seven numerical methods for determining weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of brazil. **Applied Energy**, Elsevier, v. 89, p. 395–400, 2012.

SONDA. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. 2019. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 02 fev. 2019.