

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Elias Rocha Gonçalves Júnior

ENERGIA EÓLICA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO SOB UMA  
ABORDAGEM MULTICRITERIAL E ESTATÍSTICA

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ  
Dezembro de 2018

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES - UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Elias Rocha Gonçalves Júnior

ENERGIA EÓLICA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO SOB UMA  
ABORDAGEM MULTICRITERIAL E ESTATÍSTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Candido Mendes – Campos/RJ, como parte das exigências para obtenção para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Cláudio Luiz Melo de Souza , D.Sc.

Coorientador: Prof. Milton Erthal Junior, D.Sc.

CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ  
Dezembro de 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca da **UCAM – CAMPOS** 001/2019

Gonçalves Júnior, Elias Rocha.

Energia eólica no estado do Rio de Janeiro sob uma abordagem multicriterial e estatística. / Elias Rocha Gonçalves Júnior . – 2018.  
75 f.; il.

Orientador: Cláudio Luiz Mello de Souza.  
Co-orientador: Milton Erthal Júnior.

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Candido Mendes – Campos. Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.  
Referências: f. 67-75.

1. Energia eólica. 2.Multicritério. I. Universidade Candido Mendes – Campos. II. Título.

CDU – 621.548

# ENERGIA EÓLICA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: UMA ABORDAGEM MULTICRITERIAL E ESTATÍSTICA

Elias Rocha Gonçalves Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Candido Mendes – Campos/RJ, como parte das exigências para obtenção para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em 14/12/2018

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Cláudio Luiz Melo de Souza, D.Sc. - Orientador  
Universidade Candido Mendes (UCAM)

---

Prof. Milton Erthal Junior, D.Sc. - Coorientador  
Universidade Candido Mendes (UCAM)

---

Prof. Ítalo de Oliveira Matias, D.Sc.  
Universidade Candido Mendes (UCAM)

---

Prof. Gilmar Santos Costa, D.Sc.  
Instituto Federal Fluminense (IFF)

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Dezembro de 2018

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho a minha família, que sempre esteve ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, a minha família, a todos aqueles que fizeram parte desta caminhada, professores, colegas mestrandos e demais companheiros do CEPECAM, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro ao longo do curso.

Além destes, agradeço aos professores Cláudio Luiz Melo de Souza e Milton Erthal Junior, pela paciência, cordialidade e dedicação para a realização deste trabalho.

Agradeço especialmente a Virgínia Siqueira Gonçalves pelo companheirismo incondicional durante o curso e na vida.

## RESUMO

O discurso ambiental em torno dos impactos negativos das fontes de eletricidade, como a emissão de gases de efeito estufa, reforça a necessidade de se utilizar fontes mais limpas para a produção de energia. Diante deste cenário, observa-se que a energia eólica tem sido relevante na diversificação da matriz elétrica e, por consequência, na redução da dependência de combustíveis fósseis e das emissões de carbono, no aumento da autonomia e da segurança energética, melhora a economia local, com oferta de empregos e investimento, além de atuar como linha paralela de ativos com a energia hidrelétrica. Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise das regiões do Estado do Rio de Janeiro, destacando aquela de maior potencialidade para implementação de um parque de geração de energia eólica. Para tal, verificou-se fatores condicionantes, como as possibilidades de escoamento da produção, a disposição e custo de áreas de implantação, e a disponibilidade de recursos, neste caso o regime dos ventos. Neste âmbito, foi realizado um levantamento bibliométrico de publicações relacionadas a utilização de métodos estatísticos para análise de potencial eólico, além de terem sido determinadas, a partir de uma abordagem multicriterial pelo Método de Análise Hierárquica, a região e alturas dos equipamentos com maior potencial de geração eólico. Por ter uma área potencial mais extensa que as demais, a região Norte proporciona uma produção total maior, também levando em consideração sua maior eficiência nos aerogeradores a 100 metros de altura, considerando esta região como a mais adequada. Cabe destacar que, nesta região, há potencial para instalação em todas as alturas apresentadas, esquadrinhando os resultados obtidos. Por fim, analisou-se o regime dos ventos do distrito de Farol de São Tomé, em Campos dos Goytacazes, região Norte, utilizando a distribuição estatística de Weibull.

**Palavras-chave:** Energias renováveis. Energia eólica. Levantamento bibliométrico. Auxílio multicritério à decisão. Distribuição de Weibull.

## ABSTRACT

The environmental speech around electricity sources negative impacts, such as greenhouse gases emission, reinforces the need to use cleaner sources for energy production. Given this scenario, it is observed that wind energy has been relevant in electric matrix diversification and, consequently, in reducing dependence on fossil fuels and carbon emissions, increasing autonomy and energy security, improving the local economy, offering jobs and investment, as well as acting as a parallel line of assets with hydroelectric energy. The work has the objective to analyze the regions of the State of Rio de Janeiro, highlighting the one with the greatest potential for the implementation of a wind energy generation farm. To that end, conditioning factors were verified, such as production outflow possibilities, deployment areas layout and cost, and the availability of resources, in this case the wind regime. In this context, a bibliometric survey of publications related to the use of statistical methods for analysis of wind potential was carried out. In addition, the region and hub heights with highest potential of wind energy generation. Due to its larger potential area than the others, the North region provides a larger total production, also taking into account its greater efficiency in aerogenerators at 100 meters in height, considering this region as the most adequate. It should be noted that, in this region, there is potential for installation in all the heights presented, scrutinizing the results obtained. Finally, the wind regime of the Farol de São Tomé district, in Campos dos Goytacazes, North region, was analyzed using the Weibull statistical distribution.

**Keywords:** Renewable energies. Wind energy. Bibliometric survey. Multicriteria aid to the decision. Weibull distribution.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ARTIGOS IDENTIFICADOS POR ANO.....	23
FIGURA 2 - NUVEM DE PALAVRAS FORMADA PELOS RESUMOS DOS ARTIGOS ENCONTRADOS.....	24
FIGURA 3 - AUTORES COM MAIOR NÚMERO DE REGISTROS .....	25
FIGURA 4 - INSTITUIÇÕES DE ENSINO COM MAIOR NÚMERO DE REGISTROS.....	25
FIGURA 5 - ARTIGOS DIVIDIDOS POR TÓPICOS DE PUBLICAÇÃO .....	26
FIGURA 6 - ARTIGOS DIVIDIDOS POR PERIÓDICO.....	28
FIGURA 7 - ÁREAS POTENCIAIS NOS ESTADO DO RIO DE JANEIRO.....	37
FIGURA 8 - MALHA ELÉTRICA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.....	42
FIGURA 9 - HIERARQUIA DOS CRITÉRIOS.....	45
FIGURA 10 - MATRIZ DE PESOS DE CRITÉRIOS.....	46
FIGURA 11 - MATRIZ DE PRIORIDADES À LUZ DOS CRITÉRIOS PARA AEROGERADORES DE 50, 75 E 100 METROS DE ALTURA. ....	47
FIGURA 12 - FREQUÊNCIA RELATIVA DE OCORRÊNCIA ANUAL DA VELOCIDADE DO VENTO A UMA ALTURA DE 10 M .....	57
FIGURA 13 - FREQUÊNCIA RELATIVA DE OCORRÊNCIA ANUAL DA VELOCIDADE DO VENTO A UMA ALTURA DE 50 M .....	58
FIGURA 14 - FREQUÊNCIA RELATIVA DE OCORRÊNCIA ANUAL DA VELOCIDADE DO VENTO A UMA ALTURA DE 75 M .....	58
FIGURA 15 - FREQUÊNCIA RELATIVA DE OCORRÊNCIA ANUAL DA VELOCIDADE DO VENTO A UMA ALTURA DE 100 M .....	59
FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE VELOCIDADE MÉDIA, AFERIDOS E CALCULADOS, PARA A ALTURA DE 10 METROS.....	61
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE ANUAIS DA VELOCIDADE DO VENTO CALCULADAS A PARTIR DA FUNÇÃO WEIBULL, PARA ALTURAS DE 10, 50, 75 E 100 METROS. ....	62
FIGURA 18 - VALORES CALCULADOS DE DENSIDADE DE POTÊNCIA MÉDIA PARA AS ALTURAS ESTUDADAS.....	63

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TERMOS DE BUSCA UTILIZADOS .....	23
TABELA 2 - CIDADES DE MAIOR POTENCIAL DE CADA ÁREA EM ESTUDO .....	38
TABELA 3 - POTENCIAL ANUAL DAS REGIÕES ESTUDADAS NAS ALTURAS DE 50, 75 E 100 METROS .....	40
TABELA 4 - MÉDIA DO VALOR DA TERRA NUA DAS REGIÕES NORTE, DOS LAGOS E SERRANA .....	41
TABELA 5 - QUANTIFICAÇÃO DE USINAS E/OU SUBESTAÇÕES POR REGIÃO. ....	42
TABELA 6 - DELIMITAÇÃO DOS ESPAÇOS PROPÍCIOS À INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES DE ACORDO COM A ALTURA.....	43
TABELA 7 - ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO POR PESOS DO RELEVO, MALHA RODOVIÁRIA E ACESSO PORTUÁRIO DE CADA REGIÃO.....	44
TABELA 8 - TABELA DE PAGAMENTO PARA AEROGERADORES DE 50, 75 E 100 METROS DE ALTURA .....	46
TABELA 9 - PRIORIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS POR REGIÃO PARA AEROGERADORES DE 50, 75 E 100 METROS DE ALTURA .....	48
TABELA 10 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA VELOCIDADE DO VENTO PARA DIFERENTES ALTURAS.....	59
TABELA 11 - VALORES DOS DOIS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL PARA AS ALTURAS ESTUDADAS.....	60

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - DESCRIÇÃO DOS VALORES ATRIBUÍDOS NA ESCALA AHP PARA COMPARAÇÃO AOS PARES.....	35
QUADRO 2 - CRITÉRIOS CONSIDERADOS PARA A ANÁLISE.....	39

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - MODELO DE LEI DE POTÊNCIA.....	54
EQUAÇÃO 2 - EQUAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DO VALOR DE ALFA. ....	54
EQUAÇÃO 3 - FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL DE DOIS PARÂMETROS. ....	55
EQUAÇÃO 4 - FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DE WEIBULL. ....	55
EQUAÇÃO 5 - FUNÇÃO LINEARIZADA DA DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DE WEIBULL.....	55
EQUAÇÃO 6 - EXPRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DE Y. ....	55
EQUAÇÃO 7 - EXPRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DE X. ....	56
EQUAÇÃO 8 - EXPRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO C.....	56
EQUAÇÃO 9 - VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO REGIME DOS VENTOS.....	56
EQUAÇÃO 10 - VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DAS VELOCIDADES DO VENTO.....	56
EQUAÇÃO 11 - DENSIDADE DE POTÊNCIA MÉDIA DO VENTO. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Método de Análise Hierárquica)
ANP	<i>Analytic Network Process</i> (Método de Análise de Redes)
AMD	Auxílio Multicritério à Decisão
AW	Climatologia Equatorial com Inverno Seco
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
DP	Densidade de Potência
FTOPSIS	<i>Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity of an Ideal Solution</i> (Técnica Fuzzy para determinar a ordem de preferência por semelhança de uma solução ideal)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informações Geográficas)
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPTR	Imposto sobre Propriedade Territorial Rural
Km <sup>2</sup>	Quilômetros quadrados
m	Metro
m/s	Metros por segundo
MW	Megawatt
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
VTN	Valor da Terra Nua
W/m <sup>2</sup>	Watts por metro quadrado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	15
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>RELAÇÕES ENTRE A ANÁLISE DO REGIME DOS VENTOS E O USO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE: EVIDÊNCIAS DE UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	20
2.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	22
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
2.4	CONCLUSÃO .....	29
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL DE REGIÕES POTENCIAIS PARA A GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.....</b>	<b>31</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	31
3.2	REVISÃO DE LITERATURA.....	32
3.2.1	Energia eólica.....	32
3.2.2	Método AHP .....	34
3.3	METODOLOGIA .....	36
3.3.1	Descrição das áreas potenciais .....	36
3.3.1.1	Região Norte .....	37
3.3.1.2	Região dos Lagos .....	38
3.3.1.3	Região Serrana .....	38
3.3.2	Definição dos critérios a serem utilizados.....	38

3.3.2.1	Critério “Potencial Gerador” .....	40
3.3.2.2	Critério “Custo do Terreno” .....	41
3.3.2.3	Critério “Custo de Interligação à Rede” .....	42
3.3.2.4	Critério “Espaços para Implementação” .....	43
3.3.2.5	Critério “Logística do Terreno-Relevo” .....	43
3.4	RESULTADOS .....	44
3.5	DISCUSSÃO.....	49
3.6	CONCLUSÃO .....	50
<b>4</b>	<b>ESTIMATIVA DE POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ, UTILIZANDO A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL .....</b>	<b>52</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	52
4.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	53
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4.4	CONCLUSÃO .....	63
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	65
5.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Fontes renováveis são alternativas promissoras para a produção de eletricidade no mundo. O discurso ambiental em torno dos impactos negativos das fontes de eletricidade, como a emissão de gases de efeito estufa, reforçou a necessidade de utilizar fontes mais limpas para a produção de energia. No entanto, na maioria dos casos, essas fontes apresentam custos mais elevados quando comparadas às fontes convencionais de energia.

Outros fatores tem contribuído para estimular a participação de fontes renováveis no fornecimento de energia: busca pela diversificação da matriz elétrica, possibilidade de desenvolvimento social, aumento de eficiência energética, redução de importações de energia, além de fatores como segurança do suprimento, políticas governamentais e incentivos globais (TIMILSINA et al., 2013).

A energia eólica tem aumentado significativamente sua participação dentre as energias renováveis para a geração de energia elétrica. No âmbito mundial, a energia proveniente dos ventos destaca-se de forma expressiva ao longo dos últimos 20 anos, com destaque na China, nos Estados Unidos e na Alemanha, que atualmente representam os três países com maior capacidade instalada no mundo (GWEC, 2017).

No cenário brasileiro, a crise ocorrida no setor energético no início do século XXI mostrou a necessidade de modificações no sistema estrutural do setor elétrico brasileiro e surgiu-se o preocupação para que um ambiente favorável à promoção das energias renováveis fosse desenvolvimento, incluindo a energia eólica (SILVA et al., 2013).

Diversos esforços governamentais tem sido realizados com o intuito de compatibilizar demanda e oferta de energia elétrica destaca-se o Programa de Incentivos a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (DALMAZ et al., 2008).

Este programa almejava a segurança no abastecimento de energia elétrica, através da expansão da oferta de energia elétrica de fontes renováveis, todavia sem restringir-se à energia eólica. Foram criadas ferramentas para incentivar a

negociação de Pequenas Centrais Hidrelétricas e projetos de energia eólica e biomassa de geração independente. Sua principal meta, a ser alcançada até 2022, apresentada na segunda fase do Programa, é que o atendimento de 10% da energia elétrica consumida anualmente no país sejam proveniente de origem renovável (BRASIL, 2002).

Uma barreira que inicialmente se apresentou para a expansão de fontes renováveis e alternativas no Brasil é a preocupação com maior custo de geração por elas apresentado que é conflitante com a necessidade de modicidade tarifária (PINTO et al., 2017). O PROINFA garantiu preços de energia elétrica, proveniente de fonte eólica, abaixo do mercado, possibilitando desta forma a entrada e desenvolvimento de novas tecnologias para o setor, através de financiamentos junto ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

O resultado desses incentivos pode ser observado na evolução dos projetos de energia eólica no Brasil, que atingiram 13 gigawatts (GW) em 2017, aumento de 19% em relação a 2016, segundo informações da Associação Brasileira de Energia Eólica (PORTAL ABEEÓLICA, 2018).

Diante deste cenário, observa-se que a energia eólica tem sido relevante na diversificação da matriz elétrica e, por consequência, na redução da dependência de combustíveis fósseis e das emissões de carbono, no aumento da autonomia e da segurança energética, melhora a economia local, com oferta de empregos e investimento, além de atuar como linha paralela de ativos com a energia hidrelétrica (KAPLAN, 2015; PEREIRA et al., 2013).

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise das regiões do Estado do Rio de Janeiro, destacando aquela de maior potencial para implementação de um parque de geração de energia eólica. Para tal, serão verificados fatores condicionantes, como as possibilidades de escoamento da produção, a disposição e custo de áreas de implantação, e a disponibilidade de recursos, neste caso o regime dos ventos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliométrico de publicações relacionadas a utilização de métodos estatísticos, no caso a distribuição de Weibull, para análise de potencial eólico;
- Analisar as regiões mais promissoras do Estado do Rio de Janeiro para implantação de parques eólicos geradores de energia elétrica, aplicando como ferramenta de estudo o Método de Análise Hierárquica (AHP);
- Analisar o regime dos ventos, através de um estudo de caso de uma das cidades da região de maior potencial, utilizando a distribuição estatística de Weibull.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Ao longo das últimas décadas, a energia eólica tem despertado considerável atenção, o que gerou uma grande expansão da capacidade instalada desta fonte e, por consequência, na matriz energética brasileira.

O fato de a energia eólica reunir características importantes para o desenvolvimento sustentável do setor energético, uma vez que não está incluída entre as fontes de energia não renovável, não contribui para as mudanças climáticas, não emite gases poluentes, não gera resíduos líquidos ou sólidos em sua operação, está diretamente ligado ao crescimento do uso da mesma. Outra circunstância atenuante é o fato de não fazer-se necessário a utilização de áreas extensas destinadas à instalação de reservatórios de água, fato que ocorre especificamente nas aplicações das grandes usinas hidrelétricas, que causam diversos transtornos aos moradores, a fauna e flora de regiões próximas às instalações.

Além dessas características, no Brasil, as usinas geradoras eólicas possuem um papel importante quando comparadas às usinas de outras fontes de energia renovável em decorrência de ser a fonte alternativa de energia que apresenta a complementaridade entre as sazonalidades eólica e hidrelétrica, ou seja, os maiores ventos acontecem nos períodos mais secos e vice-versa.

Sendo assim, para oferecer o desenvolvimento adequado da energia eólica, é importante avaliar as características de determinada região para instalação de uma planta geradora, tais como potencial dos ventos, proximidade à rede de distribuição, áreas disponíveis para instalação das torres, determinação da altura mais adequada destes equipamentos, além de levar-se em consideração os impactos ambientais e socioeconômico que podem ser gerados.

Conduziu-se este trabalho, com o intuito de reunir informações a fim de auxiliar o entendimento dos aspectos associados ao uso da energia eólica para instalação de uma planta geradora de energia elétrica no Distrito de Farol de São Tomé, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em capítulos, sendo estes apresentados a seguir:

➤ Capítulo 1 – Introdução

A importância desta seção consiste no fato de mesma situar o leitor quanto a temática trabalhada e proporcioná-lo uma maior compreensão dos fundamentos que originaram a pesquisa.

➤ Capítulo 2 – Relações entre a análise do regime dos ventos e o uso de distribuição de probabilidade: evidências de um estudo bibliométrico

Este capítulo inaugura a efetivação dos objetivos da pesquisa, apresentando o mapeamento da pesquisa científica sobre os estudos em energia eólica que utilizaram a Distribuição de Weibull como método de análise. Utilizando o método bibliométrico, várias características de publicação foram obtidas, tais como ano de publicação, autores, afiliação institucional, tópicos de conhecimento, principais periódicos e seus assuntos, bem como uma análise de conteúdo do banco de dados criado por *wordcloud*, para medir sua consistência. Estes resultados não só fornecem uma melhor compreensão da pesquisa relacionada à análise da energia eólica, mas também influenciam na direção da pesquisa.

➤ Capítulo 3 – Avaliação multicriterial de regiões potenciais para a geração eólica de energia no estado do Rio de Janeiro

Este capítulo apresenta a análise das regiões mais promissoras do estado para implantação de parques eólicos geradores de energia elétrica. Como ferramenta de estudo, utilizou-se o Método de Análise Hierárquica (AHP) para auxiliar na avaliação das regiões no atlas eólico do estado identificando a viabilidade de instalação de plantas geradoras com base em aspectos logísticos, técnicos e econômicos.

➤ Capítulo 4 – Potencial para geração de energia eólica em Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

Neste capítulo, são determinados os dois parâmetros,  $k$  e  $c$ , da função de distribuição de Weibull e calculada a densidade da energia eólica da cidade Campos dos Goytacazes, Brasil, para prever a produção de energia eólica e avaliar a possibilidade de instalação de um parque de geração de energia. Além disso, foram avaliadas quatro alturas de turbinas eólicas para observação das possibilidades de geração com pequena, média e grande estrutura.

➤ Capítulo 5 – Considerações Finais

Por fim, este capítulo apresenta as considerações finais e responde as questões levantadas ao longo da pesquisa. Além disso, são apresentadas as limitações do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 RELAÇÕES ENTRE A ANÁLISE DO REGIME DOS VENTOS E O USO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE: EVIDÊNCIAS DE UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A demanda por energia deve se expandir continuamente, podendo triplicar até o final do século (KNOX-HAYES et al., 2013). Segundo Pereira et al. (2012), o mundo está consumindo principalmente energia de combustíveis fósseis e, no caso do consumo final de energia, isso corresponde a 79% da matriz energética mundial. Nesse contexto, os processos convencionais de geração de energia elétrica estão entre os principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (PAZHERI et al., 2014).

Em resposta a uma maior conscientização sobre os impactos negativos da geração de energia em larga escala por combustíveis fósseis, bem como a percepção de que os recursos do planeta são finitos, governos, organizações e indivíduos estão mostrando interesse crescente em fontes de energia de pequena escala, descentralizadas e de baixa emissão de carbono (WEEKES; TOMLIN, 2013). Como resultado, os legisladores, líderes empresariais, consumidores e pesquisadores têm voltado sua atenção cada vez mais para as fontes alternativas de energia, como solar, eólica e biomassa (ZHAO et al., 2009).

Entre as fontes de energia renováveis disponíveis, a energia eólica é atualmente considerada como uma das fontes mais significativas, de crescimento mais rápido e comercialmente atraentes para gerar eletricidade pelo fato de as tecnologias relacionadas à energia eólica estarem maduras e econômicas (HARBORNE; HENDRY, 2009; WANG et al., 2015). O potencial eólico sofre influência direta do posicionamento e intensidade dos sistemas de alta e baixa pressão atmosférica que apresentam tanto uma variabilidade interanual quanto variações relacionadas com a variabilidade climática (PINTO et al., 2017).

O sucesso da determinação do potencial de energia eólica depende da modelagem precisa da velocidade do vento e as propriedades estatísticas da velocidade do vento são importantes para prever a energia de saída de um sistema de conversão de vento (PISHGAR-KOMLEH et al., 2015). As características do

vento e potencial de energia de vários locais foram estudados em muitos países do mundo, a fim de descrever completamente os procedimentos matemáticos úteis para realizar análises em locais com potencial para instalação de parques eólicos (SIMONS; CHEUNG, 2016).

A distribuição de Weibull é uma funções de distribuição de probabilidade que pode ser utilizada para diferentes propósitos, como modelagem, análise de confiabilidade, análise de dados em tempo de vida e muitas áreas de ciência aplicada, como mecânica, bio-sistema, nuclear e engenharia de energia (QUERCIA et al., 2016). Em alguns estudos, é visto que a distribuição Weibull de dois parâmetros é usada para a determinação do potencial de energia eólica nas diferentes regiões do mundo (AKDAG; GÜLER, 2015; ANDRADE et al., 2014). Portanto, deve-se considerar a função dos dois parâmetros de Weibull, sendo eles “k”, o parâmetro de forma, e “c”, o parâmetro de escala, porque esta foi apontada como adequada para qualquer conjunto dados de vento (LUN; LAM, 2000).

Segundo Archambault et al. (2009), o aumento da disponibilidade de dados, como o impacto bibliográfico, passa a ser muito importante para avaliar atividade de publicação, seno que as citações podem ser incluídas como parte de uma revisão mais holística da literatura. Zupic e Cater (2015) apontam que os métodos bibliométricos empregam uma abordagem quantitativa para uma descrição e avaliação da pesquisa publicada. De fato, as técnicas bibliométricas tornaram-se um instrumento indispensável para medir o progresso científico em vários campos (DU et al., 2014).

Este capítulo tem como objetivo mapear quantitativa e qualitativamente a pesquisa científica sobre os estudos em energia eólica que utilizaram a Distribuição de Weibull como método de análise. Utilizando o método bibliométrico, várias características de publicação serão obtidas, tais como ano de publicação, autores, afiliação institucional, tópicos de conhecimento, principais periódicos e seus assuntos, bem como uma análise de conteúdo do banco de dados por *wordcloud* para medir sua consistência.

Estes resultados não só fornecem uma melhor compreensão dos pontos altos globais das pesquisas relacionadas à análise da energia eólica, mas também podem influenciar as direções de pesquisas futuras dos pesquisadores.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo está estruturado em uma análise bibliográfica. Foram analisados dados quantitativos sobre os trabalhos e alocá-los em categorias, a fim de obter uma boa compreensão sobre a interface entre a energia eólica e a distribuição estatística de Weibull.

As pesquisas realizadas na base de dados Scopus foram desempenhadas com o objetivo de encontrar trabalhos relacionados à função de Weibull e a energia eólica. Além disso, não foram utilizados filtros de exclusão para evitar a redução de resultados, optando-se pelo retorno com a maior abrangência possível.

A fim de melhor identificar os trabalhos científicos que relacionam a função Weibull ao vento como fonte de energia, os termos de pesquisa foram ser definidos. Devido a algumas abordagens diferentes, o mesmo tópico de pesquisa tem sido avaliado com várias expressões em pesquisas.

Assim, para alguns autores, essa fonte de energia é conhecida como “Wind energy” e, para outros, é conhecida como “Wind power”. É possível dizer que a “Wind power” é mais diretamente aplicada aos problemas relacionados com os problemas das plantas de geração de energia. “Wind energy” é um termo mais diversificado e está relacionado a processos de geração de energia, que podem ocorrer em plantas industriais, mas também em investimentos públicos, uso doméstico, discussões sobre energia renovável e sustentabilidade.

Sobre a função de distribuição de Weibull, a primeira estratégia foi usar a palavra "Weibull" para melhor assimilar os resultados sobre o assunto. No entanto, percebeu-se que mais alguns filtros deveriam ser aplicados para busca dos resultados. Assim, os termos "Weibull distribution function", "Weibull function" e "Weibull parameters" foram usados.

O próximo passo foi a definição do corte temporal da pesquisa e decidiu-se trabalhar com trabalhos publicados de 2007 a 2017, para esclarecer a evolução das publicações no período de uma década. A estrutura de termos de pesquisa, bem como os resultados preliminares para configurar o banco de dados de artigos, foram 609 registros, e estão listados na Tabela 1.

Devido aos muitos resultados encontrados, foi aplicada uma restrição nos tipos de trabalhos. Estes foram restritos a apenas artigos publicados em periódicos,

excluindo artigos de conferências, teses e relatórios, reduzindo o conjunto para 177 registros.

Tabela 1 - Termos de busca utilizados

CHAVE DE BUSCA	REGISTRO
TITLE-ABS-KEY ("wind power" AND "Weibull distribution function") AND (PUBYEAR > 2006)	104
TITLE-ABS-KEY ("wind power" AND "Weibull function") AND (PUBYEAR > 2006)	58
TITLE-ABS-KEY ("wind power" AND "Weibull parameters") AND (PUBYEAR > 2006)	181
TITLE-ABS-KEY ("wind energy" AND "Weibull distribution function") AND (PUBYEAR > 2006)	71
TITLE-ABS-KEY ("wind energy" AND "Weibull function") AND (PUBYEAR > 2006)	43
TITLE-ABS-KEY ("wind energy" AND "Weibull parameters") AND (PUBYEAR > 2006)	152
Total de registros	609

Fonte: Elaborado pelo autor

### 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, analisou-se a distribuição dos artigos por ano, representados na Figura 1. Este gráfico pode ser separado em dois momentos distintos: o primeiro momento é de 2007 a 2013, quando há uma tendência de oscilação no número de publicações. O outro momento é de 2014 a 2017, que representa pouco mais da metade dos trabalhos analisados, apresentando certa constância, ou baixa variação, no número de publicações sobre o assunto.

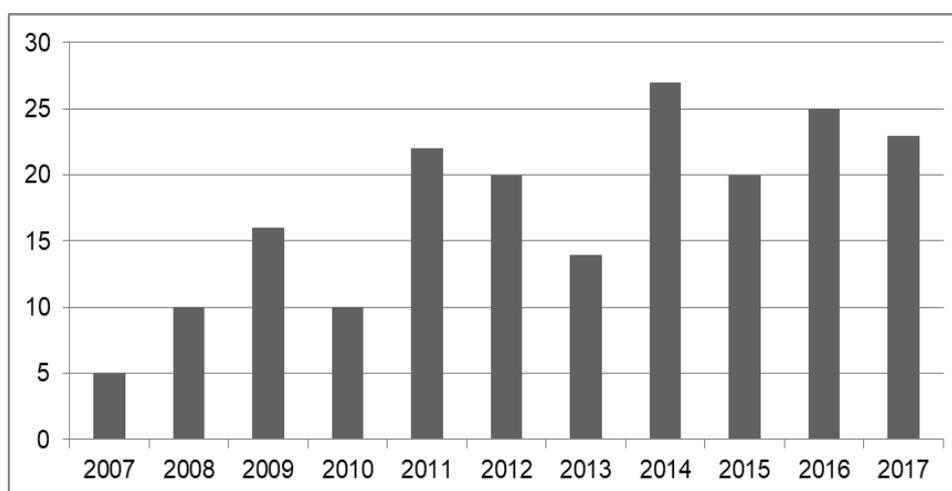


Figura 1 - Artigos identificados por ano

Fonte: Elaborado pelo autor



quantidade de artigos publicados para o próximo período pode continuar aumentando, conforme a tendência de 2014 para 2017.

Em seguida, os autores e as instituições de ensino com o maior número de publicações sobre o assunto foram destacados na Figura 3 e na Figura 4, respectivamente. Apenas os autores e instituições com quatro ou mais registros foram considerados, devido à quantidade considerável destes com apenas três ou menos publicações relacionadas.

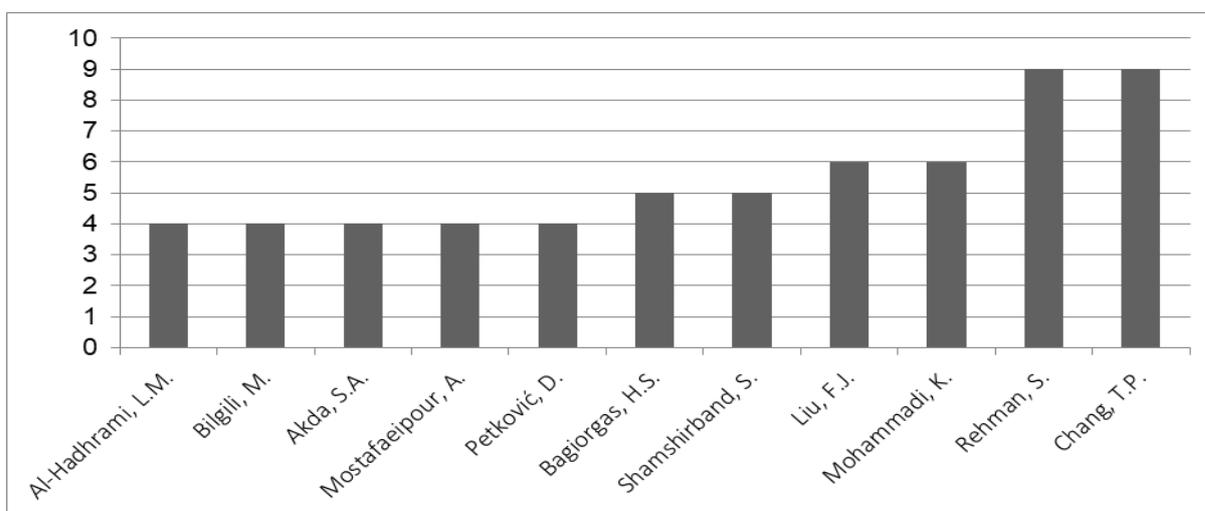


Figura 3 - Autores com maior número de registros

Fonte: Elaborado pelo autor

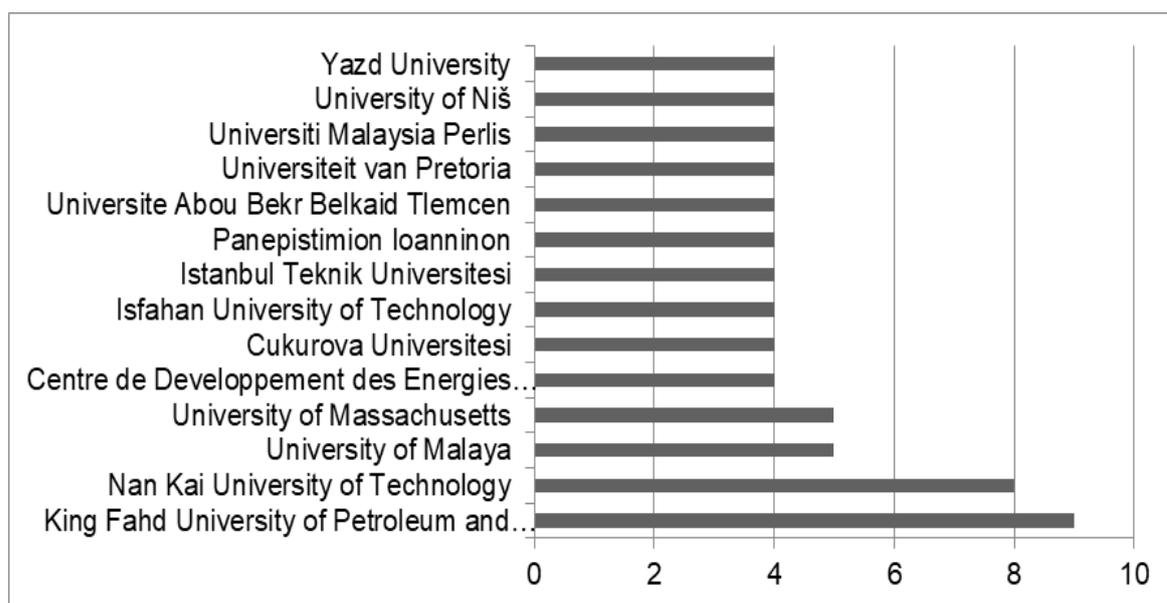


Figura 4 - Instituições de ensino com maior número de registros

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 3, pode-se dizer que Rehman, S., da Arábia Saudita, e Chang, T.P., de Taiwan, são os autores na liderança da produção científica sobre o assunto.

Na Figura 4, pode-se notar duas instituições com grande relevância no número de publicações, King Fahd University of Petroleum and Minerals, da Arábia Saudita, e Nan Kai University of Technology, de Taiwan.

Quando os dois indicadores da análise se relacionam, pode-se observar que os autores mais destacados sobre o assunto pertencem às instituições que possuem o maior número de publicações. Assim, há dois grupos crescentes de produção de artigos científicos que são chamados de referências sobre o tópico.

Sobre os tópicos de publicação, todos os 177 trabalhos foram relacionados e alocados nos temas de acordo com o banco de dados científicos, com ênfase especial em Energia, representando 50% dos registros, Engenharia e Ciência Ambiental (Figura 5).

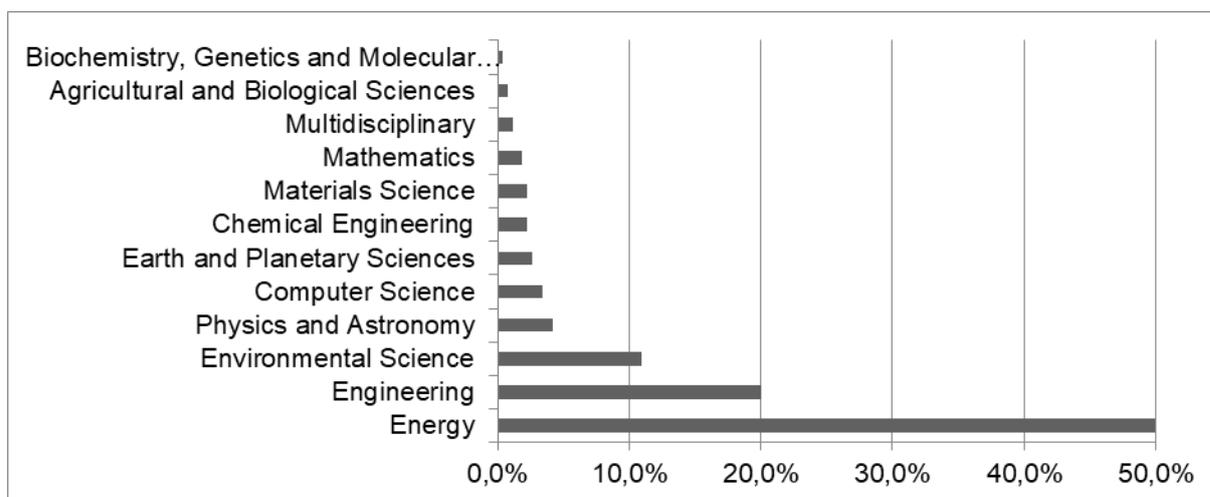


Figura 5 - Artigos divididos por tópicos de publicação

Fonte: Elaborado pelo autor

Na maioria dos trabalhos estão listados no tópico Energia, então há uma concordância com os termos utilizados nas chaves de busca e indica o destaque das linhas de investigação relacionadas ao tema em discussão.

No entanto, observou-se que a quantidade de artigos que se refere a mais de um tópico é relevante. Podemos citar como exemplos Costa Rocha et al. (2012), alocado em Energia e Engenharia, Hulio et al. (2017) refere-se a Energia e Ciências

Sociais, Fazelpour et al. (2015), apontado como Environmental Science and Energy, e Gani et al. (2016), alocado em três tópicos de capa: Engenharia Química, Energia e Ciência Ambiental. Este fato corrobora a abrangência e relevância desta pesquisa.

Outro aspecto observado é que o artigo com o maior número de citações é alocado apenas no tópico Energia. Akdağ e Dinler (2009), citados por 202 artigos, desenvolveram um método para estimar parâmetros de distribuição de Weibull para aplicações de energia eólica, chamado método de densidade de potência (DP). Para demonstrar a precisão desse método, eles fizeram comparações com base na densidade de potência e nos resultados médios da estimativa de vento de estudos anteriores. Os resultados deste estudo indicam que o método DP é adequado para estimar parâmetros de Weibull e pode ter melhor adequação do que outros métodos. A análise mostrou alguma superioridade do método DP, por ter formulação simples, não requerer resolução de problemas lineares de mínimos quadrados ou procedimento iterativo. Segundo eles, é muito simples estimar os parâmetros de Weibull, se a densidade de potência e a velocidade média do vento estiverem disponíveis.

Um dos artigos que seguem esta linha é Azad et al. (2014), que analisou sete métodos diferentes, incluindo o método de densidade de potência, para determinar o melhor para estimar os parâmetros de Weibull, no entanto, os resultados encontrados não indicaram o referido método como o mais eficiente, Zhou e Smith (2013), que estimaram a variação global nos parâmetros de vento, usando o método DP, ajustado a uma função de densidade Weibull usando dados de reanálise do sistema de previsão climática sobre áreas terrestres e Akdağ e Güler (2015), que apresentaram um novo método, considerado por eles melhor que métodos padrão, para estimar os parâmetros de Weibull, sendo comparado com outros oito métodos, incluindo o método de densidade de potência, apresentado por um dos autores deste artigo em 2009.

Outras análises são possíveis observando-se os periódicos que lideram o ranking de artigos relacionados aos termos de pesquisa utilizados. A Figura 6 mostra os trabalhos organizados por periódicos. Para uma melhor visualização, destacou-se neste gráfico apenas periódicos que contam com quatro trabalhos ou mais.

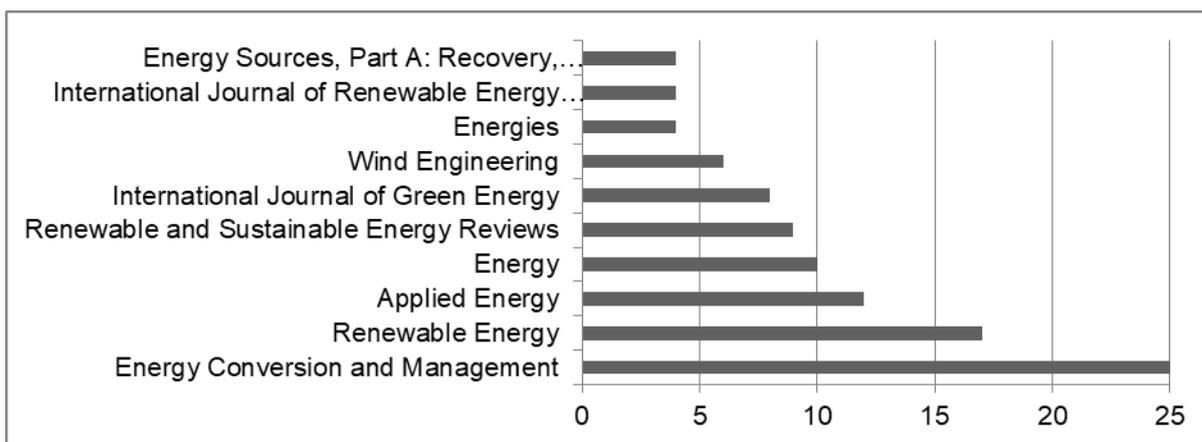


Figura 6 - Artigos divididos por periódico

Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiro de tudo, pode-se notar que o periódico líder é o “Energy Conversion and Management”. O foco desta revista é a pesquisa em todos os aspectos importantes da energia, incluindo geração de energia, utilização, conversão, armazenamento, transmissão, conservação, gerenciamento e sustentabilidade. A liderança distante desta revista está de acordo com os resultados anteriores que obtidos analisando-se o gráfico de artigos por tópico. A maioria dos artigos publicados por esta revista está associada à energia. Assim, esta revista é um importante veículo científico para difundir conhecimento sobre energia no que diz respeito à interseção entre recursos renováveis, como a energia eólica e os processos, operação e perspectivas de desempenho, como a função Weibull.

O segundo, “Renewable Energy”, é um periódico que tem o propósito de discutir vários tópicos e tecnologias de sistemas e componentes de energia renovável, o que inclui discussão sobre a energia eólica e aplicar soluções alternativas de energia às práticas atuais.

No conjunto de periódicos plotados neste gráfico, identificaram-se dois grupos de periódicos. O primeiro, que engloba “Energy Conversion and Management”, “Applied Energy”, “Energy” e “Energies”, está associado a todos os tipos de energia, incluindo a energia eólica.

O outro grupo consiste em revistas com uma gama mais concisa de assuntos como “Renewable Energy”, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, “International Journal of Green Energy”, “International Journal of Renewable Energy” e “Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects”.

Neste grupo, o foco dos artigos varia e podem ter diferentes abordagens e pontos de vista sobre energia renovável e sustentabilidade.

Além disso, podemos destacar o periódico “Wind Engineering”, como o mais focado nos muitos aspectos do vento, como a aerodinâmica de rotores e pás, subsistemas e componentes de máquinas, geração e transmissão de energia, técnicas e instalações de medição e registro, e aspectos econômicos, ambientais e legais envolvidos com a eólica como fonte de energia.

Este tipo de análise facilita o cruzamento de referência, resultando em um estudo prévio composto pelos trabalhos que integrarão o chamado núcleo inicial, onde o pesquisador terá antecedentes suficientes para o estudo bibliográfico. Para isso, serão utilizadas técnicas bibliométricas, que empregam métodos quantitativos na busca de uma avaliação objetiva da produção científica.

## 2.4 CONCLUSÃO

Combinando as seis diferentes análises realizadas - artigos por ano, nuvem de palavras, artigos por autor, artigos por tópico de publicação, artigos por instituição de ensino, artigos por revista e seus assuntos, a principal conclusão deste trabalho é que a interseção da energia eólica e do Weibull distribuição tem sido figurada como um tema central de pesquisa para um indivíduo ou um grupo de pesquisadores em todo o mundo.

Como tópico de pesquisa formal, os trabalhos continuam a ser escritos sobre questões que envolvem a energia eólica como fonte de energia ou geração de energia, e a distribuição de Weibull, juntamente com sua função e parâmetros. De 2007 a 2017, foram produzidos 177 artigos utilizando a distribuição Weibull de dois parâmetros para a determinação do potencial de energia eólica.

Dentro dos tópicos cobertos pelo banco de dados de 177 artigos, pode-se observar que as avaliações técnicas, sustentáveis e econômicas ou as características da energia eólica de um determinado local são os principais subtópicos nos quais o método de distribuição Weibull pode ser útil. Esses resultados são apoiados pela análise dos periódicos, que demonstra “Energy Conversion and Management”, que é estritamente associada a questões ambientais em sistemas de energia, é a revista que possui a maior quantidade de artigos.

Energia, Engenharia e Ciência Ambiental são os tópicos de pesquisa nos quais as colaborações deste tipo de avaliação podem ser mais facilmente rastreadas e percebidas, o que permanece como um assunto para estudos futuros.

No geral, o estudo demonstra que o estudo bibliométrico é uma metodologia capaz de fornecer uma base de conhecimento útil no desenvolvimento de pesquisas, e é apoiada em artigos científicos de grande relevância e credibilidade.

### **3 AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL DE REGIÕES POTENCIAIS PARA A GERAÇÃO EÓLICA DE ENERGIA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Um importante desafio da atualidade é suprir a demanda de energia evitando agressões ao meio ambiente. Segundo Pereira et al. (2012), o mundo está consumindo principalmente energia proveniente de combustível fóssil e, tratando-se de consumo final de energia, esta corresponde a 79% da matriz energética mundial. Nesse contexto, os processos convencionais de geração de energia elétrica estão entre os principais responsáveis pelas emissões de Gases de Efeito Estufa (PAZHERI et al., 2014).

As energias renováveis estão se tornando em algumas nações a principal estratégia no sentido de atenuar mudanças climáticas, em decorrência de poluentes atmosféricos oriundos de atividades industriais (AKELLA et al., 2009). Apesar de demonstrar inúmeros avanços, provavelmente ocorrerão modificações nas bases climáticas, ecológicas e sociais com efeitos catastróficos para aos seres vivos (ALLEN et al., 2013).

Para mensurar a dimensão da importância desses incentivos para a energia eólica no caso brasileiro, Dalmaz et al. (2008) apontam o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com o objetivo de incentivar a participação de fontes renováveis. Para tal, há realização de leilões e, atualmente, é financiador de cerca de 95% dos projetos (CORRÊA DA SILVA et al., 2016).

Projetos de energia renovável são classificados, de maneira geral, como investimentos sustentáveis e “amigos do meio ambiente” (DAVIDSSON et al., 2012). Entretanto, todas as atividades de execução do conceito de um novo produto causam impactos ao ambiente, e, da mesma forma, ocorre na concepção de um novo empreendimento de geração de energia.

Métodos de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) são frequentemente utilizados na resolução de problemas relacionados à seleção de locais para instalação de usinas eólicas, que geralmente incluem critérios complexos (LATINOPOULOS; KECHAGIA, 2015). Os processos AMD mais utilizados na solução deste tipo de problema são o método de Análise em Redes (ANP), a ferramenta ELECTRE, o método TOPSIS e o Método de Análise Hierárquica (AHP)

(YUNNA; GENG, 2014). O método AHP fornece não apenas a classificação dos locais sob a meta geral, mas também fornece os rankings sob os sub-objetivos e os atributos de avaliação, a fim de garantir a razoabilidade da tomada de decisões (SAATY, 1990), além de ser técnica mais utilizada em estudos de energia sustentável (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

O objetivo deste capítulo foi analisar as regiões mais promissoras do Estado do Rio de Janeiro para implantação de parques eólicos geradores de energia elétrica. Como ferramenta de estudo, pretende-se utilizar o Método de Análise Hierárquica (AHP), devido à sua praticidade, para auxiliar na avaliação das regiões no atlas eólico do estado identificando a viabilidade de instalação de plantas geradoras com base em aspectos logísticos, técnicos e econômicos.

Em relação à similaridade de pesquisa, o trabalho de Ali et al. (2017) é o que mais se aproxima da proposta apresentada neste estudo quanto aos métodos utilizados. Ambos utilizaram o método AHP para a seleção de locais apropriados para a instalação de parques eólicos. O modelo hierárquico destes trabalhos é semelhante quanto a estrutura dos critérios utilizados, como custo de interligação à rede, potencial gerador e logística. O trabalho de Ali et al. (2017) também inclui os critérios: velocidade do vento, densidade de energia eólica e densidade populacional, por outro lado, este capítulo inclui os critérios: espaço para implementação do parque eólico e o custo do terreno. A principal contribuição deste capítulo é a proposta da matriz de critérios e o foco do problema que, além de propor o local mais adequado para a implantação de uma unidade geradora, inclui a análise da melhor altura das torres geradoras, informação obtida a partir de dados regionais (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2002).

## 3.2 REVISÃO DE LITERATURA

### 3.2.1 Energia eólica

Dentre estas fontes energéticas chamadas de “limpas”, isto é, que não envolvem qualquer processo de combustão ou etapa de transformação térmica, a energia eólica é apontada como a fonte de energia renovável mais promissora no Brasil, pois diversos estudos indicam valores consideráveis para um alto desempenho deste tipo de energia (COSTA; LYRA, 2012). Este papel de destaque é

devido ao potencial que tem demonstrado no que concerne aos custos de produção, segurança, fornecimento da energia e, principalmente, sustentabilidade ambiental (MARTINS et al., 2008). Mais de 54 GW de energia eólica foram instalados em todo o mercado global em 2016, que agora compreende mais de 90 países, incluindo 9 com mais de 10.000 MW instalados e 29 que passaram agora a marca de 1.000 MW, com a capacidade acumulada crescendo 12,6% para atingir um total de 486,8 GW (GWEC, 2017).

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a  $500 \text{ W.m}^{-2}$ , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (GRUBB; MEYER, 1993). A energia eólica é amplamente aplicável porque os recursos eólicos estão disponíveis na maioria dos países (WOLSINK, 2000) e estima-se que o custo da geração eólica é inferior ao da geração com uso de fontes convencionais, como hidrelétrica e gás natural, quando se leva em conta todo o contexto socioambiental de instalação das tecnologias de geração ao longo de todo seu ciclo de vida (JONG et al., 2013)

A fim de distinguir quais regiões possuem mais atratividade para instalação de novos parques eólicos, Reinhard (2009) afirma que diversos aspectos determinantes, sendo estes econômicos, técnicos, sociais e ambientais, devem ser levados em consideração nos modelos de apoio à decisão. Desse modo, a decisão não pode ser baseada unicamente em um único eixo-dimensional de avaliação, como custo ou benefício, sendo utilizados, na maioria dos casos, múltiplos critérios, que, em alguns casos, são conflitantes de natureza distintas e inerentes à decisão.

Com exceção da energia hídrica, a energia eólica está mais próxima da lucratividade comercial do que qualquer outra fonte renovável, embora a melhoria da economia do projeto seja um desafio vital para a energia eólica, em termos de preço, efeitos ambientais e usabilidade (REICHE; BECHBERGER, 2004). Esta oferece uma oportunidade comercialmente inteligente de adequar-se aos pré-requisitos definidos para serviços de energia, principalmente para regiões em desenvolvimento e produzirá vagas de emprego para o comércio local público e industrial, do ponto de vista da produção (BALOCH et al., 2016).

A etapa de construção é a fase crítica em termos de impactos socioambientais produzidos por uma planta de geração eólica, mesmo os impactos negativos durante a instalação sendo relativamente pequenos quando comparados

com aqueles produzidos por fontes convencionais de energia, como a usina hidroelétrica que demandam grandes obras de construção civil (PINTO et al., 2017). Não obstante, os impactos gerados devem ser observados, avaliados e mitigados quando possível (AMPONSAH et al., 2014), a partir de um planejamento específico e por meio da utilização de novas tecnologias (DUTRA; SZKLO, 2008).

### 3.2.2 Método AHP

O método multicritério *Analytic Hierarchy Process* – AHP surgiu no final da década de 60, desenvolvido pelo matemático Thomas L. Saaty, quando trabalhava para a Agência de Controle de Armas e Desarmamento do Departamento de Estado Americano. Sua origem foi devido à observação de Saaty sobre a dificuldade de comunicação entre os membros do governo americano que surgiu a motivação para desenvolver um método de apoio à tomada de decisão (FORMAN; SELLY, 2002).

De acordo com Saaty (1990), o ser humano tem dificuldades para examinar várias restrições ao mesmo tempo, mesmo em pequena quantidade. Por conta disso, o método AHP simplifica o processo decisório, pois permite que um problema complexo seja dividido em vários problemas menores, facilitando a compreensão e solução do mesmo.

O processo decisório pela análise multicriterial tem o objetivo de tratar um problema complexo de uma maneira simples. Além disso, os Métodos de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) têm a característica de reconhecer a subjetividade inerente aos problemas de tomada de decisão e utilizar o julgamento de valor como forma de tratá-lo cientificamente (COSTA, 2006).

Este é caracterizado por sua simplicidade e robustez, permitindo que sua aplicação se estenda a várias áreas, como por exemplo: seleção de fornecedores para empresas (ŽAK; GALIŃSKA, 2018), classificação de pilares de manutenção produtiva total (SHINDE; PRASAD, 2017), avaliação da gestão agrícola da água em distritos de irrigação (SUN et al., 2017), montagem do quadro de avaliação de risco da cadeia de suprimentos (DONG; COOPER, 2016), escolha da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento (BRIOZO; MUSETTI, 2015), análise de projetos (GARTNER et al., 1998), definição de prioridades no desfazimento de bens patrimoniais em órgãos públicos (ROSA et al., 2018) e na análise do sistema elétrico brasileiro de geração de energia elétrica (GOMES et al., 2017).

Além disso, o método AHP tem sido aplicado substancialmente em áreas de pesquisa relacionadas à energia renovável, como na escolha de locais de instalação, avaliação de projetos e também de equipamentos (YUNNA; GENG, 2014). Souza et al. (2018) analisaram, por meio de um modelo multicritério híbrido AHP-TOPSIS-2N, os resultados obtidos pelo comitê de governança da tecnologia da informação de uma empresa em processo de realinhamento estratégico na triagem e priorização de seu portfólio de projetos de investimento em TI e energia. Watson e Hudson (2015) elaboraram uma estrutura de tomada de decisões multicritério incorporando um processo de hierarquia analítica (AHP), o que é uma abordagem inovadora para esse tipo de estudo, associado a sistema de informações geográficas (GIS), para realizar a seleção de locais favoráveis à instalação de parques geradores eólicos e solares no Reino Unido. Solangi et al. (2018) utilizaram análise de fatores para avaliar aspectos técnico-econômicos e sociopolíticos, e um processo híbrido de análise hierarquia (AHP) e técnica Fuzzy para determinar a ordem de preferência por semelhança de uma solução ideal (FTOPSIS) para a classificação e priorização de locais para instalação de projetos de energia eólica, na região sudeste do Paquistão.

Para se estabelecer os critérios e identificar as alternativas, utiliza-se de uma abordagem hierárquica comparando os critérios par a par e estabelecendo um valor, de 1 a 9, de acordo com a importância que um representa em relação ao outro (Quadro 1) (HOLDER, 1990).

Quadro 1 - Descrição dos valores atribuídos na escala AHP para comparação aos pares

<b>VALOR ATRIBUÍDO</b>	<b>CARÁTER DE IMPORTÂNCIA</b>
1	Importância igual: os critérios contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada: um critério é levemente mais importante que o outro.
5	Importância fundamental: Um critério é evidentemente mais importante que o outro.
7	Importância constatada: um critério é claramente comprovado e seu destaque foi constatado na prática.
9	Importância excessiva: as indicações que distiguem os critérios são das mais absolutas possíveis.
2 - 4 - 6 - 8	Valores intermediários: caso exista dúvida do especialista quanto ao grau de importância.

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

Estes valores representam uma escala semântica de 5 níveis e 4 intermediários, pois, caso exista dúvida do especialista quanto ao grau de importância, os valores intermediários podem ser adotados.

Uma escala hierárquica de critérios, objetivos e alternativas é um bom modelo da realidade, podendo trazer vantagens. A representação hierárquica de um sistema pode ser usada para obtenção de uma visão geral de um sistema e também para descrever como as mudanças em prioridades nos níveis mais altos afetam a prioridade dos níveis mais baixos (GRECO et al., 2016). Esta é a busca da resolução do problema por meio das interações entre os diversos níveis hierárquicos, não somente entre os elementos do mesmo nível (KE et al., 2012).

A estrutura hierárquica do método AHP facilita a compreensão de um problema e permite observar como as mudanças em prioridades nos níveis mais altos afetam a prioridade dos níveis mais baixos (VARGAS, 2010). Os modelos hierárquicos são estáveis e flexíveis (não sequenciais): estáveis, porque pequenas modificações têm efeitos pequenos; já flexíveis, porque adições a uma hierarquia bem estruturada não perturbam seu desempenho global (SILVA, 2007). A representação hierárquica do método AHP pode ser observada na Figura 3 (vide Resultados).

### 3.3 METODOLOGIA

O método de apoio à decisão multicritério escolhido para realização deste estudo é o Processo Analítico Hierárquico (AHP). Este capítulo abordará os aspectos econômicos, técnicos e logísticos relevantes para a viabilidade do projeto. Os aspectos sociais e ambientais devem ser detalhados em trabalhos futuros, especificamente para as áreas apontadas como mais promissoras por esse estudo.

#### 3.3.1 Descrição das áreas potenciais

A predominância dos ventos considerados favoráveis nas regiões costeiras onde se encontra a maior densidade de linhas de transmissão em função da proximidade de grandes centros urbanos e que aliado à densa malha viária local repercute favoravelmente para redução do custo dos projetos eólicos.

O estado do Rio de Janeiro possui áreas de destaque em termos de potencial eólico, com um total de três zonas ótimas para empreendimentos eólio-elétricos, sendo elas a região Norte, a região dos Lagos e a região Serrana, estando estas representadas nas áreas com os números 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 8).

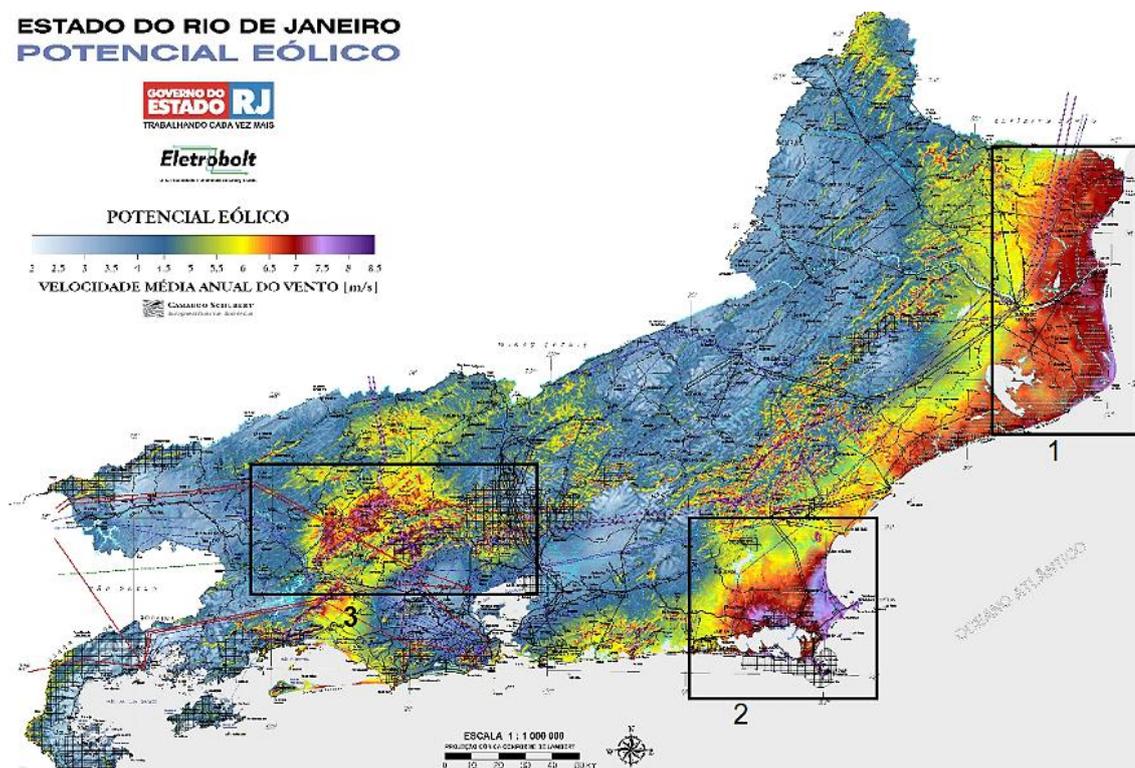


Figura 7 - Áreas potenciais nos Estado do Rio de Janeiro.

Fonte: Governo do Estado do Rio De Janeiro (2002).

O mapa de potencial eólico apresentado no Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro evidencia as três principais áreas para empreendimentos eólio-elétricos no Estado.

### 3.3.1.1 Região Norte

Extensa planície costeira, com baixa rugosidade e regimes de vento propícios a aproveitamentos eólicos, com velocidades médias anuais em torno de 6,5 m/s (a 50m de altura) nas melhores áreas. Área com densidade demográfica relativamente baixa e mais distante de grandes subestações, possuindo vocação para grandes usinas eólicas (dezenas a centenas de Megawatts), sendo estas necessárias para diluir os custos da interligação ao sistema regional.

### 3.3.1.2 Região dos Lagos

Área litorânea, de grande apelo turístico, com densidade demográfica relativamente elevada e próxima de subestações de médio e grande porte, com velocidades médias anuais próximas de 7,0 m/s (a 50 m de altura) nas melhores áreas. Apresenta vocação para usinas eólicas de dezenas até centenas de Megawatts, dispersas entre as oportunidades geográficas existentes. Além de tender a situação de maior custo de terreno para empreendimentos deste tipo, mas apresentando menores custos de interligação ao sistema elétrico.

### 3.3.1.3 Região Serrana

Apresenta algumas áreas propícias a usinas de pequeno a médio porte (até poucas dezenas de Megawatts), com velocidades médias anuais de 6,0 m/s e 6,5 m/s nos melhores locais, podendo ultrapassar 7,5 m/s nas maiores elevações. Por apresentar relevo mais complexo, podem existir potenciais dificuldades de acesso para transporte e montagem de turbinas, interligação ao sistema elétrico e subestações eventualmente distantes.

## 3.3.2 Definição dos critérios a serem utilizados

As cidades com maior potencial eólico de cada região citada anteriormente serão utilizadas para análise, estando estas listadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Cidades de maior potencial de cada área em estudo

ÁREA	REGIÃO	CIDADES POLO
1	Norte	Campos dos Goytacazes, São Francisco de Itabapoana e São João da Barra
2	Lagos	Cabo Frio, Araruama, São Pedro da Aldeia, Saquarema, Armação dos Búzios, Rio das Ostras e Arraial do Cabo
3	Serrana	Petrópolis, Piraí, Paracambi, Vassouras, Mendes e Miguel Pereira

Fonte: Adaptado de Governo do Estado do Rio de Janeiro (2002).

Após uma fase de interação do decisor com especialistas, foram identificados os critérios que espelhavam os objetivos definidos, na busca de estabelecer aqueles mais relevantes no contexto considerado. Os critérios considerados foram o

potencial gerador da locação, o custo do terreno para implantação do parque gerador, o custo de interligação ao sistema elétrico e a facilidade de acesso para implantação e operação do empreendimento e logística, representados no Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios considerados para a análise.

<b>CRITÉRIO</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>DIREÇÃO DE PREFERÊNCIA</b>
Potencial gerador (JANKE, 2010)	O fator que influencia diretamente no empreendimento, pois é a fonte e a intensidade para o sucesso do projeto.	Quanto maior o potencial eólico/solar, mais energia pode ser gerada. (maximização)
Custo do terreno (ALVES; ALVES, 2015)	O custo do terreno é um critério que influencia o valor da instalação do projeto (aluguel ou compra).	Quanto menor for o valor do terreno, menor será o custo do projeto. (minimização)
Custo de interligação à rede (BABAN; PARRY, 2001)	O custo de instalação do projeto e da transmissão da energia gerada varia de acordo com a distância da região de instalação em relação às linhas de transmissão.	Quanto menor a distância das linhas de transmissão, menor serão os custos de instalação das novas linhas e da transmissão de energia (minimização)
Espaços para implementação (Janke, 2010)	A área potencial sofre influência da distância da região de instalação do empreendimento em relação às estradas e velocidade do vento.	Quanto maior for a potência do espaço disponível e as facilidades de implementação, menor é o custo e melhor o desempenho. (maximização)
Logística do terreno-relevo (BABAN; PARRY, 2001)	Os aspectos logísticos do terreno, declividade, por exemplo, pode causar dificuldades técnicas de instalação, além de reduzir o potencial eólico/solar da área.	Quanto mais plano for o relevo do parque e seus arredores, mais fácil será o acesso logístico. (maximização)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A existência de mais de um ponto de vista a ser considerado para a comparação entre um grupo de alternativas ou, como neste estudo, a determinação da superioridade de uma alternativa sobre a outra, podendo esta ser uma tarefa bastante complexa, que demanda o uso de ferramentas capazes de resolver esse tipo de questão, o que justifica o uso do método AHP de apoio multicritério à decisão para apontar qual das três regiões se mostra mais promissora diante das variáveis analisadas.

### 3.3.2.1 Critério “Potencial Gerador”

Segundo o Atlas Eólico do Rio de Janeiro (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2002), os limiares mínimos de atratividade para investimentos em geração eólica dependem dos contextos econômicos e institucionais de cada país, variando, em termos de velocidades médias anuais, entre 5,5 m/s e 7,0 m/s. Tecnicamente, médias anuais a partir de 6,0 m/s já constituem condições favoráveis para a operação de usinas eólicas.

Este trabalho irá considerar as médias anuais acima de 6,0 m/s, para as diferentes alturas analisadas, como condição mínima de atratividade para implantação dos parques eólicos. O potencial gerador de cada área estudada será então obtido através do valor cumulativo da energia anual, dividido pela respectiva área cumulativa para cada faixa de altura, a partir de 6,0 m/s. A Tabela 3 expõe a soma dos potenciais instaláveis para velocidades médias acima de 6,0 m/s.

Tabela 3 - Potencial anual das regiões estudadas nas alturas de 50, 75 e 100 metros

REGIÃO	ALTURA (M)	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	POTENCIAL/ÁREA (GWH/KM <sup>2</sup> )	POTENCIAL ANUAL TOTAL (GWH)
Norte	50	1844	3,61	995,00
	75	3335	4,12	6.273,00
	100	3908	4,24	12.300,00
Lagos	50	886	3,85	1.613,00
	75	1566	4,41	3.848,00
	100	2130	4,51	5.425,00
Serrana	50	576	3,94	1.145,00
	75	1050	4,26	2.289,00
	100	1484	4,25	3.248,00

Fonte: Adaptado de Governo do Estado do Rio de Janeiro (2002).

### 3.3.2.2 Critério “Custo do Terreno”

Um indicador importante para a análise de viabilidade econômica de um empreendimento desta natureza é o custo de arrendamento ou aquisição das terras onde serão instalados os aerogeradores. Este trabalho irá tomar como base o Valor da Terra Nua (VTN) das áreas estudadas (Tabela 4), que é atualizado todos os anos pela Secretaria da Agricultura, Pecuária, Pesca e Abastecimento do Estado do Rio de Janeiro e publicado no Diário Oficial do Estado.

O Valor da Terra Nua (VTN), base de cálculo do Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural (IPTR), é o valor de mercado do imóvel, excluídos os valores relativos a construções, instalações e benfeitorias, culturas permanentes e temporárias, pastagens cultivadas e melhoradas, florestas plantadas e investimentos necessários à produção. Os valores abaixo são dados em reais por hectare.

Tabela 4 - Média do Valor da Terra Nua das Regiões Norte, dos Lagos e Serrana

REGIÃO	CIDADES POLO	R\$ / HECTARE	R\$ MÉDIO / HECTARE
Norte	Campos dos Goytacazes	3.870,00	3.495,00
	São Francisco de Itabapoana	2.935,00	
	São João da Barra	3.680,00	
Lagos	Cabo Frio	2.420,00	2.420,00
	Araruama	2.420,00	
	São Pedro da Aldeia	2.420,00	
	Saquarema	2.420,00	
	Armação de Búzios	2.420,00	
	Rio das Ostras	2.420,00	
	Arraial do Cabo	2.420,00	
Serrana	Petrópolis	2.420,00	1.932,50
	Piraí	1.905,00	
	Paracambi	2.420,00	
	Vassouras	1.905,00	
	Mendes	1.320,00	
	Miguel Pereira	1.625,00	

Fonte: Adaptado de Governo do Estado do Rio de Janeiro (2017).

### 3.3.2.3 Critério “Custo de Interligação à Rede”

Durante a fase de projetos, são realizados estudos do solo e infraestrutura para o abastecimento da energia, no que se refere à distância até a subestação mais próxima e ao plano logístico para a distribuição da eletricidade gerada. Ao se analisar o mapa do sistema elétrico do Estado do Rio de Janeiro (Figura 8), nota-se que a região dos Lagos é a que possui a maior proximidade entre as áreas com vocação eólica e o sistema elétrico. Apesar de dispor de relativa proximidade à malha elétrica, o relevo acidentado da região Serrana eleva os custos de interligação e construção de facilidades de acesso.

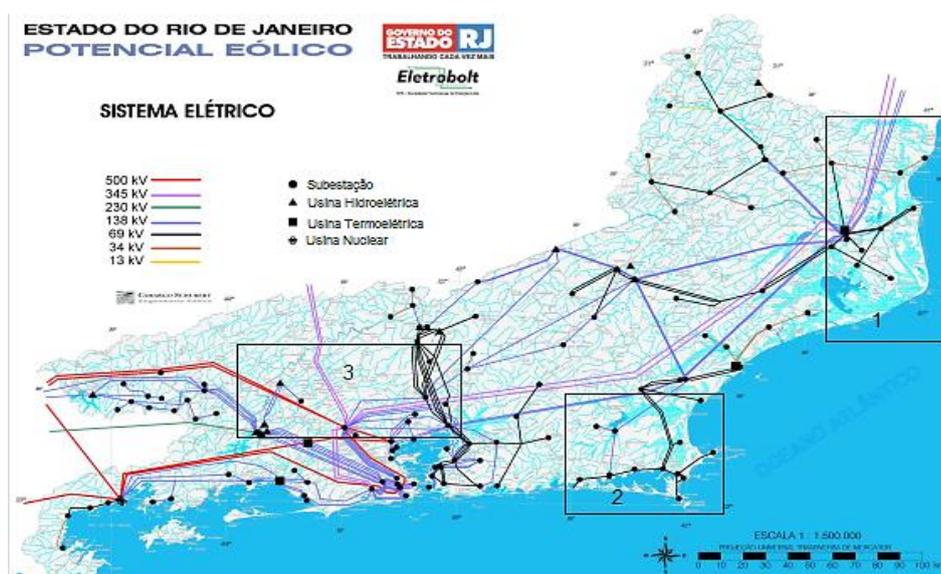


Figura 8 - Malha Elétrica do Estado do Rio de Janeiro.

Fonte: Governo do Estado do Rio de Janeiro (2002).

Como todas as áreas estudadas são muito amplas, foi utilizada como base a concentração de usinas geradoras e/ou subestações em cada uma das regiões estabelecidas, com intuito de quantificar o critério de ligação à rede de distribuição, representada na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantificação de Usinas e/ou Subestações por Região.

ÁREA	REGIÃO	USINAS	SUBESTAÇÕES	TOTAL
1	Norte	1	10	11
2	Lagos	0	12	12
3	Serrana	3	11	14

Fonte: Adaptado de Governo do Estado do Rio de Janeiro (2002).

### 3.3.2.4 Critério “Espaços para Implementação”

Cada uma das regiões apresenta locais favoráveis e desfavoráveis à instalação de um parque eólico. Espaços mais vastos proporcionam a instalação de um número maior de aerogeradores e, conseqüentemente, apresentam possibilidade maior de expansão e produção de energia para a indústria. Baseando-se ainda na tabela de potencial eólico de cada região apresentado no critério Potencial Gerador, extraiu-se o tamanho destes espaços potenciais, cujos ventos apresentam velocidade superior a 6,0 m/s. Os valores cumulativos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Delimitação dos espaços propícios à instalação de aerogeradores de acordo com a altura.

REGIÃO	ALTURA (M)	ESPAÇO DISPONÍVEL (KM <sup>2</sup> )
Norte	50	1844
	75	3335
	100	3908
Lagos	50	886
	75	1566
	100	2130
Serrana	50	576
	75	1050
	100	1484

Fonte: Adaptado de Governo do Estado do Rio de Janeiro (2002).

### 3.3.2.5 Critério “Logística do Terreno-Relevo”

Depois de ter o projeto aprovado, a empresa responsável pelo parque dará início à instalação dos equipamentos necessários para o seu funcionamento. Anteriormente a instalação dos aerogeradores, é necessária a execução de limpeza o terreno e de terraplenagem, com nivelamento e pavimentação dos acessos aos aerogeradores. A segunda etapa é o estaqueamento, que consiste na colocação de estacas nas bases das torres para sua interligação ao solo, onde, posteriormente, são incorporadas ao bloco da fundação, dando sustentação à torre do aerogerador.

Atendo-se aos aspectos logísticos para a operação e montagem dos empreendimentos, percebe-se que as regiões dos Lagos e Norte são favorecidas pelo relevo plano, malha rodoviária e acesso portuário. O relevo acidentado da

região serrana e a ausência de porto a colocam em desvantagem em relação à logística para instalação, montagem e operação.

Diante disto, o processo utilizado para mensurar o critério foi estabelecer pesos diferentes de acordo com os recursos logísticos existentes e quantificá-los em cada uma das regiões. Estes dados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise e classificação por pesos do relevo, malha rodoviária e acesso portuário de cada região.

Logística	Peso	Região Norte		Região dos Lagos		Região Serrana	
		Quant.	Total	Quant.	Total	Quant.	Total
Porto	5	1	5	1	5	0	0
Relevo	Plano	1	5	1	5	0	0
	Acidentado	0	0	0	0	1	0
Rodovia Federal	Duplicada	0	0	1	3	3	9
	Pavimentada	2	4	2	4	1	2
Rodovia Estadual	Duplicada	0	0	1	2	0	0
	Pavimentada	1	5	8	8	12	12
<b>Total</b>			<b>19</b>		<b>27</b>		<b>23</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 RESULTADOS

O critério “Potencial Gerador” é moderadamente mais importante que a “Área Potencial”, pois representa a eficiência do sistema, enquanto a área potencial define a capacidade do mesmo. O critério “Área Potencial” é fortemente mais importante do que o “Custo do Terreno” devido sua interferência na capacidade de produção do parque eólico e o custo do terreno ser capital investido em imóvel. Como o critério “Custo de Interligação à Rede” aborda um custo não retornável, o critério “Área Potencial” é moderadamente mais forte que o anterior. O critério “Logística do Terreno-Relevo” tem fundamental importância no processo de instalação do parque eólico, porém depois de instalado não terá maior influência sobre o processo, por isso o critério “Área Potencial” é fortemente mais importante que este. A Figura 9 indica a representação da hierarquia dos critérios e as áreas de estudo.

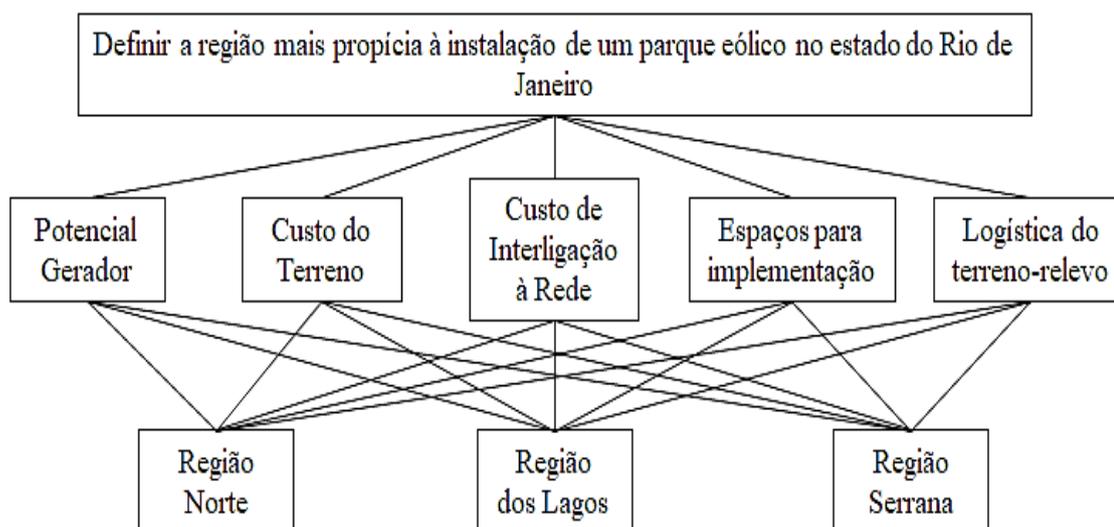


Figura 9 - Hierarquia dos critérios

Fonte: Elaborado pelo autor.

O critério de maior importância dentre os estudados é “Potencial Gerador”, pois define a eficiência do sistema. Como o custo do terreno é um capital retornável e a acessibilidade tem maior interferência apenas no processo de instalação do parque eólico, o potencial gerador acaba sendo um critério extremamente mais importante do que ambos. O potencial gerador tem importância confirmada em relação à ligação à rede de distribuição, pois este pode apresentar altos custos e não oferece um retorno direto do mesmo.

Depois de instalado o sistema para fazer a ligação com a rede de distribuição, todo o capital investido nesse processo não tem retorno direto. No caso do parque eólico ser desativado, o terreno pode ser vendido, gerando capital, já as torres e cabos utilizados na ligação com a rede de distribuição não têm o mesmo destino, tornando-se capital perdido. Pelo fato de oferecer maior risco ao capital, a ligação à rede de distribuição é moderadamente mais forte do que o custo do terreno. A acessibilidade é igualmente importante ao custo do terreno por apresentar maior interferência apenas no momento da instalação.

Devido ao risco do capital investido na ligação com a rede de distribuição, este critério apresenta-se como moderadamente mais importante do que a acessibilidade. Foi elaborada a matriz de pesos critérios, representada na Figura 10.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	
<b>C1</b>	1	1/3	5	3	5	<b>C1</b> = Espaços para implementação <b>C2</b> = Potencial Gerador <b>C3</b> = Custo do Terreno <b>C4</b> = Custo de Interligação à Rede <b>C5</b> = Logística do terreno-relevo
<b>C2</b>	3	1	9	7	9	
<b>C3</b>	1/5	1/9	1	1/3	1	
<b>C4</b>	1/3	1/7	3	1	3	
<b>C5</b>	1/5	1/9	1	1/3	1	

Figura 10 - Matriz de pesos de critérios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo a elaborar a tabela de pagamentos, foi realizado o levantamento dos dados de cada critério para cada alternativa. A seguir, tem-se a tabela de pagamento (Tabela 8) e a matriz de agregação das prioridades (Figura 11), referente aos critérios analisados (Figura 10), de acordo com a metodologia:

Tabela 8 - Tabela de pagamento para aerogeradores de 50, 75 e 100 metros de altura

<b>50 metros</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
	<b>(Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(GWh/Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(R\$)</b>	<b>(Número)</b>	<b>(Número)</b>
Região Norte	1.844	3,12	3.495,00	11	19
Região dos Lagos	886	3,429	2.420,00	12	27
Região Serrana	576	3,5	1.932,50	14	23
Direção	Máx	Máx	Min	Máx	Máx
<b>75 metros</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
	<b>(Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(GWh/Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(R\$)</b>	<b>(Número)</b>	<b>(Número)</b>
Região Norte	3.335	3,825	3.495,00	11	19
Região dos Lagos	1.566	4,019	2.420,00	12	27
Região Serrana	1.050	3,859	1.932,50	14	23
Direção	Máx	Máx	Min	Máx	Máx
<b>100 metros</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
	<b>(Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(GWh/Km<sup>2</sup>)</b>	<b>(R\$)</b>	<b>(Número)</b>	<b>(Número)</b>
Região Norte	3.908	4,053	3.495,00	11	19
Região dos Lagos	2.130	4,072	2.420,00	12	27
Região Serrana	1.484	3,868	1.932,50	14	23
Direção	Máx	Máx	Min	Máx	Máx

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: Máx = Máximo; Min = Mínimo.

Conforme observado na Figura 11, os resultados das prioridades médias locais refletem de forma coerente os dados apresentados na Tabela 8. Para torres de 50 m de altura, a Região Serrana destaca-se nos dois critérios com mais alto peso no problema: C2 e C4. No caso dos aerogeradores de 75 m de altura, a Região dos Lagos se sobressai diante das alternativas, devido a sua predominância no critério de maior importância dentre os estudados: C2. Já para o caso das torres de 100 m, a Região Norte mostra-se a mais promissora, com destaque para o critério C2, citado anteriormente como sendo o de maior peso, e C1, critério de peso intermediário, mas relevante na escolha do local.

<b>50 metros</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	
<b>A1</b>	0,7838	0,0974	0,054	0,1365	0,1047	<b>A1 = Região Norte</b> <b>A2 = Região dos Lagos</b> <b>A3 = Região Serrana</b>
<b>A2</b>	0,1349	0,3331	0,253	0,2385	0,637	
<b>A3</b>	0,0813	0,5695	0,693	0,625	0,2583	
<b>75 metros</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	
<b>A1</b>	0,7854	0,2	0,1095	0,054	0,1047	
<b>A2</b>	0,1488	0,6	0,309	0,253	0,637	
<b>A3</b>	0,0658	0,2	0,5816	0,693	0,2583	
<b>100 metros</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	
<b>A1</b>	0,7854	0,4286	0,1095	0,054	0,1047	
<b>A2</b>	0,1488	0,4286	0,309	0,253	0,637	
<b>A3</b>	0,0658	0,1429	0,5816	0,693	0,2583	

Figura 11 - Matriz de prioridades à luz dos critérios para aerogeradores de 50, 75 e 100 metros de altura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No desenvolvimento da metodologia, os cálculos feitos para determinação do Quociente de Consistência da matriz de cada critério apresentaram valores inferiores a 0,1, sendo então estes considerados aceitáveis para o método.

A análise feita, apresentada na Tabela 9, mostra que a região Serrana se destaca na produção eólica a 50 metros de altura, enquanto a região dos Lagos apresentou-se superior às demais para 75 metros de altura e a região Norte teve o melhor desempenho para 100 metros de altura.

Tabela 9 - Priorização das alternativas por região para aerogeradores de 50, 75 e 100 metros de altura

<b>Ranking</b>	<b>50 metros</b>	<b>75 metros</b>	<b>100 metros</b>
1	Região Serrana	Região dos Lagos	Região Norte
2	Região dos Lagos	Região Norte	Região dos Lagos
3	Região Norte	Região Serrana	Região Serrana

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contatou-se que, havendo uma demanda anual inferior a 2000 GWh na região Serrana, o melhor é que se instale um parque eólico que opere a 50 metros de altura, sendo observada como a melhor região dentre as três, apesar de possuir potencial suficiente apenas neste altura. Sendo a demanda superior ao valor citado anteriormente, deve-se rever a viabilidade do uso da energia eólica na região. Esta ainda apresenta o menor valor para compra de terreno e de interligação a rede de distribuição de energia.

Na região dos Lagos, o indicado é que se utilize aerogeradores que operem a 75 metros de altura, sendo a capacidade produtiva anual máxima de aproximadamente 6.300 GWh, destacando-a como a mais promissora para a esta altura de equipamento. Além disso, observou-se que esta possui a melhor capacidade logística das três áreas, considerando relevo, malha rodoviária e acesso portuário.

Por ter uma área potencial mais extensa que as demais, a região Norte proporciona uma produção total maior, também levando em consideração sua maior eficiência nos aerogeradores a 100 metros de altura. Esta pode chegar a ter uma produção anual próxima a 19.000 GWh, com esta altura, apesar de apresentar o maior custo de terreno, de interligação a rede e condições de logística razoáveis. Cabe destacar que, nesta região, há potencial para instalação em todas as alturas apresentadas, esquadrihando os resultados obtidos.

### 3.5 DISCUSSÃO

O presente trabalho abordou a utilização do método AHP para a seleção do qual região do estado do Rio de Janeiro caracteriza-se como a mais propícia/promissora a instalação de plantas de geração eólico-elétricas, considerando três alturas distintas, 50, 75 e 100 metros, dos aerogeradores. Esta seleção baseou-se na análise de aspectos econômicos, técnicos e logísticos relevantes para a viabilidade do projeto, para cinco dos diversos indicadores existentes, sendo Potencial Gerador, Custo do Terreno, Custo de interligação à Rede, Espaços para Implementação e Logística do terreno-relevo.

O método foi adequado para o caso proposto, pois a decisão, simplesmente pela lógica ou intuição, seria ineficaz para o alcance destes resultados, conforme Saaty (1990). A facilidade oferecida aos gestores pode ser notada ao obter resultados individuais para cada critério ou, no geral, comparando os critérios de forma conjunta, o que permite que a importância de cada critério se torne clara (MACHARIS et al., 2004) e apoia os decisores através das comparações pareadas realizadas (ZAHIR, 1999).

Podemos destacar como exemplo a Central Geradora Eólica Gargaú (CGE Gargaú), primeira central geradora de energia eólica da Região Sudeste, localizada na Região Norte Fluminense. Este empreendimento, através de incentivo do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas – PROINFA, foi instalado na praia de Gargaú, no município fluminense de São Francisco do Itabapoana e possui uma capacidade total instalada de 28,05 MW. A CGE Gargaú integra uma área de 430 hectares ocupada por 17 aerogeradores de 1,65 MW, cada um deles medindo 120 metros de altura (PORTAL MULTIENTREPREENDIMENTOS, 2013). A instalação da mesma demonstra efetivamente que a Região Norte do Estado possui potencial real para exploração de geração eólica de energia e indica que esta encontra-se alinhada com as perspectivas e políticas de expansão da energia eólica no país, permitindo a definição de um zoneamento ecológico-econômico para este tipo de geração energética (BARBOSA FILHO; AZEVEDO, 2014).

Os impactos ambientais causados por empreendimentos eólicos dependem relativamente da localização do mesmo, no qual um projeto cuidadoso e a seleção de locais apropriados podem mitigar os impactos negativos associados (KALDELLIS et al., 2013). Um local que não atenda a todos os requisitos de uma usina eólica

afetará sua eficiência, além disso, o potencial elétrico da usina não pode ser totalmente explorado (ALI et al., 2018).

À medida que mais projetos de energia renovável são promovidos, a falta de espaços viáveis a instalação se tornará a principal restrição (GRASSI et al., 2012), confirmando que a seleção apropriada de locais é fundamental para o futuro desenvolvimento de parques eólicos. Ao mesmo tempo em que as populações em ascensão e economias modernizadas pressionam o espaço disponível para a produção de alimentos (McMICHAEL et al., 2007), habitação e proteção ambiental, as tecnologias de energia renovável serão vistas como favoráveis, pois o uso de combustíveis fósseis pode ser impactado pelas políticas de mudança climática, o que será um grande desafio global (ALLEN; VARGA, 2013).

Cabe destacar que a construção de usinas eólicas traz associado todo um complexo sistema de serviços e melhorias na infraestrutura local (ARAÚJO, 2014), como implantação de indústria da construção civil especializada, desenvolvimento da malha viária, indústria de equipamentos e serviços associados e terceirizados, fomento da economia verde e criação e ampliação de centros de ensino e pesquisas locais. Além disso, a geração de eletricidade a partir da energia eólica tem-se mostrado crescentemente convidativa, por não apresentar a magnitude dos impactos ambientais geralmente associados às demais formas de aproveitamento energético (KALDELLIS et al., 2013), e capacidade de geração de novos empregos (AZEVEDO et al., 2017; SIMAS; PACCA, 2013).

### 3.6 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste estudo foi analisar as regiões mais promissoras para o desenvolvimento e implantação de parques eólicos geradores de energia elétrica em uma área de estudo de caso, o Estado do Rio de Janeiro, com ênfase em considerações logísticas, técnicas e econômicas. Após o processo de avaliação, concluiu-se que a Região Norte é aquela considerada como a mais adequada para a instalação de um parque eólico. Considerando-se todos os critérios, esta possui potencial para instalação em todas as alturas apresentadas e proporcionaria uma produção total maior quando comparada as outras regiões em análise, próxima a

19.000 GWh, a um altura de 100 metros, capaz de atender uma maior área de abastecimento.

O método apresentado pode ser aplicado em qualquer local com disponibilidade de dados adequada, portanto, poderia suportar essa tendência global, embora com adaptações para se adequar à situação local. Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a continuação da investigação com o intuito de definir, dentro da região mais favorável à luz dos critérios analisados, para cada uma das alturas consideradas, qual município seria o mais indicado para receber este tipo de empreendimento, contemplando em sua análise os aspectos sociais e ambientais.

## **4 ESTIMATIVA DE POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ, UTILIZANDO A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Devido a uma maior conscientização sobre os impactos negativos da geração de energia em larga escala por combustíveis fósseis, bem como a percepção de que os recursos do planeta são finitos, governos, organizações e indivíduos estão observando com maior interesse as fontes de energia de pequena escala, descentralizadas e de baixa emissão de carbono (WEEKES; TOMLIN, 2013). Projetos de geração de energia por fontes de natureza renovável são classificados, geralmente, como investimentos sustentáveis e “amigos do meio ambiente” (DAVIDSSON et al., 2012).

O Brasil ocupa uma posição de liderança no uso de recursos naturais geradores de energia renovável. Uma forma de destacar a energia eólica é o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia, com o objetivo de incentivar a participação de fontes renováveis (DALMAZ et al., 2008). Segundo Corrêa da Silva et al. (2016), há realização de leilões e, atualmente, este tipo de negociação é o financiador de cerca de 95% dos projetos existentes.

A avaliação potencial de energia eólica depende de uma modelagem clara do regime dos ventos e do comportamento da velocidade do vento, que são importantes para prever a energia de saída de um sistema de geração eólico (PISHGAR-KOMLEH et al., 2015). Segundo Simons e Cheung (2016), as características do vento e potencial de energia de vários locais são analisados em diversos países do mundo, com intuito de caracterizar os procedimentos matemáticos úteis para realizar verificações em locais com potencial para instalação de parques eólicos. A análise seletiva de vento em áreas urbanas está crescendo como uma ferramenta para avaliar a dispersão de poluentes (DI GILIO et al., 2017).

Medições de vento são geralmente realizadas abaixo das alturas dos cubos das turbinas eólicas, devido à inviabilidade econômica de usar várias torres anemométricas para mapear cada espaço e altura do ponto (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2002). Em consequência, um modelo de corte temporal do vento se mostra necessário para extrapolar o recurso eólico observado das alturas mais baixas disponíveis para a altura da turbina (GUALTIERI; SECCI,

2014). As variações da velocidade do vento durante o ano podem ser caracterizadas em termos de distribuição de probabilidade (KWON, 2010).

Existem várias distribuições de frequência probabilísticas usadas para representar dados de velocidade do vento, tais como distribuição Gamma, Normal, Log-Normal e Weibull, que é a função padrão usada pela comunidade de energia eólica para modelar a distribuição de frequência de velocidade do vento em todo o mundo (CARNEIRO et al., 2016).

Segundo Quercia et al. (2016), a função Weibull é uma das funções de distribuição mais utilizadas para diferentes propósitos, como modelagem, análise de confiabilidade, análise de dados em tempo de vida e muitas áreas de ciência aplicada, como mecânica, bio-sistema, nuclear e engenharia de energia. Em diversos estudos, nota-se que a distribuição de Weibull é utilizada para a mensuração do potencial de energia eólica nas diferentes regiões do mundo (AKDAG; GULER, 2015; ANDRADE et al., 2014).

Muitos estudos fazem uso de dados de vento e distribuição de Weibull para caracterizar uma determinada região (ACAKPOVI et al., 2018; AHMED, 2018; AL-NASSAR et al., 2005; FAZELPOUR et al., 2015; GABRIEL FILHO et al., 2011; GRAH et al., 2014; LALAS et al., 1983; MOHAMMADI; MOSTAFAEIPOUR, 2013; REHMAN et al., 1994; ULGEN; HEPBASLI, 2002). Neste estudos, a função de dois parâmetros de Weibull, sendo eles “k”, o parâmetro de forma, e “c”, o parâmetro de escala, foi descrita como sendo de alta relevância, porque esta foi apontada como adequada para analisar qualquer conjunto dados de vento (LUN; LAM, 2000).

Os principais objetivos deste capítulo são determinar os dois parâmetros, k e c, de uma função de distribuição de densidade de Weibull e calcular a densidade de energia eólica de Campos dos Goytacazes, Brasil, para prever a produção de energia e avaliar a possibilidade de instalação de um parque de geração eólica, considerando as alturas de 10, 50, 75 e 100 metros para os aerogeradores.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Campos dos Goytacazes (21° 45' 15" S, 41° 19' 28" W) é uma cidade do estado do Rio de Janeiro, no sudeste do Brasil. Segundo a classificação climática Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006), a cidade tem uma climatologia equatorial com inverno seco (AW), com temperatura média anual em torno de 23,6 ° C e

altitude média de 13 m. Em 2017, a população era de 490.288 habitantes e a área é de 4037.8 km<sup>2</sup> (IBGE, 2017).

Registros de velocidade do vento foram obtidos por um anemômetro, com altura de sete metros, da estação meteorológica de observação de superfície automática, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no distrito de Farol de São Tomé, em Campos dos Goytacazes. Foram utilizados dados gerados por um ano, mais especificamente no período de 01/03/2017 a 01/03/2018. Um ano de dados de velocidade do vento é aceitável para representar as variações de longo prazo no perfil do vento, apresentando um nível de precisão de 10% (MOHAMMADI; MOSTAFAEIPOUR, 2013).

Para caracterizar o regime de velocidade do vento, os valores foram definidos em ordem decrescente e divididos em classes de 1 m.s<sup>-1</sup>, sendo o intervalo mínimo igual a 0 - 1 m/s e a frequência máxima varia de acordo com as alturas a serem estudadas.

Segundo Safari e Gasore (2010), para projetos que envolvam sistemas de conversão de energia eólica, é necessário estimar a velocidade do vento em várias altitudes. Portanto, os valores do regime dos ventos serão extrapolados compondo um perfil de velocidade com 4 alturas: 10, 50, 75, e 100 m. A altura de 10 metros corresponde a turbinas de pequena escala e as alturas subsequentes foram propostas na análise realizada no capítulo anterior, que são geralmente utilizadas para geração de energia em larga escala.

De acordo com estudos empíricos realizados por Justus et al. (1978), Manwell et al. (2009) e Acakpovi et al. (2018), a velocidade do vento em uma altura desejada Z pode ser avaliada da seguinte forma usando o modelo de lei de potência (Equação 1).

$$V_w(Z) = \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \cdot V_w(Z_{ref})$$

Equação 1 - Modelo de lei de potência.

Onde:

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \cdot \ln(V_w(Z_{ref}))}{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{Z_{ref}}{10}\right)}$$

Equação 2 - Equação para determinação do valor de alfa.

Onde  $Z$  é a altura desejada;  $Z_{ref}$  é a altura de referência em que os dados originais foram coletados;  $V_w(Z)$  é a velocidade do vento na altura  $Z$ ; e  $V_w(Z_{ref})$  é a velocidade do vento na altura  $Z_{ref}$ .

A distribuição de Weibull com dois parâmetros será utilizada para descrever o comportamento do vento, estando esta descrita na Equação 3.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{V_w(Z)}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{V_w(Z)}{c} \right)^k \right]$$

Equação 3 - Função de distribuição de Weibull de dois parâmetros.

Onde  $k$  é o parâmetro de forma (adimensional) e  $c$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) é o parâmetro de escala com a dimensão de velocidade. Para cada localização, os parâmetros de distribuição  $k$  e  $c$  terão valores diferentes e podem ser determinados por vários métodos diferentes.

Para o cálculo do parâmetro de escala  $c$  e forma  $k$ , foi aplicado o método de regressão, que consiste na linearização da função de distribuição acumulada de Weibull, dada pela Equação 4 (MANWELL et al., 2009).

$$F(v) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{V_w(Z)}{c} \right)^k \right]$$

Equação 4 - Função de distribuição acumulada de Weibull.

O resultado da linearização da Equação 4 está disposto na Equação 5, posteriormente detalhada nas Equações 6 e 7.

$$Y = kX - k \ln(c)$$

Equação 5 - Função linearizada da distribuição acumulada de Weibull.

Onde:

$$Y = \ln \left\{ - \ln \left[ 1 - F(V_w(Z)) \right] \right\}$$

Equação 6 - Expressão para determinação de  $Y$ .

$$X = \ln(V_w(Z))$$

Equação 7 - Expressão para determinação de X.

Plotando um gráfico com diferentes valores de Y versus X, obtém-se uma linha reta com inclinação  $a = k$  e coeficiente linear  $b = -k \cdot \ln(c)$ . Isolando o parâmetro c, tem-se a Equação 8.

$$c = \exp\left(\frac{-b}{a}\right)$$

Equação 8 - Expressão para determinação do parâmetro c.

Depois de determinar o parâmetro  $k$ , é necessário calcular o valor da Função Gama para ser usado na equação de distribuição de densidade de probabilidade (CELIK, 2004).

A Função Gamma é complexa, mas é necessário conhecer seus valores apenas em um intervalo razoavelmente estreito de valores, correspondendo ao desvio padrão do vento, respectivamente a 20 e 100% da velocidade média (GRAH et al., 2014).

A caracterização do local de acordo com o regime de ventos correlacionando com a função Gamma com velocidade média anual do vento, a variância e densidade de potência média, foi realizada e apresentada nas Equações 9, 10 e 11, respectivamente. Para calcular a densidade de potência média  $P_m$ , foi utilizada a densidade do ar igual a  $1,12 \text{ kg/m}^3$ .

$$V_w(Z)_{\text{anual}} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Equação 9 - Velocidade média anual do regime dos ventos.

$$\sigma^2 = c^2 \cdot \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left( \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right)^2 \right]$$

Equação 10 - Variação da frequência das velocidades do vento.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

Equação 11 - Densidade de potência média do vento.

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados utilizados totalizaram 8.737 horas de registros, sendo estabelecidas classes de velocidade para cada uma das alturas estudadas, devido a variações consideráveis em seus módulos. Os histogramas de cada uma destas estão dispostos a seguir.

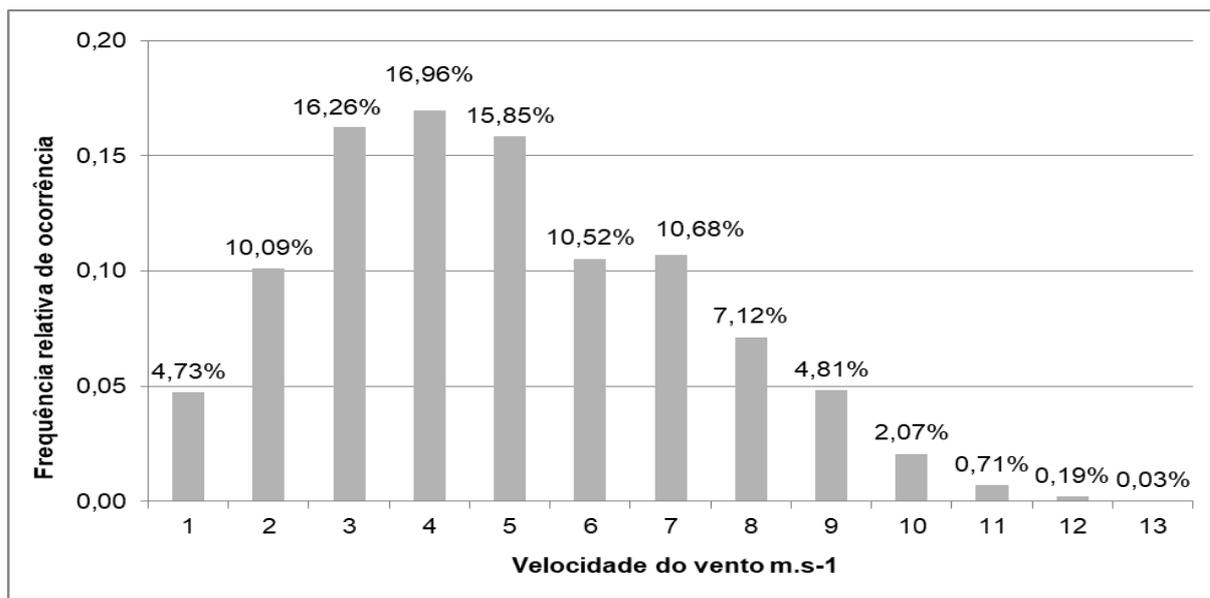


Figura 12 - Frequência relativa de ocorrência anual da velocidade do vento a uma altura de 10 m

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise deste histograma (Figura 12) revela claramente que as velocidades do vento em torno de 3-4 m.s<sup>-1</sup> foram predominantes, com um total de 16,96% da amostra, seguido de perto pela classe de 2-3 m.s<sup>-1</sup>, que representa 16,26%. Segundo Grah et al. (2014), a melhor faixa para a velocidade do vento é entre 3 e 10 m/s, sendo este o intervalo ideal para aplicações em engenharia.

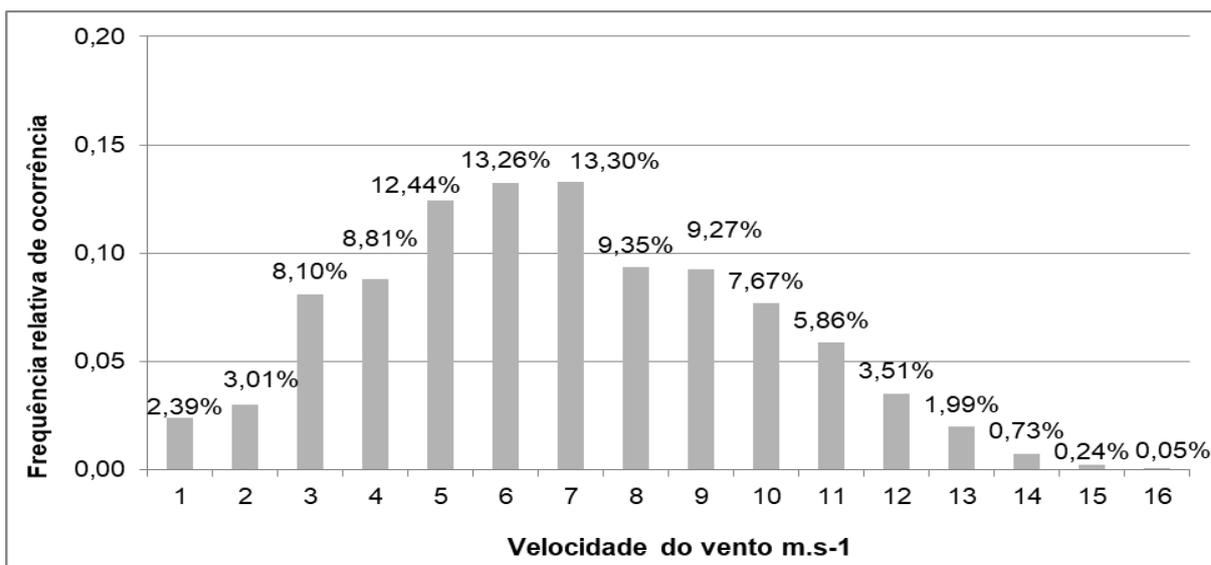


Figura 13 - Frequência relativa de ocorrência anual da velocidade do vento a uma altura de 50 m  
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar-se a Figura 13, nota-se que há uma predominância das velocidades do vento nas categorias 5-6 e 6-7 m/s, com 13,26% e 13,30%, respectivamente. Devido a proximidade de suas frequências, pode-se afirmar que a maioria dos módulos de velocidade verificados estão entre 5 e 7 m.s<sup>-1</sup>.

No caso da frequência relativa de ocorrência para a altura de 75 m, verifica-se a mesma situação da altura anterior, na velocidades do vento nas categorias 5-6 e 6-7 m.s<sup>-1</sup> destacam-se, porém com porcentagens ligeiramente menores, 12,82% e 12,67%, na devida ordem (Figura 14).

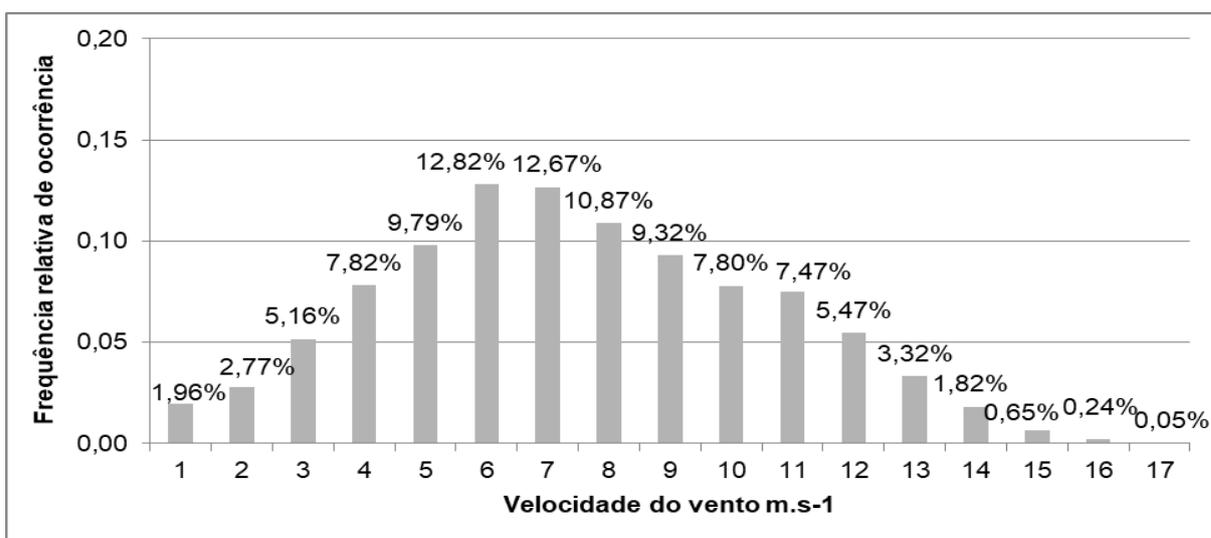


Figura 14 - Frequência relativa de ocorrência anual da velocidade do vento a uma altura de 75 m  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim ao observar-se a frequência relativa de ocorrência anual a 100 metros de altura (Figura 15), há uma situação similar as duas anteriores, porém deve-se salientar que a porcentagem de frequência da chamada velocidade predominante é praticamente a mesma da encontrada na altura de 50 metros. Este fato denota uma certa homogeneidade na velocidades dos ventos de maior periodicidade, apesar de haver uma maior dispersão de módulos no caso dos 100 metros de altura.

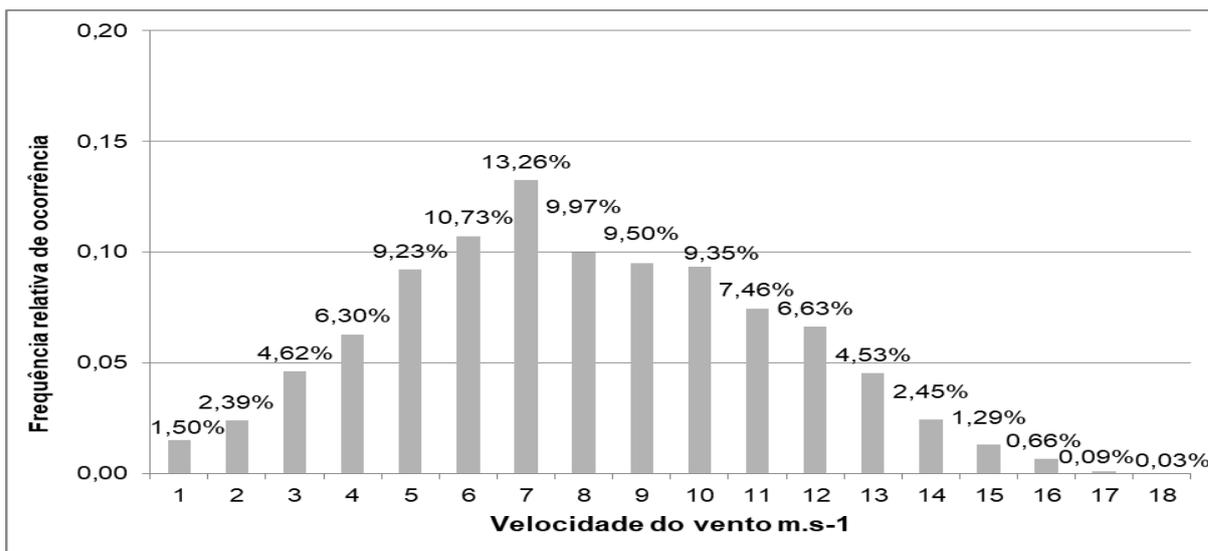


Figura 15 - Frequência relativa de ocorrência anual da velocidade do vento a uma altura de 100 m

Fonte: Elaborado pelo autor

Um resumo dos dados coletados incluindo a velocidade do vento extrapolada para 10, 50, 75 e 100 metros, é apresentado na Tabela 10, seguido pela exibição da função de distribuição de probabilidade desenvolvida usando a velocidade do vento coletada no distrito de Farol de São Tomé. Deve-se salientar que as médias e os desvios padrão a seguir foram obtidos a partir das medições reais.

Tabela 10 - Parâmetros estatísticos da velocidade do vento para diferentes alturas

Parâmetros	Altura (m)			
	10	50	75	100
Velocidade média (m.s <sup>-1</sup> )	4,40	6,35	6,97	7,45
Desvio padrão	2,30	2,93	3,11	3,23

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que há uma proporcionalidade direta entre o crescimento módulo de desvio padrão e o aumento da altura estudada. Um alto desvio padrão indica que os pontos dos dados estão espalhados por uma ampla gama de valores (CORNILLON; MATZNER-LOBER, 2007).

A partir dos valores obtidos nestas análises, calculou-se os parâmetros  $k$  e  $c$  para cada uma das alturas em estudo, a fim de determinação sua funções de probabilidade de Weibull para mensuração do potencial de energia eólica. Os valores encontrados estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores dos dois parâmetros da distribuição de Weibull para as alturas estudadas

Parâmetros	Altura (m)			
	10	50	75	100
$k$	1,99	2,10	2,14	2,18
$c$ (m.s <sup>-1</sup> )	4,70	6,81	7,50	8,02

Fonte: Elaborado pelo autor

O parâmetro de forma  $k$  mostra a taxa de assimetria da curva de Weibull. Valores de  $k$  mais altos (entre 2 e 3) significam que a curva é mais inclinada para velocidades de vento mais altas, como no caso de alturas 50, 75 e 100 metros, e valores mais baixos (entre 1 e 2) significam que a curva é mais inclinada para velocidades de vento mais baixas, indicando que velocidades de vento mais baixas são mais prováveis acontecer, sendo esta circunstância na qual a altura de 10 metros está alocada (GRAH et al., 2014).

O parâmetro de escala  $c$  mostra o valor de pico da curva de Weibull. De fato, maiores módulos de  $c$  significam que a frequência de velocidades do vento é distribuída por um intervalo mais amplo (MOSTAFAEIPOUR et al., 2011). Além disso, a densidade de potência média do vento, devido ao parâmetro cúbico na Equação 11, é fortemente dependente de  $c$  (GABRIEL FILHO et al., 2011).

Examinando-se os parâmetros de escala apresentados, observa-se um aumento relativo de módulo conforme a altura em estudo também aumenta, indicando que não há uniformidade na dispersão dos valões, fato também observado na Tabela 11, com a altura de 100 metros apresentando o maior valor de  $c$  (8,02 m.s<sup>-1</sup>).

A partir da determinação da velocidade média aferida para cada uma das alturas, foi realizada uma comparação entre os valores reais e os valores calculados a partir da Equação 9, que baseia-se nos parâmetros dispostos da Tabela 11 (Figura 16). Foram utilizados para verificação os valores das velocidades média mensais correspondentes a altura de 10 metros.

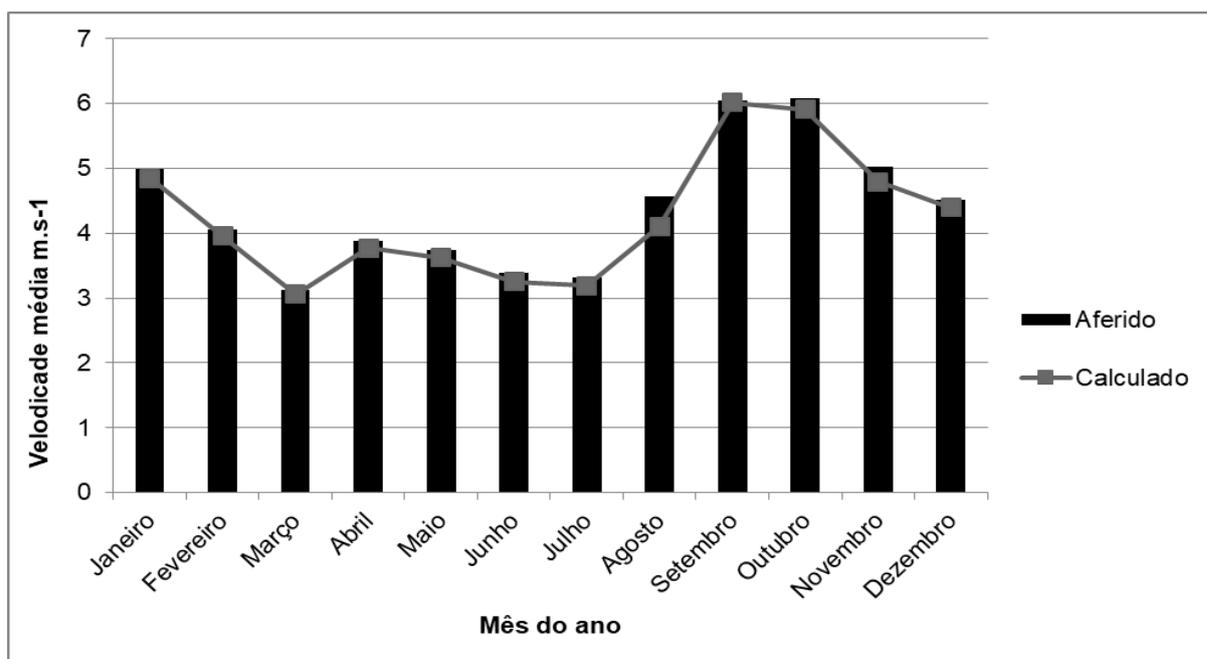


Figura 16 - Comparação entre os valores de velocidade média, aferidos e calculados, para a altura de 10 metros

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode ser observado que há uma baixa variação entre os valores aferidos e calculados, o que demonstra que o método utilizado é adequado a projeções pela relativa proximidade dos módulos obtidos e os reais. A maior variação ocorreu no mês de Agosto, no qual o valor real da velocidade média foi de  $4,57 \text{ m.s}^{-1}$ , enquanto o módulo obtido pela Equação 9 foi de  $4,10 \text{ m.s}^{-1}$ .

Ao analisar-se o mês de Setembro, aquele que apresenta o maior módulo de velocidade dentre os meses do ano, identificou-se que este é o mês de menor variação entre os valores calculados (6,02) e aferidos (6,05), com uma diferença de 0,03 entre estes.

Com estes parâmetros, foi possível determinar a função de distribuição de Weibull para cada uma das alturas estudadas. A figura 17 expressa as curvas das funções correspondentes.

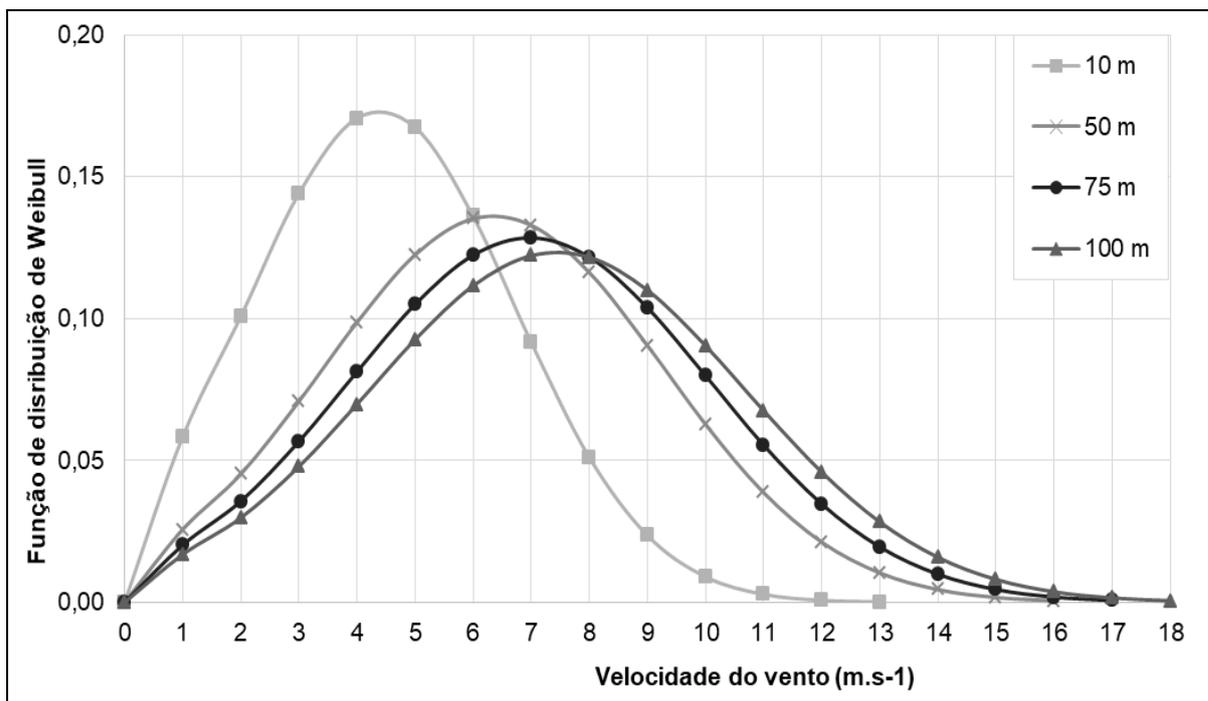


Figura 17 - Distribuições de probabilidade anuais da velocidade do vento calculadas a partir da função Weibull, para alturas de 10, 50, 75 e 100 metros.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando-se a Figura 17, nota-se que, para a altura de 10 m, o ponto máximo da distribuição é atingido entre 4 e 5  $\text{m.s}^{-1}$ , fato que corrobora o módulo da velocidade média aferido, que foi de 4,40  $\text{m.s}^{-1}$  (Tabela 10). O mesmo fato se repete para as demais alturas, nas quais os pontos máximo de suas respectivas distribuições são correspondentes às velocidades máximas reais (Tabela 10).

A distribuição da velocidade do vento determina predominantemente o desempenho dos sistemas de energia eólica. Uma vez conhecida a distribuição da velocidade, a potência média dos ventos e, portanto, a viabilidade econômica poderiam ser facilmente obtidos (ZHOU et al., 2006). A densidade de potência média da energia eólica é geralmente considerada um melhor indicador do recurso eólico do que a velocidade do vento (AL-NASSAR et al., 2005). Os valores calculados da densidade de potência (Equação 11) podem ser visualizados na Figura 18.

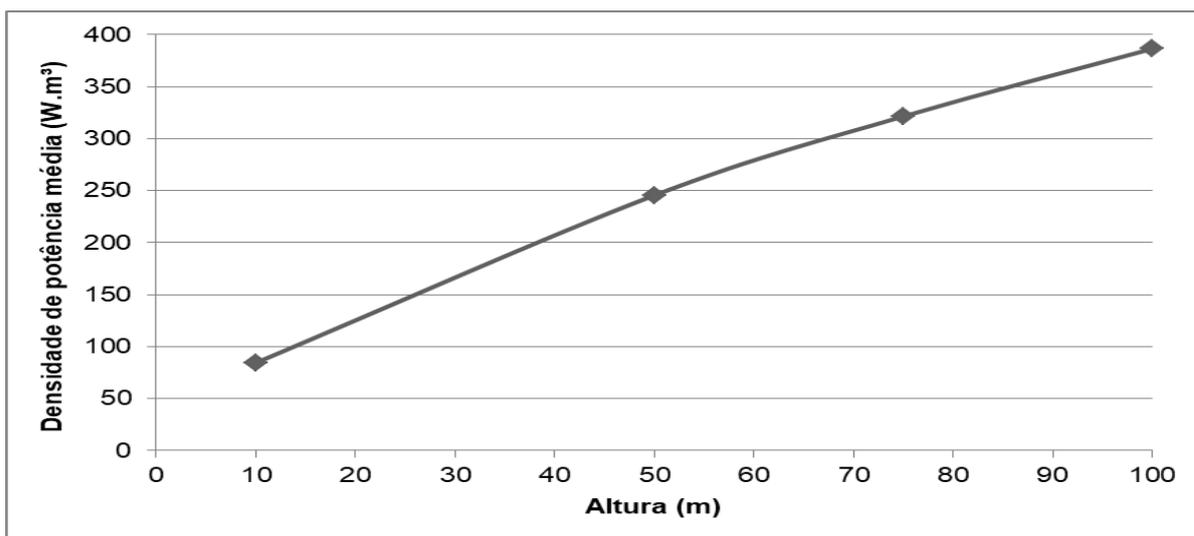


Figura 18 - Valores calculados de densidade de potência média para as alturas estudadas

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado, todos valores da densidade média anual da energia eólica estão acima de  $200 \text{ W.m}^{-2}$ , exceto a densidade de potência correspondente a altura de 10 metros, que obteve um módulo de  $84,89 \text{ W.m}^{-2}$ . Quando densidade de potência média anual atinge valores abaixo de  $100 \text{ W.m}^{-2}$ , esta pode ser adequado para aplicações elétricas e mecânicas não conectadas à rede distribuição, como o carregamento de baterias e o bombeamento de água (CELIK, 2004).

Observa-se um ganho de densidade de potência relevante a medida que a altura de análise aumenta, o que indica que este local é ideal para instalação de parques eólicos que sejam compostos por torres de maior proporção, a partir de 50 metros, o que o classifica como adequado para geração de energia eólica.

Os valores obtidos para altura de 50 metros quando comparados a outros estudos, tais como Grah et al. (2014), o qual obteve um valor de densidade de potência igual a  $5,07 \text{ W.m}^{-2}$ , indicam que a região é deveras favorável a exploração desse meio de geração de energia.

#### 4.4 CONCLUSÃO

Este capítulo tratou sobre a previsão de produção e avaliação da possibilidade de instalação de um parque de geração eólica, considerando as alturas de 10, 50, 75 e 100 metros para os aerogeradores. Para tal, foram determinados os

dois parâmetros,  $k$  e  $c$ , de uma função de distribuição de densidade de Weibull e calculada a densidade de energia eólica para cada um das alturas.

O método de distribuição de Weibull mostrou-se adequado para determinação da distribuição de densidade de Campos dos Goytacazes. Além disso, o método de linearização mostrou-se eficiente para determinação dos valores de  $k$  e  $c$ , que caracterizaram o regime dos ventos.

Diante dos resultados expostos, a partir da análise das densidade de potência para cada uma das alturas, pode-se afirmar que o local escolhido é tecnicamente viável à instalação de um parque eólico, podendo abrigar aerogeradores de 50, 75 e 100 metros de altura.

Para o caso da densidade de potência correspondente a altura de 10 m, esta não é classificada como adequada a geração de energia em larga escala, pois seu módulo está abaixo de  $100 \text{ W.m}^{-2}$ . No entanto, ainda há a possibilidade de utilizar a energia gerada a esta altura para empreendimentos de pequena escala e não conectadas à rede de distribuição.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar a possibilidade de utilização de energia eólica no Estado do Rio de Janeiro, observando dentre as regiões do estado qual é aquela de maior potencialidade para implementação de um parque de aerogeradores. Para tal, verificaram-se alguns fatores condicionantes, como as possibilidades de escoamento da produção a disposição e custo de áreas de implantação, e a disponibilidade de recursos naturais, neste caso o regime dos ventos.

Quanto ao levantamento bibliométrico sobre o tema, apresentado no Capítulo 2, foi possível uma melhor compreensão dos pontos altos globais das pesquisas relacionadas à análise da energia eólica, além de ter sido de forte influência para as direções de pesquisa deste trabalho.

Com relação ao método AHP, este mostrou-se funcional, pois a facilidade oferecida aos gestores pode ser notada ao obter resultados individuais para cada critério ou, no geral, comparando os critérios de forma conjunta.

No Capítulo 3, a partir da análise multicriterial, identificou-se que as regiões estudadas, Norte, Serrana e dos Lagos, apresentam condições favoráveis à instalação de um parque eólico, no âmbito de atendimento regional, cada uma apresentando suas particularidades e restrições. Após o processo de avaliação, concluiu-se que a Região Norte é aquela considerada como a mais adequada para a instalação de um parque eólico. Considerando-se todos os critérios, esta possui potencial para instalação em todas as alturas apresentadas e proporcionaria uma produção total maior quando comparada as outras regiões em análise, próxima a 19.000 GWh, a um altura de 100 metros, capaz de atender uma maior área de abastecimento.

Já no Capítulo 4, foi observado que o método de distribuição de Weibull é adequado para determinação da distribuição de densidade do regime dos ventos, além de destacar que o método de linearização mostrou-se eficiente para determinação dos valores dos parâmetros  $k$  e  $c$ .

Além disso, com base na análise das densidade de potência para cada uma das alturas, identificou-se que o local escolhido, o distrito de Farol de São Tomé, em

Campos dos Goytacazes, é tecnicamente viável à instalação de um parque eólico, podendo abrigar aerogeradores de 50, 75 e 100 metros de altura.

O presente trabalho pode ser útil para a comunidade científica ao apontar que existem muitas maneiras de um método de estimativa, como a distribuição de Weibull, contribuir para a análise dos aspectos do vento como fonte de energia. Portanto, este documento também pode ser útil para as entidades públicas e órgãos de análise meteorológica e para a comunidade de engenharia em todo o mundo.

Cabe destacar que a construção de usinas eólicas traz associado todo um complexo sistema de serviços, como implantação de indústria da construção civil especializada, desenvolvimento da malha viária, indústria de equipamentos e serviços associados e terceirizados, fomento da economia verde e criação e ampliação de centros de ensino e pesquisas locais. Além disso, a geração de eletricidade a partir da energia eólica tem-se mostrado crescentemente convidativa, por não apresentar a magnitude dos impactos ambientais geralmente associados às demais formas de aproveitamento energético.

## 5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, a continuação da investigação com o intuito de definir, dentro da região mais favorável à luz dos critérios analisados, para cada uma das alturas consideradas, se o município de Campos dos Goytacazes seria o mais indicado para receber este tipo de empreendimento com relação aos aspectos sociais e ambientais.

Além desta, sugere-se realizar uma análise para determinação dos equipamentos e tecnologias mais adequadas para este local, observando os aerogeradores disponíveis no mercado e as empresas inseridas neste setor, tendo como base as condições observadas e levantadas ao longo desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACAKPOVI, A.; ISAAH, M. B.; FIFATIN, F. X.; MICHAEL, M. B. Wind velocity extrapolation in Ghana by Weibull probability density function. **Wind Engineering**, v. 42, n. 1, p. 38–50, 2018.
- AHMED, A. S. Wind energy characteristics and wind park installation in Shark El-Quinat, Egypt. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 734–742, 2018.
- AKDAG, S. A.; DINLER, A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 7, p. 1761–1766, 2009.
- AKDAG, S. A.; GÜLER, Ö. A novel energy pattern factor method for wind speed distribution parameter estimation. **Energy Conversion and Management**, v. 106, p. 1124–1133, 2015.
- AKELLA, A. K.; SAINI, R. P.; SHARMA, M. P. Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. **Renewable Energy**, v. 34, n. 2, p. 390–396, 2009.
- AL-NASSAR, W.; ALHAJRAF, S.; AL-ENIZI, A.; AL-AWADHI, L. Potential wind power generation in the State of Kuwait. **Renewable Energy**, v. 30, p. 2149–2161, 2005.
- ALI, Y.; BUTT, M.; SABIR, M.; MUMTAZ, U.; SALMAN, A. Selection of suitable site in Pakistan for wind power plant installation using analytic hierarchy process (AHP). **Journal of Control and Decision**, v. 5, n. 2, p. 117–128, 2017.
- ALLEN, P.; VARGA, L. Exploring possible energy futures for the UK: evolving power generation. **Emergence: Complexity & Organization**, v. 15, n. 2, p. 24–47, 2013.
- ALVES, J. R. X.; ALVES, J. M. Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do método de análise hierárquica (AHP). **Production Journal**, v. 25, n. 1, p. 13–26, 2015.
- AMPONSAH, N.; TROLDBORG, M.; KINGTON, B.; AALDERS, I.; HOUGH, R. L. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of life cycle considerations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 461–475, 2014.
- ANDRADE, C. F. de; MAIA NETO, H. F.; ROCHA, P. A. C.; SILVA, M. E. V. 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**, v. 86, p. 801–808, 2014.
- ARAÚJO, R. C. P. Análise da atitude dos turistas com relação ao desenvolvimento da energia eólica no litoral Cearense, Brasil. **Turismo & Sociedade**, v. 7, n. 2, p. 308–329, 2014.

- ARCHAMBAULT, É.; CAMPBELL, D.; GINGRAS, Y.; LARIVIÈRE, V. Comparing bibliometric statistics obtained from the web of science and Scopus. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 60, n. 7, p. 1320–1326, 2009.
- AZAD, A. K.; RASUL, M. G.; YUSAF, T. Statistical diagnosis of the best weibull methods for wind power assessment for agricultural applications. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 3056–3085, 2014.
- AZEVEDO, J. P. M.; NASCIMENTO, R. S.; SCHRAM, I. B. Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão. **Revista UniVap**, v. 51, p. 101–106, 2017.
- BABAN, S. M. J.; PARRY, T. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. **Renewable Energy**, v. 24, n. 1, p. 59–71, 2001.
- BALOCH, M. H.; KALOI, G. S.; MEMON, Z. A. Current scenario of the wind energy in Pakistan challenges and future perspectives: A case study. **Energy Reports**, v. 2, p. 201–210, 2016.
- BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. O uso da análise hierárquica como auxílio na tomada de decisão de políticas públicas em energia eólica considerando aspectos de sustentabilidade. *In: V CONGRESSO DE ENERGIA SOLAR*, 5., 2014, v. 5, Recife. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Energia Solar, 2014.
- BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 abr. 2002. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Brasília, DF, abr. 2002.
- BRIOZO, R.; MUSETTI, M. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento – UPA 24 h. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 4, p. 805–819, 2015.
- CARNEIRO, T. C.; MELO, S. P.; CARVALHO, P. C. M.; BRAGA, A. P. S. Particle Swarm Optimization method for estimation of Weibull parameters: A case study for the Brazilian northeast region. **Renewable Energy**, v. 86, p. 751–759, 2016.
- CELIK, A. N. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. **Renewable Energy**, v. 29, p. 593–604, 2004.
- CORNILLON, P. A.; MATZNER-LOBER, E. **Régression: Théorie et applications**. Paris: Springer-Verlag France, 2007. 304p.
- CORRÊA DA SILVA, R.; DE MARCHI NETO, I.; SILVA SEIFERT, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 328–341, 2016.
- COSTA, H. G. **Auxílio multicritério à decisão: método AHP**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2006.

COSTA, G. B.; LYRA, R. F. F. Análise dos padrões de vento no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 31–38, 2012.

COSTA ROCHA, P. A.; SOUSA, R. C.; ANDRADE, C. F.; SILVA, M. E. V. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, v. 89, n. 1, p. 395–400, 2012.

DALMAZ, A.; PASSOS, J. C.; COLLE, S. Energia eólica para geração de eletricidade e a importância da previsão. **Revista ABCM–Engenharia**, v. 13, n. 1, p. 27–32, 2008.

DAVIDSSON, S.; HÖÖK, M.; WALL, G. A review of life cycle assessments on wind energy systems. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 6, p. 729–742, 2012.

DONG, Q.; COOPER, O. An orders-of-magnitude AHP supply chain risk assessment framework. **International Journal of Production Economics**, v. 182, p. 144–156, 2016.

DU, H.; LI, N.; BROWN, M. A.; PENG, Y.; SHUAI, Y. A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: The expansion and evolution of a research field. **Renewable Energy**, v. 66, p. 696–706, 2014.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 1, p. 65–76, 2008.

FAZELPOUR, F.; SOLTANI, N.; ROSEN, M. A. Wind resource assessment and wind power potential for the city of Ardabil, Iran. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 6, n. 4, p. 431–438, 2015.

FORMAN, E. H.; SELLY, M. A. **Decision by objectives**: How to convince others that you are right. Singapore: World Scientific, 2002.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; SERAPHIM, O. J.; CANEPPELE, F. L. Caracterização analítica e geométrica da metodologia geral de determinação de distribuições de Weibull para o regime eólico e suas aplicações. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 56–66, 2011.

GANI, A.; MOHAMMADI, K.; SHAMSHIRBAND, S.; ALTAMEEM, T. A.; PETKOVIĆ, D.; CH, S. A combined method to estimate wind speed distribution based on integrating the support vector machine with firefly algorithm. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 35, n. 3, p. 867–875, 2016.

GARTNER, I. R.; CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. Um sistema multicriterial de apoio à análise de projetos em bancos de desenvolvimento. **Revista Produto & Produção**, v. 2, n. 3, p. 75–86, 1998.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2016 – Annual market update**. 2016. Disponível em: <<http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2016>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

GOMES, C. F. S.; COSTA, H. G.; BARROS, A. P. Sensibility analysis of MCDA using prospective in Brazilian energy sector. **Journal of Modelling in Management**, v. 12, n. 3, p. 475–497, 2017.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2002.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Valor da Terra Nua**. Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2017.

GRAH, V. F.; PONCIANO, I. M.; BOTREL, T. A. Potential for wind energy generation in Piracicaba, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 5, p. 559–564, 2014.

GRASSI, S.; CHOKANI, N.; ANHARI, R. S. Large scale technical and economical assessment of wind energy potential with a GIS tool: Case study Iowa. **Energy Policy**, v. 45, p. 73–85, 2012.

GRECO, S.; EHRGOTT, M.; FIGUEIRA, J. **Multiple criteria decision analysis**. New York: Springer Science+Business Media, 2016.

GRUBB, M. J.; MEYER, N. I. **Wind energy: resources, systems and regional strategies**. In: Jo-Hansson, T. B.; KELLY, H.; REDDY, A. K. N.; WILLIAMS, R. H. *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

GUALTIERI, G.; SECCI, S. Extrapolating wind speed time series vs. Weibull distribution to assess wind resource to the turbine hub height: A case study on coastal location in Southern Italy. **Renewable Energy**, v. 62, p. 164–276, 2014.

GWEC. Global Wind Report 2016. **Wind energy technology**, p. 76, 2017.

HARBORNE, P.; HENDRY, C. Pathways to commercial wind power in the US, Europe and Japan: The role of demonstration projects and field trials in the innovation process. **Energy Policy**, v. 37, n. 9, p. 3580–3595, 2009.

HOLDER, R. D. Some Comments on the Analytic Hierarchy Process. **Journal of the Operational Research Society**, v. 41, p. 1073–1076, 1990.

HULIO, Z. H.; JIANG, W.; REHMAN, S. Technical and economic assessment of wind power potential of Nooriabad, Pakistan. **Energy, Sustainability and Society**, v. 7, n. 1, 2017.

IBGE. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2017. Brasília: Diário Oficial da União, 2017.

118 p.

JANKE, J. R. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. **Renewable Energy**, v. 35, n. 10, p. 2228–2234, 2010.

JONG, P.; SÁNCHEZ, A. S.; ESQUERRE, K.; KALID, R. A.; TORRES, E. A. Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 526–535, 2013.

JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W. R.; MIKHAIL, A.; GRABER, D. Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, n. 3, p. 350–353, 1978.

KALDELLIS, J. K.; KAPSALI, M.; KALDELLI, E.; KATSANOUE, E. Comparing recent views of public attitude on wind energy, photovoltaic and small hydro applications. **Renewable Energy**, v. 52, p. 197–208, 2013.

KAPLAN, Y. A. Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 562–568, 2015.

KE, G. Y.; LI, K.; HIPEL, K. W. An integrated multiple criteria preference ranking approach to the Canadian west coast port congestion conflict. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 10, p. 9181–9190, 2012.

KOTTEK, M.; GREISER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

KNOX-HAYES, J.; BROWN, M. A.; SOVACOOOL, B. K.; WANG, Y. Understanding attitudes toward energy security: Results of a cross-national survey. **Global Environmental Change**, v. 23, n. 3, p. 609–622, 2013.

KWON, S.-D. Uncertainty analysis of wind energy potential assessment. **Applied Energy**, v. 87, n. 3, p. 856–865, 2010.

LATINOPOULOS, D.; KECHAGIA, K. A GIS-Based Multi-Criteria Evaluation for Wind Farm Site Selection. A Regional Scale Application in Greece. **Renewable Energy**, v. 78, p. 550–560, 2016.

LUN, I. Y. F.; LAM, J. C. A study of Weibull parameters using long-term wind observations. **Renewable Energy**, v. 20, n. 2, p. 145–153, 2000.

MACHARIS, C.; SPRINAGE, J.; DE BRUCKER, K.; VERBEKE, A. Promethee and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis.: Strengthening Promethee with ideas of AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 153, n. 2, p. 307–317, 2004.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained:**

**theory, design and application.** Chichester: Wiley, 2009. 704p.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O Aproveitamento da Energia Eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1–13, 2008.

MCMICHAEL, A. J.; POWLES, J. W.; BUTLER, C. D.; UAUY, R. Food, livestock production, energy, climate change, and health. **The Lancet**, v. 370, n. 9594, p. 1253–1263, 2007.

MOHAMMADI, K.; MOSTAFAEIPOUR, A. Using different methods for comprehensive study of wind turbine utilization in Zarrineh, Iran. **Energy Conversion and Management**, v. 65, p. 463–470, 2013.

MOSTAFAEIPOUR, A.; SEDAGHAT, A.; DEGHAN-NIRI, A. A.; KALANTAR, V. Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 2545–2556, 2011.

PAZHERI, F. R.; OTHMAN, M. F.; MALIK, N. H. A review on global renewable electricity scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 835–845, 2014.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; SEGUNDO, E. I. C.; LYRA, A. A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, 2012.

PINTO, L. I. C.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 6, p. 1082–1100, 2017.

PISHGAR-KOMLEH, S. H.; KEYHANI, A.; SEFEEDPARI, P. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooh county of Iran). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 313–322, 2015.

POHEKAR, S.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8, n. 4, p. 365–381, 2004.

PORTAL ABEEÓLICA. **Brasil chega a 13 GW de capacidade instalada de energia eólica.** 2018. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/noticias/brasil-chega-a-13-gw-de-capacidade-instalada-de-energia-eolica/>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

PORTAL MULTIEMPREENDIMENTOS. **Central Geradora Eólica Gargaú.** 2013. Disponível em: <<http://multiempreendimentos.com/casos-de-sucesso-gargau.php>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

QUERCIA, G.; CHAN, D.; LUKE, K. Weibull statistics applied to tensile testing for oil well cement compositions. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 146, p. 536–544, 2016.

REHMAN, S.; HALAWANI, T. O.; HUSAIN, T. Weibull parameters for wind speed distribution in Saudi Arabia. **Solar Energy**, v. 53, n. 6, p. 473–479, 1994.

REICHE, D.; BECHBERGER, M. Policy differences in the promotion of renewable energies in the EU member states. **Energy Policy**, v. 32, n. 7, p. 843–849, 2004.

REINHARD, R.; ANTUNES, C. H.; DIAS, L. C. Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 3, p. 1084–1094, 2009.

ROSA, C. S.; GONÇALVES JÚNIOR, E. R.; SOUZA, C. L. M.; ERTHAL JÚNIOR, M. Analysis of the acumulum and disposal method of assets in public organs. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 2, p. 60–75, 2018.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

SAFARI, B.; GASORE, J. A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the Weibull and Rayleigh models in Rwanda. **Renewable Energy**, v. 35, n. 12, p. 2874–2880, 2010.

SHINDE, D. D.; PRASAD, R. Application of AHP for Ranking Of Total Productive Maintenance Pillars. **Wireless Personal Communications**, p. 1–14, 2017.

SILVA, D. M. R. **Aplicação do método AHP para avaliação de Projetos Industriais**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, N. F.; ROSA, L. P.; FREITAS, M. A. V.; PEREIRA, M. G. Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 686–697, 2013.

SILVA, R. C.; MARCHI NETO, I.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 328–341, 2016.

SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 99–115, 2013.

SIMONS, P. J.; CHEUNG, W. M. Development of a quantitative analysis system for greener and economically sustainable wind farms. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 886–898, 2016.

SOLANGI, Y. A.; TAN, Q.; KHAN, M. W. A.; MIRJAT, N. H.; AHMED, I. The Selection

- of Wind Power Project Location in the Southeastern Corridor of Pakistan: A Factor Analysis, AHP, and Fuzzy-TOPSIS Application. **Energies**, v. 11, n. 8, p. 1940, 2018.
- SOUZA, L. P. de; GOMES, C. F. S.; BARROS, A. P. de . Implementation of new Hybrid AHP-TOPSIS-2N method in sorting and prioritizing of an it CAPEX project portfolio. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v. 17, n. 4, p. 977–1005, 2018.
- SUN, H.; WANG, S.; HAO, X. An Improved Analytic Hierarchy Process Method for the evaluation of agricultural water management in irrigation districts of north China. **Agricultural Water Management**, v. 179, n. 1, p. 324–337, 2017.
- TIMILSINA, G. R.; CORNELIS VAN KOOTEN, G.; NARBEL, P. A. Global wind power development: Economics and policies. **Energy Policy**, v. 61, p. 642–652, 2013.
- VARGAS, R. Utilizando a Programação Multicritério (AHP) para Selecionar e Priorizar Projetos na Gestão de Portfólio. In: **PMI Global Congress 2010 – North America**. Washington – DC: Project Management Institute, 2010.
- ULGEN, K.; HEPBASLI, A. Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey. **International Journal of Energy Research**, v. 26, n. 6, p. 495–506, 2002.
- WATSON, J. J. W.; HUDSON, M. D. Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. **Landscape and Urban Planning**, v. 138, p. 20–31, 2015.
- WANG, Q.; ZHANG, C.; DING, Y.; XYDIS, G., WANG, J.; OSTERGAARD, J. Review of real-time electricity markets for integrating Distributed Energy Resources and Demand Response. **Applied Energy**, v. 138, p. 695–706, 2015.
- WEEKES, S. M.; TOMLIN, A. S. Evaluation of a semi-empirical model for predicting the wind energy resource relevant to small-scale wind turbines. **Renewable Energy**, v. 50, p. 280–288, 2013.
- WOLSINK, M. Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support. **Renewable Energy**, v. 21, n. 1, p. 49–64, 2000.
- YUNNA, W.; GENG, S. Multi-criteria decision making on selection of solar–wind hybrid power station location: A case of China. **Energy Conversion and Management**, v. 81, p. 527–533, 2014.
- ZAHIR, S. Clusters in group: Decision making in the vector space formulation of the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 112, n. 3, p. 620–634, 1999.
- ŽAK, J.; GALIŃSKA, B. Multiple criteria evaluation of suppliers in different industries-comparative analysis of three case studies. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 572, p. 121–155, 2018.

ZHAO, Z. Y.; HU, J.; ZUO, J. Performance of wind power industry development in China: A DiamondModel study. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2883–2891, 2009.

ZHOU, W.; YANG, H.; FANG, Z. Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China. **Renewable Energy**, v. 31, n. 6, p. 739–753, 2006.

ZHOU, Y.; SMITH, S. J. Spatial and temporal patterns of global onshore wind speed distribution. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 3, 2013.

ZUPIC, I.; CATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015.