UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MARIANA AID RAMOS COSTA

AGRUPAMENTO DO VENTO NO LITORAL BRASILEIRO PARA ANÁLISE DO EFEITO PORTFÓLIO FRENTE AS USINAS EÓLICAS *OFFSHORE*

JUIZ DE FORA
2022

MARIANA AID RAMOS COSTA

AGRUPAMENTO DO VENTO NO LITORAL BRASILEIRO PARA ANÁLISE DO EFEITO PORTFÓLIO FRENTE AS USINAS EÓLICAS *OFFSHORE*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, de forma remota, a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Profa. D. Sc. Cristina Márcia Barros de Castro

JUIZ DE FORA

2022

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Costa, Mariana.
Agrupamento do vento no litoral brasileiro para análise do efeito portfólio frente as usinas eólicas offshore / Mariana Costa. -- 2022.
90 f. : il.

Orientadora: Cristina Castro
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2022.

1. Agrupamento dos ventos. 2. Efeito Portfólio. 3. Projeção potência eólica offshore. I. Castro, Cristina, orient. II. Título.

MARIANA AID RAMOS COSTA

AGRUPAMENTO DO VENTO NO LITORAL BRASILEIRO PARA ANÁLISE DO EFEITO PORTFÓLIO FRENTE AS USINAS EÓLICAS *OFFSHORE*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, de forma remota, a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 21 de fevereiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profa. D. Sc. Cristina Márcia Barros de Castro (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. D. Sc. Roberta Cavalcanti Pereira Nunes

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D. Sc. Ivo Chaves da Silva Junior

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Durante toda a minha trajetória, tive a sorte de ter comigo pessoas que me apoiaram, me inspiraram e me fizeram chegar aqui. Sem vocês, sem a contribuição de cada um de vocês, a minha trajetória não teria sido a mesma.

Agradeço primeiramente a Deus, por me amparar e ser meu apoio em todos os momentos e dificuldades.

Aos meus pais, Marise e Dinilson, que me moldaram a ser quem sou e nunca duvidaram de mim, até mesmo quando eu duvidei.

Ao meu irmão Dalmo, que me faz aprender todos os dias.

As minhas tias! tios! avós! primos e primas! Afinal, a família é a base de tudo.

Aos meus amigos, em especial, Fernando, Larissa e Luca que, juntamente com a Roberta, embarcaram em ideias e projetos. Sem vocês a faculdade não teria graça!

Meu namorado Orides, por me ouvir e ter paciência com meus desesperos e indecisões.

À Cristina, que me mostrou um outro lado da faculdade e vou levar para a vida.

E todos que seguraram minha mão nessa caminhada!!!

RESUMO

Mediante a uma preocupação global com a preservação ambiental e a busca por garantia no atendimento ao consumo elétrico dado as alterações climáticas, há uma tendência em substituição de fontes fósseis para fontes renováveis. Neste panorama, um dos principais pontos relaciona-se com a diversificação das fontes elétricas, em especial as fontes alternativas: eólica e solar. Sob a ótica de diversificação dos parques eólicos observou-se uma expansão no investimento de usinas eólicas *offshore* a partir do segundo semestre de 2018 no mundo. Em contraponto a este aumento do investimento por eólica *offshore*, nosso país ainda não possui projetos implementados, entretanto, apresenta pesquisas e projetos na área, com pontos a serem desenvolvidos como a diminuição do custo logístico da cadeia elétrico, a necessidade de análises ambientais, além do o planejamento e regulação setorial. Frente a avaliação do planejamento da inserção da fonte *offshore* no país, estudos recentes apontam uma geração de cerca de 50% a mais que a *onshore*, com potencial expressivo no litoral nacional. Para as projeções *offshore* utiliza-se de preceitos da modelagem *onshore* como o comportamento sazonal dos ventos. O comportamento dos ventos reflete em uma geração estável a nível anual, com variações a curto prazo, assim, ao aplicar análises como o Modelo de Decisão de Investimento (MDI), que busca minimizar o custo de expansão garantindo o atendimento à demanda a um dado risco, é necessário utilizar escalas menores. No que tange ao risco do atendimento, um dos pontos verificados nas usinas eólicas *onshore* diz respeito ao efeito de portfólio, em que usinas em regiões diferentes tendem minimizar o risco do sistema. Isto posto, o estudo tem como objetivo avaliar o comportamento do vento em cidades litorâneas a fim de agrupar os ventos com curvas semelhantes para, assim, auxiliar em estudo de modelagem da implementação de usinas eólicas *offshore* no país e no cálculo das curvas de geração. Mediante a metodologia descritiva quantitativa, com aplicação do algoritmo de agrupamento hierárquico, foi possível agrupar trinta e três cidades a partir do comportamento do vento médio em 4 grupos, com localidade geográficas próximas no Cluster 1, Nordeste com Sudeste próximas a área, e no Cluster 2, com Sul e Sudeste próximas, com o Cluster 3 e 4 com apresentando curvas instáveis no Sul. Como resultado, foi possível avaliar a variabilidade eólica no curto prazo, com estabilidade ao longo do ano, com a identificação do comportamento dos *clusters* frente aos meses com maior tendência de diminuição dos ventos, Fevereiro e Março, e com maior estabilidade, Agosto e Setembro para o Cluster com maior representatividade no suprimento da demanda, o Cluster 1.

Palavras-chave: Agrupamento dos ventos. Projeção potência eólica *offshore*. Efeito Portfólio

ABSTRACT

Through a global concern with environmental preservation and the search for guarantee in the offer of electrical energy against climate change, there is a trend in replacing fossil sources for renewable sources. In this scenario, one of the main points is related to the diversification of electrical sources, especially alternative sources: wind and solar. From the perspective of diversification of wind farms, there was an expansion in the investment of offshore wind farms from the second half of 2018 in the world. In counterpoint to this increase in investment by offshore wind, our country doesn't have projects implemented yet, however, it presents research and projects in the area, with points to be developed such as the reduction of the logistics cost of the electric chain, the need for environmental analysis, in addition to the planning and regulation of the sector. With the objective of the planning of the insertion of offshore source in the country, recent studies indicate a generation of about 50% more than onshore, with significant potential on the national coast. For offshore projections, are consider onshore's precepts modeling as the seasonal behavior of winds. The behavior of winds reflects in a stable generation annual, with short-term variations, thus, when applying analyses such as the Investment Decision Model (MDI), which seeks to minimize the cost of expansion ensuring the fulfillment of demand at a given risk, it is necessary to use smaller scales. With regard to the risk of service, one of the points that need consideration is about the portfolio effect, in which plants in different regions tend to minimize the risk of the system. This said, the study aims to model the configuration of wind farms along the Brazilian coast to meet the latent demand projected for the system in two scenarios, Expansion Challenge and Stagnation Scenario, in order to evaluate the precept of the portfolio effect, considering clusters. Through the quantitative descriptive methodology, with application of the hierarchical clustering algorithm, it was possible to group thirty-three cities from the average wind behavior into 4 groups, with nearby geographic locations in Cluster 1, Northeast with Southeast near the area, and cluster 2, with nearby South and Southeast, with Cluster 3 and 4 presenting volatiles curves in the cities of South. As a result, it was possible to evaluate wind variability in the short term, presenting stability throughout the year, with the identification of cluster behavior compared to the months with a higher trend of wind decrease, February and March, and with greater stability, August and September for the Cluster with greater representativeness in the supply of demand, Cluster 1.

Keywords: Wind's clusters. Offshore wind power projection. Portfolio effects

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise em termos dos fatores PEST 32
Figura 2 - Emissões mundiais de gases do efeito estufa em 2016 34
Figura 3 - Cenários de transformações do setor elétrico 35
Figura 4 - Projeções da geração de energia por fonte e cenário 36
Figura 5 - Projeção em termos da variação de geração da matriz elétrica 37
Figura 6 - Esquema do funcionamento da geração de energia eólica 38
Figura 7 - Componentes do aerogerador 38
Figura 8 - Divisão de custos e ciclo de vida do projeto eólico 39
Figura 9 - Velocidade do vento x altura 42
Figura 10– Curva característica de potência de um aerogerador 43
Figura 11 - Velocidade média dos ventos no planeta (m/s) 43
Figura 12 - Aspectos que impactam projetos eólicos *offshore* 44
Figura 13 - Investimentos finais em usinas renováveis entre 2015 a 2020 47
Figura 14 - Projeções da capacidade instalada de energia eólica *offshore* por região 47
Figura 15 - Campo de vento médio no Atlântico Sudoeste considerando restrições socioambientais 49
Figura 16 - Esferas e instituições do setor elétrico brasileiro 55
Figura 17 - Evolução do Consumo de Energia Elétrica 56
Figura 18 - Mapeamento integrado do mix das fontes do setor elétrico centralizado brasileiro 57
Figura 19 - Esquemático do desenvolvimento do estudo 62
Figura 20 – Boxplot velocidade horária dos ventos (m/s) em 33 cidades litorâneas em 2020 69
Figura 21 - Mapa geográfico com a identificação dos clusters encontrados 75
Figura 22 - Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 1 em análise no ano de 2020 77
Figura 23- Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 2 em análise no ano de 2020 78
Figura 24 - Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 3 em análise no ano de 2020 79
Figura 25 - Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 4 em análise no ano de 2020 79

Figura 26 – Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020 80
Figura 27- Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020 81
Figura 28 - Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020 81
Figura 29 - Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020 82
Figura 30 - Potência máxima de um aerogerador (MW) calculado para as cidades dos estudos 83
Figura 31 – Geração (MWh/h) total modelada para os *clusters* em relação ao ano de 2020 ... 85
Figura 32 - Curva de geração (MW) do Cluster 1 nos períodos do dia..... 88
Figura 33 - Curva de geração (MW) do Cluster 2 nos períodos do dia 88
Figura 34 - Curva de geração (MW) do Cluster 3 nos períodos do dia..... 89
Figura 35 - Curva de geração (MW) do Cluster 4 nos períodos do dia..... 89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Projetos eólicos *offshore* em fase de licenciamento 52
Quadro 2 - Recursos disponíveis para expansão da oferta de energia elétrica 59
Quadro 3 - Métodos hierárquicos de similaridade 64
Quadro 4 - Avaliação das cidades a serem trabalhadas 67
Quadro 5 - Resultados obtidos para avaliação dos métodos hierárquicos a medida de correlação 70
Quadro 6 - Resultados obtidos para avaliação dos métodos hierárquicos da medida euclidiana 72
Quadro 7 - Relação entre cidades em análise e clusters encontrados 74
Quadro 8 - Representatividade do cluster do atendimento demanda latente projetada 86
Quadro 9 – Variação (%) entre os períodos em termos mensais para os clusters 87
Quadro 10 – Variação e escala de geração mensal para os agrupamentos para a projeção do período de 2021-2045 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações relacionadas a operação de uma usina eólica 40
Tabela 2 - Classes de rugosidade 41
Tabela 3 - Principais fornecedores de aerogeradores eólicos *offshore* 45
Tabela 4 - Potencial eólico *offshore* por distância da costa brasileira 48
Tabela 5 - Potencial eólico *offshore* em termos do intervalo batimétrico da costa brasileira .. 49
Tabela 6 - Fator de capacidade energia eólica *offshore* para região e faixa de velocidade avaliada na pesquisa 50
Tabela 7 - Equações da produção de energia em processos estocásticos 60
Tabela 8 - Formulação para correlação cofenética 65
Tabela 9 - Equação de correlação de Pearson 65

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AMA	Acompanhamento das Medições Anenométricas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPEX	*Capital Expense* (Investimento de capital)
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CVU	Custo Variável Unitário
DECEX	Análise de descomissionamento
DEVEX	*Developer Exchange* (Pesquisa de desenvolvimento)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FID	*Final investment decision* (Decisão final de investimento)
GEEs	Gases do Efeito Estufa
GW	GigaWatt
IEA	*International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)
INMET	Instituto Nacional de Metrologia
kW	Quilowatt
MDI	Modelo de Decisão de Investimento
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MtCO2e	Milhões de toneladas de dióxido de carbono
M/s	Metros por segundo
MW	MegaWatt
MWh/h	MegaWatt
MWh	MegaWatt-hora
NOX	Óxidos de nitrogênio
O&M	Operação e Manutenção
ONS	Operador Nacional do Sistema
PEST	Político, Econômico, Sociocultural e Tecnológico
PNE	Plano Nacional de Expansão
SDE/Cade	Secretaria de Direito Econômico / Conselho Administrativo de Defesa Econômica
SDS	*Sustainable Development Scenario* (Cenário de desenvolvimento sustentável)
SO2	Dióxido de enxofre
STEPS	*Stated Policies Scenario* (Cenário de políticas declaradas)
TCU	Tribunal de Contas da União

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 25

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 25
1.2 JUSTIFICATIVA 27
1.3 ESCOPO DO TRABALHO 27
1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS 28
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 28
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 29

2. CENÁRIOS DO SETOR ELÉTRICO 31

2.1 CARACTERÍSTICA DA ENERGIA EÓLICA 38
2.2 DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO MUNDO 45
2.3 PERSPECTIVAS DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO BRASIL 48
2.3.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO 53
2.3.2 PLANEJAMENTO DE OPERAÇÃO E A TEORIA DO PORTFÓLIO 56

3. MODELAGEM DE DADOS 62

3.1 AGRUPAMENTO DE DADOS 62
3.2 PROGRAMAÇÃO LINEAR ..... **ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4. RESULTADOS 67

4.1 AGRUPAMENTO DA VELOCIDADE HORÁRIA DO VENTO NAS CIDADES EM ANÁLISE 67
4.1.1 TRATAMENTO DOS DADOS 67
4.1.2 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE AGRUPAMENTO 70
4.2 POTÊNCIA MÁXIMA PROJETADA PARA OS AEROGERADORES NAS CIDADES LITORÂNEAS 76
4.3 APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR ..... **ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
4.3.1 PREMISSAS E VARIÁVEIS DO MODELO ..... **ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4.3.2 MODELO PARA DETERMINAÇÃO DO MIX ÓTIMO DOS AEROGERADORES EÓLICOS OFFSHORE NAS CIDADES LITORÂNEAS PARA ATENDIMENTO DA DEMANDA LATENTE .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4.3.1 RESULTADO DO MODELO PARA O CENÁRIO DESAFIO DE EXPANSÃO .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4.3.2 RESULTADO DO MODELO PARA O CENÁRIO DE ESTAGNAÇÃO.....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4.4 4.4 ANÁLISE DO EFEITO PORTFÓLIO 84

5. CONCLUSÕES 94

REFERÊNCIAS..... 95

ANEXO E – TERMO DE AUTENTICIDADE 100

1. INTRODUÇÃO

O presente tema de Trabalho de Conclusão de Curso tem como um dos objetivos avaliar o comportamento do vento em cidades litorâneas a fim de agrupar os ventos com curvas semelhantes para, assim, auxiliar em estudo de modelagem da implementação de usinas eólicas *offshore* no país.

A fim de atingir tal objetivo, o estudo aborda o cenário atual de transição energética e projeções para atingir a economia de zero carbono por meio da análise do planejamento nacional de expansão a longo prazo e das características da costa brasileira.

O processo de agrupamento dos ventos tem a intenção de avaliar a complementariedade das variáveis a fim de verificar pontos que possuam comportamentos que minimizem o risco de falta de suprimento nos cenários de projeção de crescimento da demanda elétrica. Além disso, o estudo inicial dos dados do litoral brasileiro poderá nortear estudos com base de dados dos ventos em alto mar para as usinas eólicas *offshore*.

Pode-se considerar este estudo sobre parques eólicos *offshore* relevantes dado a recente expansão da fonte com perspectiva de investimentos a nível mundial. Assim, resultados do comportamento da curva no vento no litoral brasileiro poderão agregar no planejamento de longo prazo da matriz elétrica brasileira no que tange a inserção de usinas eólicas *offshore.*

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso de energia, segundo Lembo (2015), determinou mudanças profundas na sociedade, como na Revolução Industrial, no século XVIII, em que houve a substituição da lenha pela energia de origem fóssil, o que acarretou na presença de fontes não renováveis no mundo e, por conseguinte, na emissão de gases do efeito estufa.

De face a este cenário, Capelli (2013) discute que, atualmente, há uma tendência mundial em substituir fontes fósseis para fontes renováveis como consequência de uma maior preocupação com a preservação ambiental dado às alterações climáticas que decorreram da emissão de gases.

Arce (2014) complementa que estudos acerca de riscos sobre o mix das fontes no setor elétrico apontaram que portfólios ótimos envolvem o direcionamento de investimento para utilização de energia eólica e energia renovável a fim de torná-las eficientes, isso ocorre uma vez que tais tecnologias têm custo fixo e não estão sujeitas às variações de preços de combustíveis.

Em vista ao setor elétrico brasileiro, segundo Reis (2011), tem-se a análise da matriz por meio das incertezas dado a predominância de usinas hidrelétricas e sua dependência de aspectos climáticos visando, assim, minimizar políticas de racionamento, manutenção de níveis aceitáveis de segurança e cortes do sistema, além de considerar aspectos ambientais, uma vez que se aciona termelétricas quando há baixos níveis de reservatório.

Em um contexto de diversificação da matriz energética, Miguel (2016) pontua que a energia eólica *offshore* vem apresentando taxas de crescimento expressivas em termos mundiais, apesar de ainda estar na fase de maturação. Já sob um contexto nacional, Miguel (2016) descreve acerca dos resultados satisfatórios para a velocidade de ventos próxima à região de litoral com fatores de carga superiores a *onshore* .

No Brasil ainda não se tem projetos implementados de parques eólicos *offshore*, apesar das condições ambientais favoráveis. Entretanto, há projetos submetidos para avaliação ambiental, com projeções de inserção da fonte na matriz elétrica brasileira a partir de 2027.

Como forma de viabilizar projetos de usinas eólicas *offshore* tem-se a discussão a respeito do planejamento da energia proveniente dos ventos, Rosa e Haydt (2022) discutem sobre o planejamento elétrico eólico atual, dado que tal fonte apresenta um recurso energético mais previsível e menos incerto que a fonte hídrica em escalas mensais e anuais, entretanto, é necessário avaliar escalas menores de tempo em termos de horas e minutos.

Além disso, Rosa e Haydt (2022) sinalizam que a expansão ótima do sistema elétrico com enfoque no planejamento de operação e, considerando as incertezas e volatilidade das fontes, envolve a utilização de modelos como o Modelo de Decisão de Investimento (MDI) que busca minimizar o custo de expansão (somatório entre custo de investimento e de expansão) garantindo o atendimento à carga de energia e à demanda máxima de potência a um dado risco.

De tal forma, dado o potencial dos parques eólicos *offshore* e do conceito de diversificação da matriz elétrica, o estudo busca avaliar o comportamento dos ventos em cidades distintas ao longo do litoral brasileiro agrupando-as em *clusters* , a fim de auxiliar em estudos para modelar a inserção de usinas eólicas *offshore* no país dado a avaliação do efeito portfólio.

O termo eólica *onshore* refere-se a usinas instaladas em meio terrestre

O termo *cluster* significa “aglomerar”, “agrupar”, assim, refere-se a integração entre dois ou mais grupos distintos.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com Chaves e Murari (2020), a geração hídrica no Brasil tem apresentado tendência de estabilidade nos últimos anos concomitantemente com crescimento constante da demanda de energia, assim, alternativas complementares a fonte para suprimento da demanda tem sido realizada principalmente por meio de termelétricas e eólicas *onshore*.

Mediante ao crescimento da demanda e busca por diversificação do mix elétrico dado as características de expansão da geração hídrica, Santos (2013) pontua que os aerogeradores eólicos *offshore* geram até 50% a mais de energia quando comparado ao *onshore*.

A respeito da geração de energia eólica, EPE (2019) discute a alta variabilidade de um único aerogerador e, que tal variabilidade, é minimizada quando há a geração simultânea de muitos aerogeradores geograficamente dispersos, o que está relacionado ao conceito de efeito portfólio.

Assim, o trabalho justifica-se ao avaliar o impacto da variação e curva do vento ao longo das cidades litorâneas brasileiro a fim de servir como análise e base para estudos do efeito de portfólio em usinas eólicas offshore, uma vez que há um potencial brasileiro ainda não explorado para suprimento da demanda latente de energia elétrica, com o país apresentando características favoráveis para implementação dos parques *offshore* a longo prazo e a distribuição geográfica das usinas no país.

EPE (2019) ainda complementa que a perspectiva de implementação da eólica *offshore* no Brasil para o ano de 2027. Assim, o estudo corrobora para uma análise inicial dos cenários de complementaridade dos ventos, entre as regiões brasileiras, dado as projeções do cenário elétrico.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O escopo do trabalho foi fundamentado por meio de uma análise estatística da série horária do vento no ano de 2020 em trinta e três cidades litorâneas, a fim discutir sobre o efeito portfólio das usinas eólicas em diferentes localidades do Brasil.

Para isso, utilizou a série de ventos e com base no método de *cluster*ização foi possível agrupar as cidades de acordo com o comportamento da série histórica do vento médio da cidade litorânea a fim de avaliar o efeito portfólio entre os grupos identificados.

Como forma de discussão dos dados e verificação da premissa do estudo de otimização do planejamento da operação elétrica por meio da diversificação das localidades de geração elétrica, será analisado a inferência de hipóteses mediante aos resultados geográficos obtidos no agrupamento de dados.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O objetivo principal do estudo foi verificar o mix de parques eólicos ao longo do litoral brasileiro que minimize os custos de geração e atenda os cenários previstos para a demanda de energia elétrica dado o conceito de efeito portfólio.

Para tanto, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Discutir sobre o planejamento a longo prazo do setor elétrico brasileiro;
- Realizar o agrupamento de dados referente a velocidade do vento ao longo do litoral brasileiro por meio da série horária;
- Avaliar a complementaridade entre os ventos do litoral brasileiro;
- Analisar a geração de energia eólica em diferentes localidades do litoral brasileiro.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

De acordo com Gil (2002), uma pesquisa pode ser caracterizada como um procedimento racional e sistemático a fim de proporcionar respostas às indagações levantadas.

Neste contexto, o presente estudo visa entender como a energia eólica *offshore* pode estar inserida no planejamento de expansão do setor elétrico mediante as características do litoral nacional. Para tanto, utiliza-se de uma pesquisa quantitativa que, segundo Gil (2002), lida com fatos quantificáveis.

De tal maneira, o estudo aborda e analisa os processos estocásticos dos ventos brasileiros por meio da série histórica de trinta e três cidades no ano de 2020 através do software Matlab.

Segundo Gil (2002), a pesquisa descritiva visa descrever as características de determinada população ou estabelecer relação entre variáveis que, no caso do presente estudo. Gil (2022), complementa que as pesquisas descritivas podem assemelhar-se às pesquisas exploratórias ao proporcionar uma nova visão para um problema.

De tal maneira, a metodologia do estudo pode ser classificada como uma pesquisa descritiva exploratória por meio de uma análise quantitativa que utiliza de algoritmos de agrupamento para avaliar os dados e pressupostos a fim de identificar o comportamento dos ventos ao longo do litoral brasileiro.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos e apresenta uma visão geral sobre as perspectivas de diversificação do setor elétrico dado a preocupação ambiental com foco na inserção de usinas eólicas *offshore*.

Além disso, apresenta uma revisão da literatura acerca das variáveis e incertezas envoltas no planejamento de parques eólicos *offshore*, bem como parâmetros e equações para delinear a distribuição de geração eólica.

O capítulo 1 apresenta as questões introdutórias do presente estudo, expondo a justificativa do tema escolhido, o escopo do trabalho, os objetivos da pesquisa, além da metodologia utilizada para atingir os objetivos traçados.

Já o Capítulo 2 discorre sobre os cenários do setor elétrico mundial, exemplificando a transição energética para uma economia de zero carbono com projeções de cenários dado às ações traçadas na Conferência de Paris e na busca de uma matriz renovável. E tem como subtópicos: as características da energia eólica, o desenvolvimento da fonte eólica *offshore* no mundo e as perspectivas de parques eólicos *offshore* no Brasil.

O subtópico 2.1 apresenta a conceituação sobre a energia eólica, com definição dos fatores e equações para cálculo dos ventos, além da definição de energia eólica *onshore* e *offshore* com o subtópico.

Já o subtópico 2.2 contextualiza a energia eólica *offshore* e seu desenvolvimento a nível mundial, exemplificando investimentos e projeções da inserção da fonte nos próximos anos.

Enquanto o tema referente ao tópico 2.3 aborda a energia eólica *offshore* no Brasil, destacando características favoráveis do litoral nacional e projetos em licenciamento ambiental, além disso, aborda dois temas em subitens, um relacionado a configuração do setor elétrico brasileiro quanto ao mix de fontes e quanto a estrutura e, o outro, discute o planejamento de expansão a longo prazo e a teoria de portfólio aplicada a usinas eólicas *offshore*.

No capítulo 3 é apresentado a estrutura de desenvolvimento do trabalho, delimitando as abordagens a serem utilizadas no estudo apresentando, assim, tem-se o tema envolvendo a análise de agrupamento a fim de avaliar o conceito do efeito portfólio.

Já o Capítulo 4 aborda a análise de resultados obtidos no agrupamento do comportamento dos ventos entre as cidades em estudo, além da discussão sobre o efeito portfólio dada a geolocalização das cidades em análise.

Por fim, o capítulo 5 discorre sobre a conclusão da pesquisa e verificar se os objetivos específicos estipulados foram, de fato, alcançados.

2. CENÁRIOS DO SETOR ELÉTRICO

Em face ao cenário mundial contemporâneo, Pinto (2018) discorre acerca da atual transição energética, de uma matriz fóssil para um modelo pautado em fontes renováveis, como resposta às consequências ambientais trazidas pelo histórico de utilização de energias não renováveis baseadas em carbono.

Mediante aos riscos ambientais advindos da emissão de carbono, UNIC Rio (2021) sobre a Conferência de Paris, considera, dadas determinadas premissas, como as ameaças urgentes e potencialmente irreversíveis das mudanças climáticas, a necessidade de cooperação e participação de todos os países para uma resposta eficaz e apropriada para a redução das emissões globais.

Frente às designações do acordo, WRI Brasil (2021) destaca o marco da cooperação internacional por meio da participação de 186 países em ações climáticas pautadas na orientação acerca de metas e sinais de longo prazo, do compromisso para revalidações das ações dos países, da transparência necessária para garantir a execução das medidas previstas, além da resposta ao impacto de eventos climáticos e recursos financeiros que permitem a mudança proposta.

Segundo CISL (2016), apesar de variações energéticas entre setores e regiões geográficas, o encontro abordou pautas comuns traçando metas e ações específicas para os participantes com o objetivo de se atingir uma economia de carbono zero.

A rede de carbono zero, de acordo com Anon (2021), corresponde a não se acionar novas emissões à atmosfera, buscando um equilíbrio entre as emissões de dióxido de carbono com a quantidade de absorção equivalente da atmosfera. Assim, segundo CISL (2016), a economia de zero carbono busca atingir um impacto líquido neutro.

Ainda acerca da Conferência de Paris, CISL (2016) complementa que se fortaleceu a meta de manutenção do aquecimento global abaixo de 2ºC visando 1,5°C ao final do período do acordo, a participação ativa de representantes de cidades, governos e sociedade civil na geração de ideais a fim de estruturar compromissos nacionais ascendentes e, também, abordou tópicos necessários para se construir economias resilientes ao carbono zero.

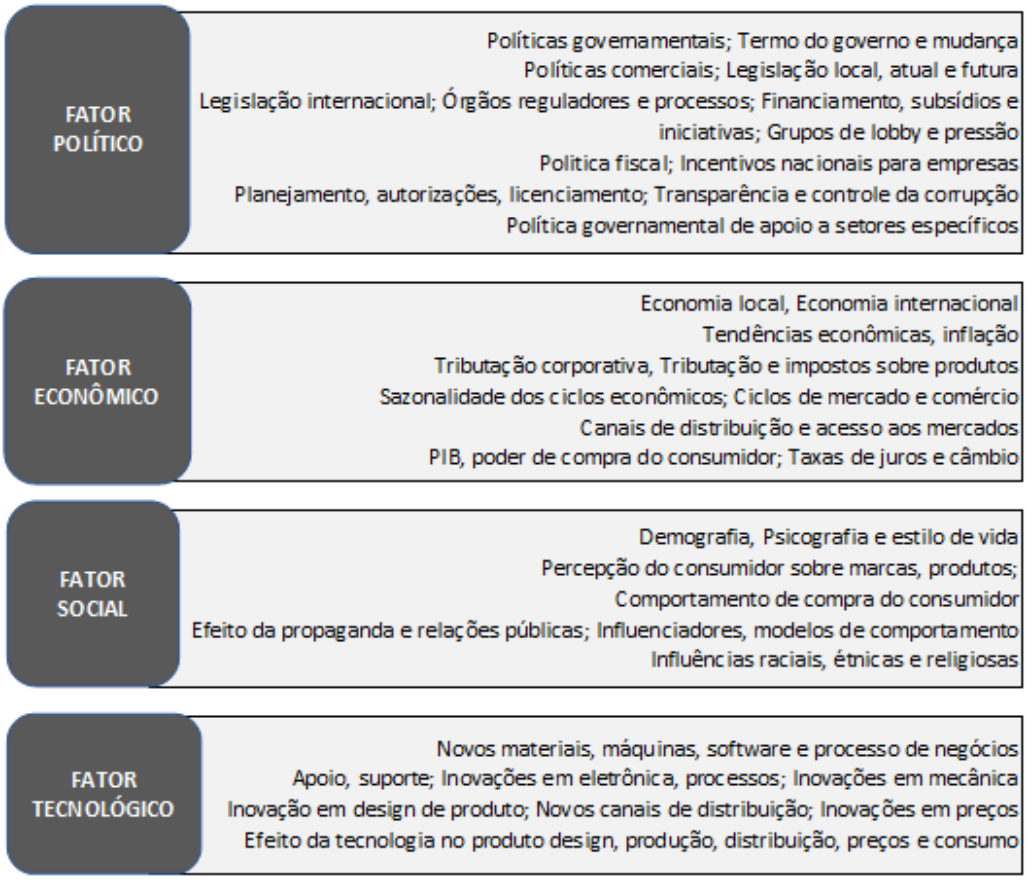
Mediante a análise realizada por IRENA (2019a), para que os países sejam capazes de atingir a redução da emissão de carbono será necessária uma combinação entre energia renovável, eficiência e eletrificação, além disso, ressalta a importância da abordagem global com o envolvimento da sociedade em sua totalidade.

Para conciliar a perspectiva energética com a sustentabilidade, IRENA (2019a) acrescenta a necessidade de três pilares fundamentais: o aumento da participação das energias renováveis na matriz energética, a redução da demanda global de energia por meio da eficiência energética e aumentar a eletrificação por todos os setores de uso final.

Em face dos objetivos do Acordo de Paris, CISL (2016) discorre sobre a análise PEST (Político, Econômico, Sociocultural e Tecnológico) o qual fornece uma estrutura para modelar o entendimento das ações a serem realizadas a fim de atingir uma economia de zero carbono.

A análise PEST, segundo Bonnici e Galea (2014), busca avaliar estratégias considerando os fatores macro ambientais no que diz respeito à política, economia, social e a tecnologia. Assim, a Figura 1 subsequente identifica pontos a serem levantados de forma estratégica nesta avaliação.

Figura 1 - Análise em termos dos fatores PEST



Fonte: Adaptado de Bonnici e Galea (2014).

Dado os tópicos discutidos na Figura 1, CISL (2016) discute os fatores macro ambientais delineados para atingir os objetivos da Conferência de Paris. Em relação aos

aspectos políticos foram levantadas ações relacionadas a um maior foco na regulamentação de emissões e qualidade do ar, aumento dos padrões de eficiência energética, maior apoio às energias renováveis, gestão de riscos climáticos e incentivos à agricultura e florestamento inteligente.

Já em termos econômicos, CISL (2016) pontuou ações voltadas para investimento em novas tecnologias e modelos de negócio de baixo carbono, estruturação da geração de energia, financiamento e pesquisas para indústrias de energia renovável e tecnologia limpa, incentivo da eficiência energética, aumento de preço do carbono, entre outros.

No que concerne ao fator sociocultural, CISL (2016) abordou tópicos como o aumento da pressão social em novos projetos de combustíveis fósseis, aumento da abordagem de conscientização acerca de mudanças climáticas e bem-estar social, maior apoio a energia incentivadas, difusão do interesse a preocupação ambiental nas empresas, entre outros.

E, no fator tecnológico tem-se, segundo CISL (2016), aspectos como o aumento da pesquisa em tecnologias limpas e eficiência energética, inovações em equipamentos, inserção de tecnologia da informação e de dados, modelos descentralizados, entre outros.

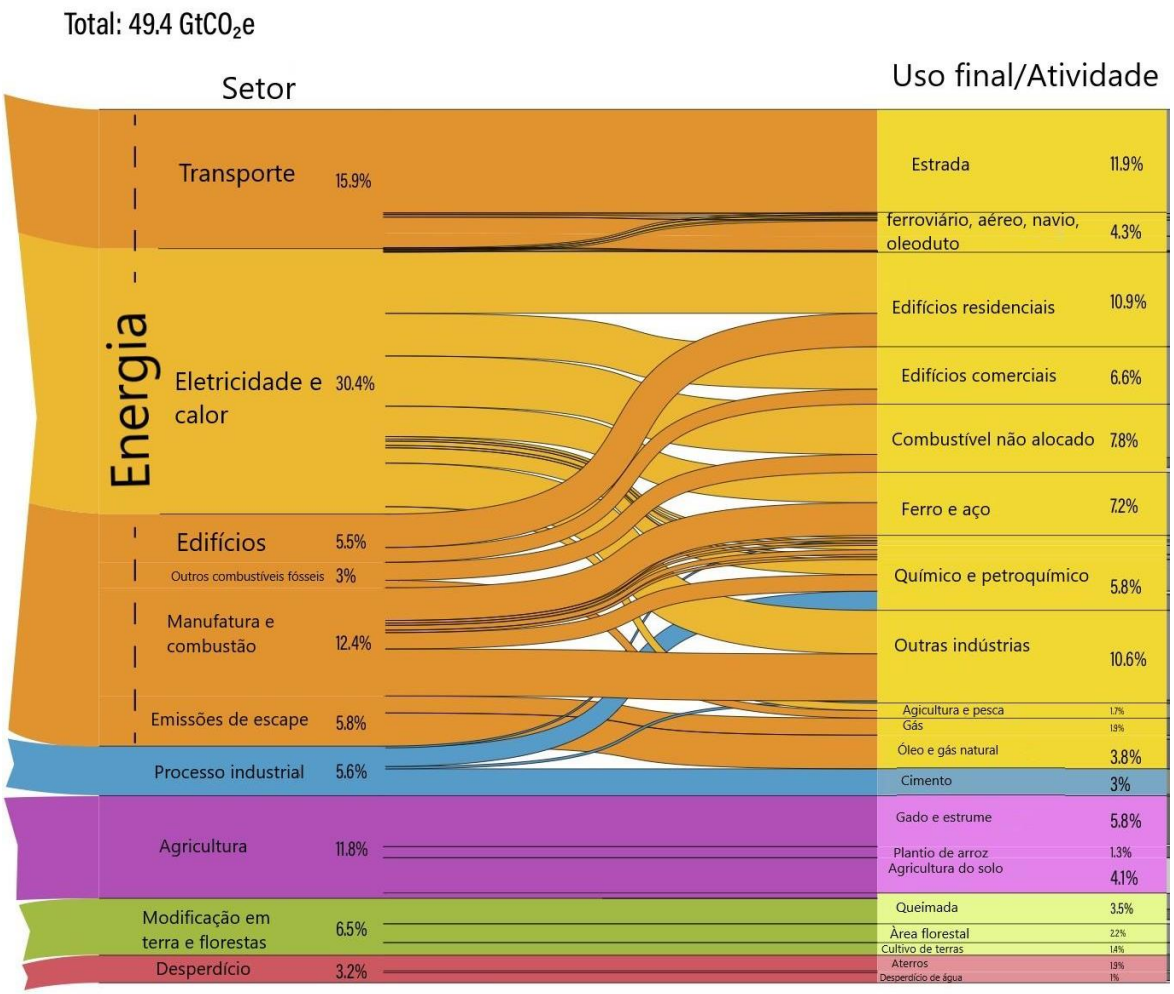
Em face às estratégias descritas e no aspecto de eletrificação tem-se, segundo Pinto (2018), uma projeção de aumento no consumo de energia elétrica alinhado com a preocupação ambiental de carbono zero e, também, a limitação de recursos fósseis para atendimento desta demanda latente.

Segundo IRENA (2019a), estudos estimam que o uso de eletricidade aumentará em cerca de 60% até 2040 quando comparado ao ano de 2019, com a tendência de participação ativa das fontes renováveis, em especial a solar e a eólica, para suprimento desta energia.

Alinhado à tendência de crescimento, torna-se necessário discutir a expansão da eletricidade sob a perspectiva ambiental. De acordo com Colburn et al. (2013), o setor elétrico corresponde a cerca de 50% da emissão do dióxido de enxofre (SO2) e aproximadamente 30% de óxidos de nitrogênio (NOX), a combinação entre estes dois elementos podem contribuir com a acidez e poluição. Além disso, o setor também emite em torno de 40% do dióxido de carbono, principal responsável pelo aquecimento global.

A Figura 2 ilustra a avaliação acerca do impacto do setor elétrico na busca por uma economia de zero carbono. Demonstrando, assim, a porcentagem de emissão carbono do setor e sua representatividade de 30.4% do total no ano de 2016, com a subdivisão dos dados por segmento em que originou tais emissões, como prédios, residências, indústrias, conforme exemplificado abaixo.

Figura 2 - Emissões mundiais de gases do efeito estufa em 2016



Fonte: Adaptado de WRI (2021).

Por meio dos dados apresentados na Figura 2, tem-se que o setor de eletricidade e calor foi responsável por 30,4% do total de GEEs no ano de 2016, com os setores de transporte, edifícios, manufatura e combustão, emissões de escape, processo industrial, agricultura, modificação em terras e flores e, também, emissões por desperdícios como responsáveis pelos complementos de 69,9%.

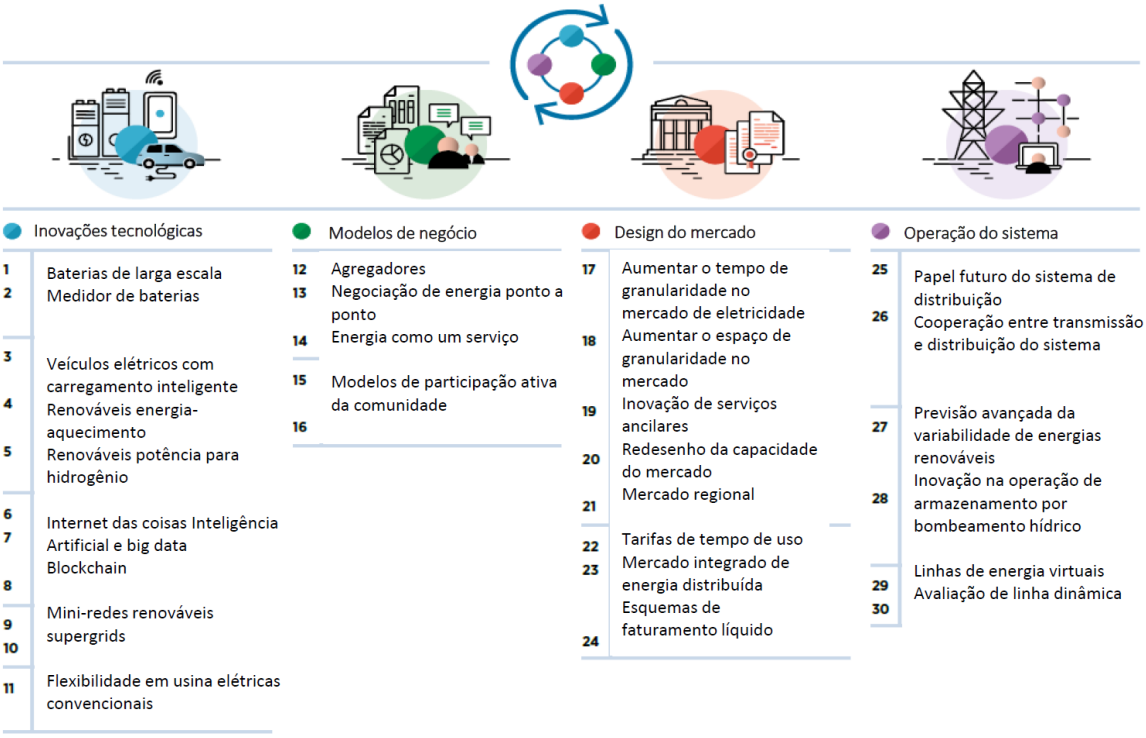
A Figura 2 também mostra o uso final e as atividades envolvidas na emissão do setor, com o setor de eletricidade e calor envolvendo: edifícios residenciais (10,9%), edifícios comerciais (6,6%), combustíveis não alocados (7,8%), ferro e aço (7,2%), químico e petroquímico (5,8%), outras indústrias (10,6%) e agricultura e pesca (1,7%).

Como um dos protagonistas na emissão de gases, confirma-se a representatividade do setor elétrico para com os objetivos ambientais. Colburn et al. (2013) dissertam sobre o foco na

expansão da energia elétrica centrada em fontes de baixo carbono para atingir-se a descarbonização da matriz energética e redução da poluição local.

Em concordância com a análise PEST da matriz energética levantado por CISL e da significância do setor elétrico, IRENA (2019a) compila iniciativas voltadas para união entre flexibilidade, eletrificação e eficiência energética, disposto na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Cenários de transformações do setor elétrico



Fonte: Adaptado de IRENA (2019a).

Por intermédio dos dados apresentados na Figura 3 em relação às inovações tecnológicas, modelos de negócios, design de mercado e operação do sistema elétrico, o presente estudo tem maior direcionamento em relação aos tópicos de energias renováveis, no que quesito inovação e previsão da variabilidade para operação do sistema.

Em relação à energia renovável, Colburn et al. (2013) acrescentam, também, sobre os discursos da Conferência Global de Sistemas renováveis integrados, em que o diretor da Agência Internacional de Energia pontuou as fontes solar e eólica como o pilar crucial para resposta aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável do setor energético.

A fim de modelar a participação das fontes renováveis e fósseis no futuro dado às ações traçadas para enfrentamento das mudanças climáticas, a Agência Internacional de Energia

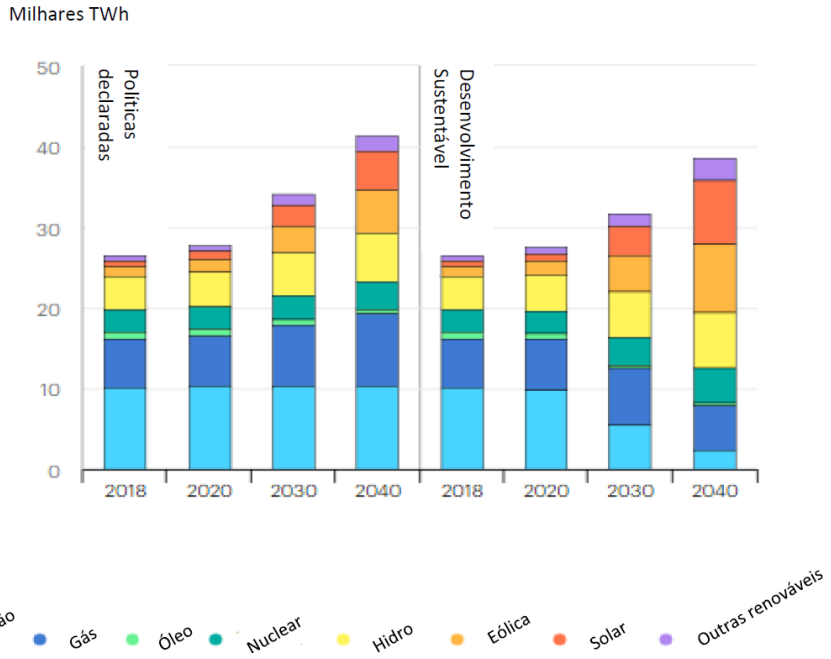
(IEA) apresenta dois cenários futuros: o cenário de políticas declaradas (STEPS) e o cenário de desenvolvimento sustentável (SDS).

De acordo com Carvalho et al. (2011), a análise de cenários busca modelar visões estruturadas de situações que possam ocorrer no futuro, considerando possibilidades e incertezas por meio de premissas.

IEA (2021) define o cenário STEPS como projeções considerando as ambições políticas atuais, considerando ações e ideais já anunciados pelas nações. Enquanto o cenário SDS mapeia ações de maneira a cumprir totalmente as metas de energia sustentável, traçando um caminho totalmente ligado ao Acordo de Paris buscando manter o aumento da temperatura abaixo de 2ºC com esforços a limitá-lo em 1,5ºC.

De maneira a avaliar o mix de energias previstas para os dois cenários, a Figura 4 apresenta a projeção de inserção de fontes renováveis e fósseis entre 2018 a 2040.

Figura 4 - Projeções da geração de energia por fonte e cenário



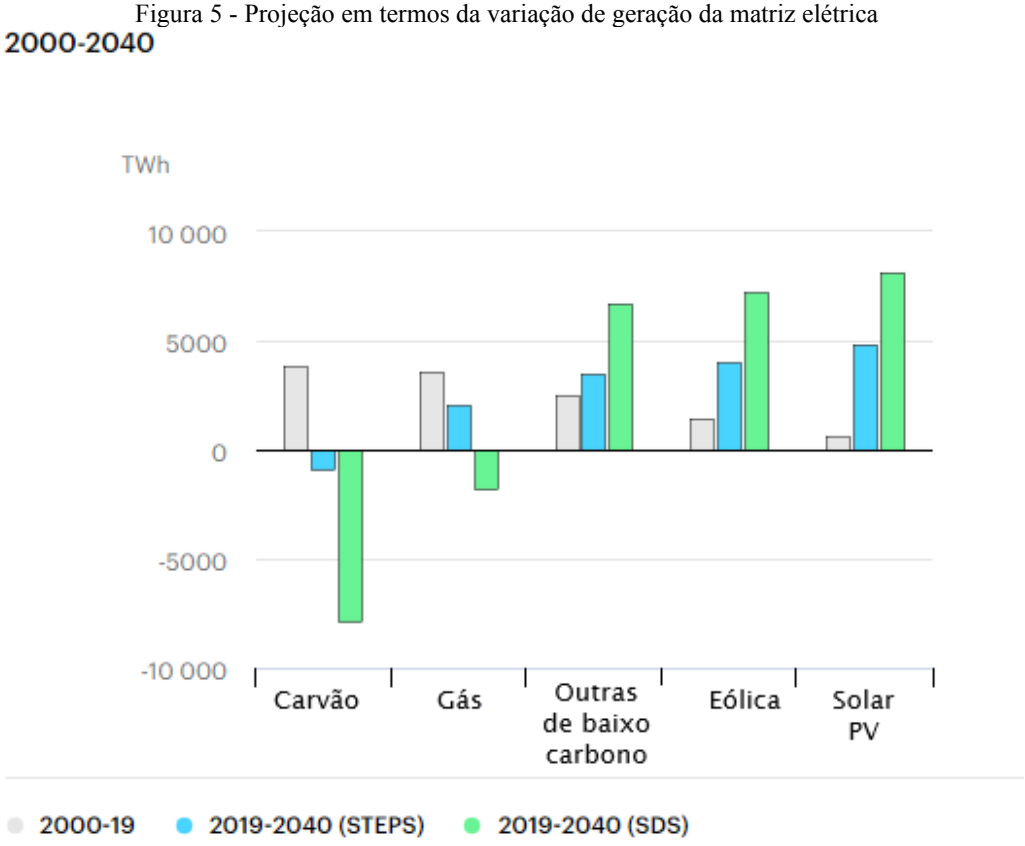
Fonte: Adaptado de IEA (2021).

Através das projeções dos cenários, é possível observar o crescimento da fonte eólica e solar nos dois cenários, com maior representatividade destas no cenário de desenvolvimento econômico, o que atrela as fontes incentivadas a busca por uma economia de zero carbono.

Outro aspecto a ser considerado, é em relação a utilização do carvão, expressivo no primeiro cenário apresentado, mas com possibilidade de ser substituído pelas fontes eólica e solar no segundo cenário.

Para visualizar a porcentagem de crescimento e decréscimo das fontes fósseis e renováveis, a Figura 5 demonstra as projeções do mix elétrico em termos percentuais no que refere a variação da utilização da mesma, apresentando a diferença observada entre 2000 e 2019, e a modelagem para os dois cenários de 2019 a 2040.

Figura 5 - Projeção em termos da variação de geração da matriz elétrica



Fonte: Adaptado de IEA (2021).

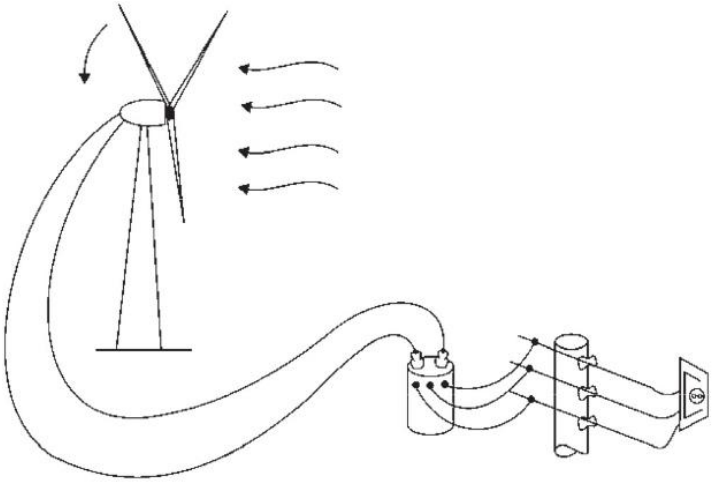
De tal maneira, frente a Figura 4 e 5, tem-se projeções alinhadas à diminuição do carvão e ao aumento das fontes renováveis e de carbono zero, com divergência na variação de gás, o qual aumenta no primeiro cenário e diminui no SDS.

A energia elétrica gerada por usinas eólicas e solares se mostram como protagonistas na transição energética atual, como denotado pelas Figuras 4 e 5. Assim, alinhado aos objetivos de eletrificação, flexibilidade e eficiência energética por meio de ações voltadas à previsão da variação das fontes renováveis, o estudo tem como foco a fonte eólica.

2.1 CARACTERÍSTICA DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica, segundo Capelli (2013), é produzida por meio da transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica. A conversão entre energia cinética em elétrica ocorre por meio de um aerogerador, acoplado a pás, que giram na presença de ventos, conforme ilustrado na Figura 6 abaixo.

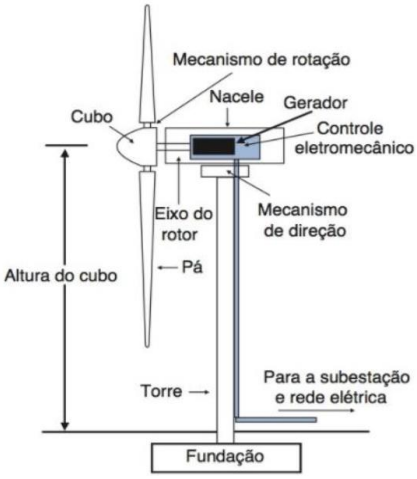
Figura 6 - Esquema do funcionamento da geração de energia eólica



Fonte: Capelli (2013).

Dado o funcionamento do sistema eólico ilustrado na Figura 6, Jesus (2018) descreve que o aerogerador eólico é constituído por uma série de componentes a fim de captar a energia cinética contida no vento, converter a energia cinética em mecânica e transformar a energia elétrica. De tal maneira, a Figura 7 exprime de forma detalhada os componentes presentes no aerogerador eólico.

Figura 7 - Componentes do aerogerador

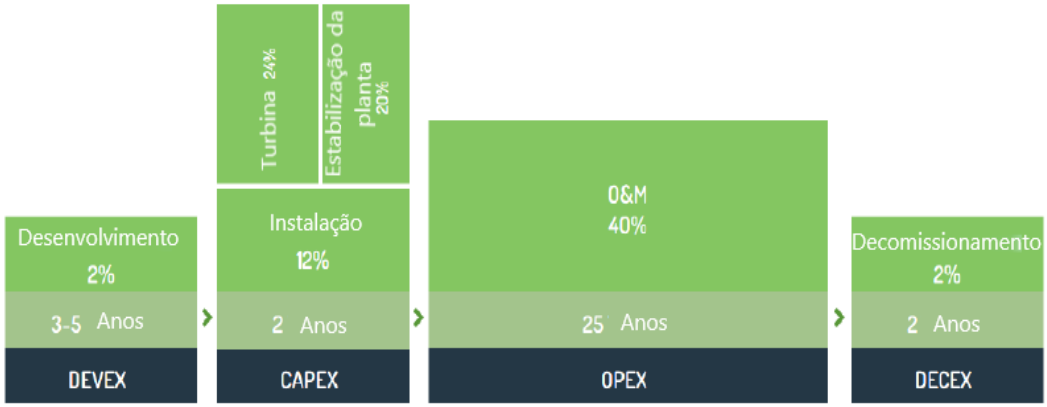


Fonte: Jesus (2018).

Assim, para utilização dos recursos eólicos para geração de energia, Santos (2013) discute a dependência de diversos fatores que predizem a viabilidade econômica e as características operacionais do sistema eólico.

O projeto do sistema eólico, segundo o relatório Roadmap (2020), possui etapas relacionadas ao planejamento, implementação, operação e descomissionamento. A Figura 8 apresenta as etapas dos projetos com porcentagem do investimento total para implementação e o tempo médio de duração.

Figura 8 - Divisão de custos e ciclo de vida do projeto eólico



Fonte: Adaptado de Roadmap (2020).

Futuren (2021) discute sobre o funcionamento das etapas descritas na Figura 8, com a primeira parte de prospecção por meio da busca por um local adequado a instalação e avaliação das partes interessadas, com o desenvolvimento com duração de 3 a 5 anos envolvendo duas fases: a conclusão dos estudos e a autorização do projeto.

E, acerca das demais etapas por Futuren (2021) e mediante a Figura 8, tem-se a conclusão voltada para inserção do parque eólico e instalação dos aerogeradores e fundação da planta com cerca de 2 anos, a operação com busca por ajustes a fim de otimizar a geração com cerca de 25 anos e o fim do ciclo, em que se avalia o funcionamento com novas aerogeradores ou a desmontagem, com tempo médio de 2 anos.

A etapa de desenvolvimento, de acordo com Futuren (2021), envolve o estudo de impacto da instalação frente ao local, a avaliação do potencial eólico por meio de medição de condições dos ventos no que concerne a velocidade, direção e frequência, além de analisar as turbulências que pode provocar envelhecimento prematuro da instalação.

Futuren (2021) ainda acrescenta estudos técnicos para escolha dos aerogeradores adequadas, análise das ligações e transmissões elétricas. Em termos da segunda fase de

autorização, é citado a relação entre moradores locais, diálogos ambientais e, por fim, a obtenção da licença para construção.

Para o estudo de viabilidade, segundo Santos (2013). o dimensionamento da variação de velocidade pode ser avaliado anualmente como forma de analisar o fornecimento do conhecimento regional dos ventos, já para estudos estruturais utiliza-se de avaliações em prazos de curta duração, que ocorrem em segundos como turbulências e rajadas.

Em relação ao comportamento do vento tem-se, de acordo com Silva (2003), as variações ditas sazonais, em que a circulação da atmosfera provoca variações significativas da velocidade e direção do vento ao longo do ano como, por exemplo, a tendência de diminuição da intensidade dos ventos nos meses de fevereiro e março em contraponto à tendência de intensidade e constância notável nos meses de agosto e setembro.

Silva (2003), também pontua acerca das variações rápidas, que afetam determinadas áreas localizadas podendo variar de dias a segundos, tais variações afetam diretamente o comportamento operacional e a vida útil dos aerogeradores eólicas. Discutindo, também, acerca das variações diurnas relacionadas a temperatura com variações bruscas e fortes sendo que, no Nordeste, são ocasionadas principalmente por brisas marítimas e terrestres.

Assim, a fim de realizar o estudo alinhado com a etapa de desenvolvimento foi construída a Tabela 1, a qual apresenta os fatores que influenciam na definição de velocidade, condições ambientais e potência.

Tabela 1 - Equações relacionadas a operação de uma usina eólica

Variável	Equação		Legenda
Lei logarítmica de velocidade	$V = V_{ref} * \frac{\ln(\frac{z}{z_o})}{\ln(\frac{z_{ref}}{z_o})}$	(Eq. 1)	Onde: V - velocidade do vento (m/s) Vref - velocidade do vento observada em determinada altura de referência [m/s] z - altura para qual a velocidade do vento será extrapolada verticalmente [m/s] zref - altura de referência [m] z0 - fator de rugosidade de superfície aparente
Densidade do ar em função da altitude e temperatura local	$\rho = \frac{352{,}98 * \left[(1 - \frac{z}{45271})\right]^{5{,}2624}}{273{,}15 + T}$	(Eq. 2)	Onde: ρ – densidade do ar [kg/m3] z – altitude em relação ao nível do mar [m] T – Temperatura do ar [oC]
Função densidade Distribuição de Weibull	$p(V) = (\frac{k}{c})(\frac{V}{c})^{k-1} exp^{\left[-(\frac{V}{c})^k\right]}$	(Eq. 3)	Onde: p(V) - probabilidade de ocorrência da velocidade do vento V c - fator de escala [m/s] k - fator de forma (adimensional positivo)
Potência da turbina eólica	$P_{máx} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot Cp \cdot Eg$	(Eq. 4)	Onde: P - Potência [W]; ρ - Densidade do ar [kg/m³]; A - Área varrida pelas pás do rotor [m²]; V - Velocidade do vento [m/s]; O coeficiente de performance Cp - fração de energia eólica captada pelas pás do rotor, no geral variam entre 0,3 a 0,5, sendo aproximadamente 0,40 Eg - a eficiência do gerador, variando entre 0,93 a 0,98

Fonte: Elaboração da autora a partir de Nunes (2020) e Silva et al. (2017).

Para definição do coeficiente de rugosidade (z0), presente na Equação 1, pode-se utilizar uma tabela padrão conforme o Atlas Eólico Europeu, expresso na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de rugosidade

Classe de Rugosidade	Comprimento de Rugosidade (m)	Descrição da Paisagem
0	0,0002	Superfície do mar
0,5	0,0024	Terreno com a superfície plana, aberto, como aeroportos, grama cortada, etc.
1	0,03	Área agrícola aberta, sem fendas e cercas e construções dispersas
1,5	0,055	Área agrícola com algumas casas e cercas com até 8 m de altura, com uma distância de até 1250 m
2	0,1	Área agrícola com algumas casas e cercas com até 8 m de altura, com uma distância de até 500 m
2,5	0,2	Área agrícola com muitas casas, plantas e arbustos, ou cercas de até 8 m de altura, com distância de até 800 m
3	0,4	Vilas, cidades pequenas, áreas agrícolas com cercas altas, florestas e terrenos irregulares e com rugosidade
3,5	0,8	Grandes cidades com edifícios altos
4	1,6	Cidades muito grandes com edifícios altos e arranhacéus

Fonte: Santos (2013).

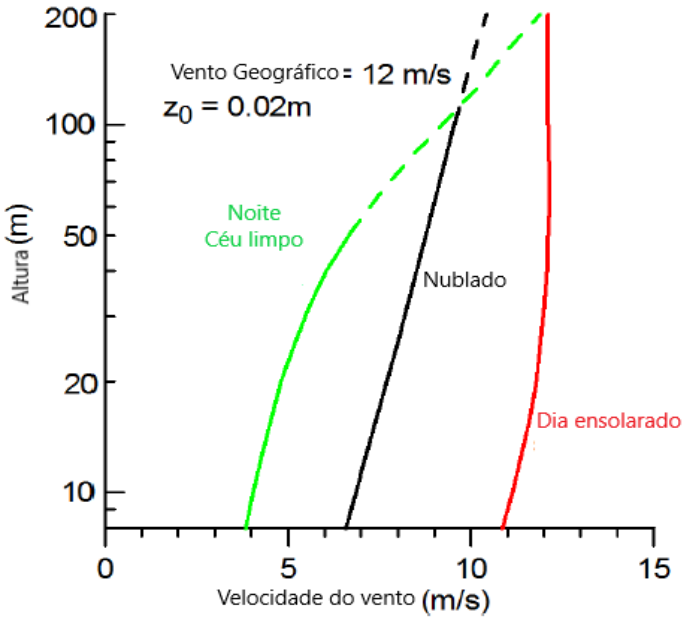
Em ambiente marítimo, o fator de rugosidade aparente, z0, depende da velocidade do vento, da distância à terra, da profundidade marítima e do espectro de ondas no mar. Para áreas marítimas, z0 varia entre 0,0001 metro em mar aberto e calmo (sem ondas) e 0,003 metro em áreas próximas à costa, onde há confluência de ventos *onshore* e *offshore*. (DNV, 2010).

Já para definição das escalas de formas, presente na distribuição Weibull (Equação 3), tem-se, segundo Filho (2013), o parâmetro de forma “k” relacionado a inclinação da distribuição indicando efeitos no comportamento da curva, enquanto o parâmetro de escala “c” influencia no valor de pico da curva de distribuição.

Filho (2013) complementa que existem vários métodos para estimar os parâmetros “k” e “c” da distribuição a partir de dados pré-determinados, como: o método gráfico, o método da máxima verossimilhança, o método padrão de fator de energia, o método dos momentos e o método empírico.

De face das fórmulas para cálculo do comportamento da velocidade e dos parâmetros que interferem no sistema eólico, a Figura 9 ilustra a relação entre velocidade dos ventos e altura dos aerogeradores, com diferenciação entre os parâmetros do tempo como dia, noite e nublado e um valor arbitrário de rugosidade.

Figura 9 - Velocidade do vento x altura



Fonte: Gryning (2021).

Por meio da Tabela 1 e da Figura 9, pode-se citar alguns fatores a serem considerados na modelagem da potência de um sistema eólico:

(i) a altura, dado que maiores velocidades são observadas acima do solo;

(ii) as diferenças entre horários do dia; e

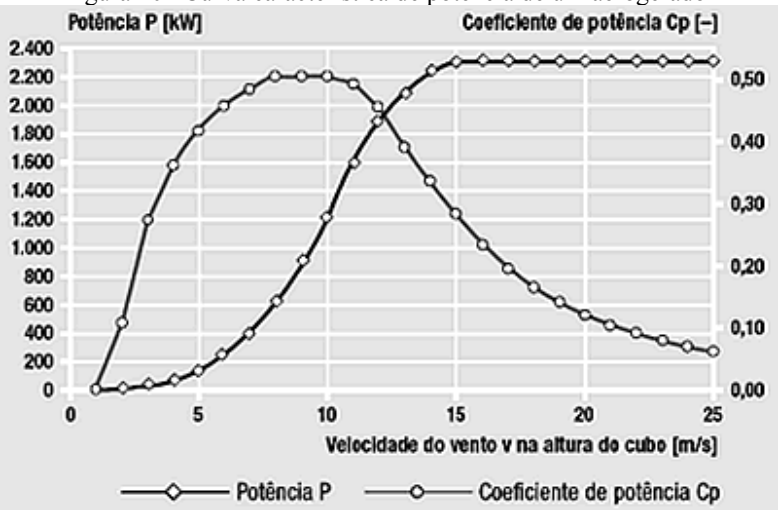
(iii) a eficiência.

O valor do coeficiente da eficiência aerodinâmica do vento (Cp), presente na Equação 4 da Tabela 1 exprime, de acordo com Pinto (2018), a relação entre a energia útil obtida e a energia total consumida, sendo que pelo limite de Betz a conversão da energia dos ventos no aerogerador eólico tem o limite máximo de 59,3%.

Segundo Santos (2013), outro aspecto importante para a avaliação é analisar a direção dos ventos, a variável interfere na geração de energia, uma vez que modifica o comportamento da velocidade do vento captada pelos aerogeradores. Werapun et al. (2017) discute que a utilização de um coeficiente de extrapolação vertical (alfa) padrão de 0,143 pode induzir erros de até 35% em velocidade do vento, quando extrapolado de 65m para 120 m.

A Figura 10 exprime o comportamento do comportamento da potência do aerogerador dado a velocidade do vento e o fator de capacidade Cp. Para velocidades do vento superiores à nominal, em muitas máquinas, a potência permanece constante até uma velocidade de corte superior, na qual a máquina deve sair automaticamente de operação para evitar que sofra danos estruturais. (CRESESB, 2022).

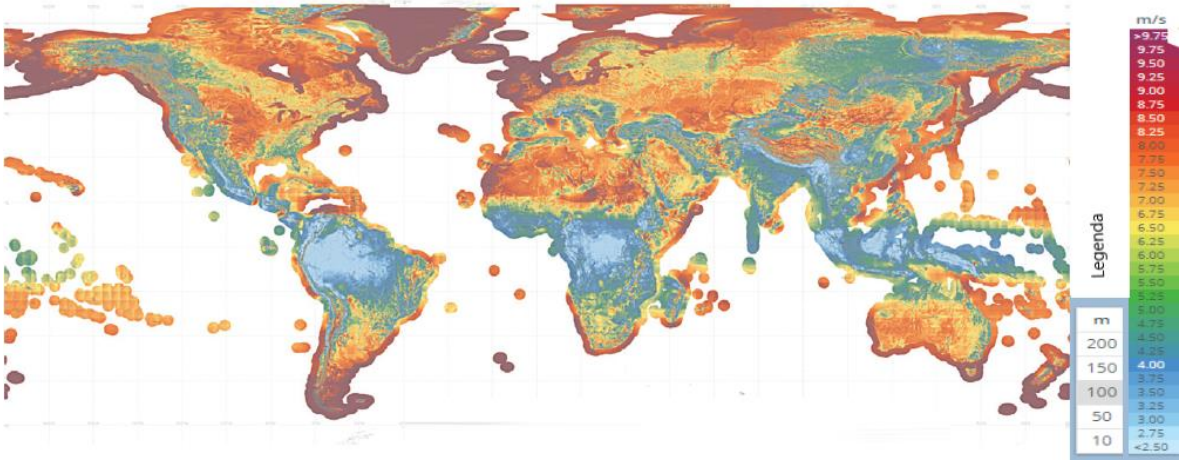
Figura 10– Curva característica de potência de um aerogerador



Fonte: Cresesb (2022)

Mediante aos fatores e aos aspectos que influenciam na geração eólica e o comportamento da curva de potência dado a variável velocidade e capacidade tem-se, então, a localização como um fator chave para inserção do sistema. Energy Data (2021) disponibiliza o mapa com velocidades médias anuais dos ventos em todo o mundo, conforme descrito na Figura 11.

Figura 11 - Velocidade média dos ventos no planeta (m/s)



Fonte: Energy Data (2021)

Por intermédio do mapeamento das regiões e localidades expressas na Figura 10, visualiza-se as maiores velocidades localizadas no mar (*offshore*). De acordo com EDP (2021), energia eólica *offshore* refere-se à produção de eletricidade no mar, sendo possível implementar fundações em águas terrestres, como lagos ou áreas costeiras.

Em face a possibilidade de geração de energia eólica no mar, Roadmap (2020) compara a *offshore* com a produção em terra firme citando que apesar da energia eólica *offshore* se encontrar com custos mais altos quando comparada com a *onshore*, os aerogeradores *offshore*

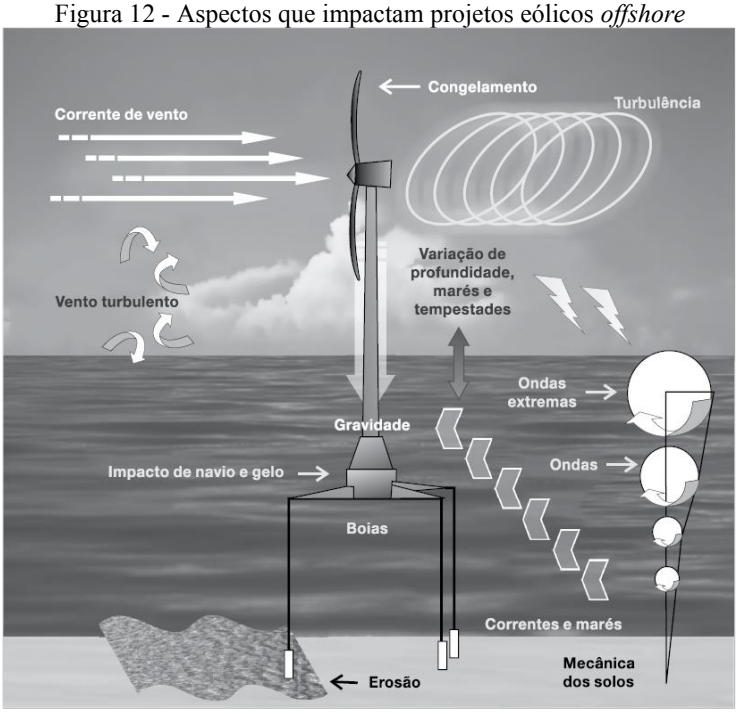
geram cerca de até 50% a mais de energia elétrica, entretanto, a tecnologia *offshore* ainda não está tão desenvolvida.

Gryning (2021) enumera aspectos que envolvem o projeto para implantação de sistemas eólicos *offshore*, tais como: distância da fundação à terra, profundidade e propriedades do leito do mar, rotas de navegação, ligação à rede, recursos eólicos e o impacto ambiental na vida marinha.

Santos (2013) complementa que as condições para viabilizar projetos *offshore*, são a existência de baixa profundidade e proximidade da costa, para países e como Europa, China e Estados Unidos, em que os aproveitamentos eólicos se situam entre 1 a 30 km da costa, a uma profundidade de cerca de 10 metros.

Em concordância com as equações para potência eólica, a Figura 12, demonstra, de forma visual, os aspectos e fatores envolvidos para modelagem da velocidade do vento e potência de usinas eólicas *offshore*. Como principais aspectos destacam-se: corrente de vento, congelamento dos aerogeradores, turbulências do ambiente, turbulência do vento, variação das marés e tempestades, além das correntes marítimas, ondas, mecânica do solo e erosão.

Figura 12 - Aspectos que impactam projetos eólicos *offshore*



Fonte: Santos (2013).

Por meio das características do sistema de geração *offshore*, Barreto (2019) exprime que inicialmente foram realizadas adaptações nos aerogeradores *onshore* e que, com o passar

do tempo, foi necessário desenvolver projetos específicos para instalações *offshore* devido ao ambiente da fundação, conforme expresso na Figura 11.

Segundo Barreto (2019), uma das principais diferenças entre aerogeradores *onshore* e *offshore* refere-se às suas dimensões, dado que aerogeradores *offshore* são maiores e com maior potência. A Tabela 3, a seguir, apresenta os principais fornecedores de aerogeradores, apresentando características relacionadas ao dimensionamento do produto.

Tabela 3 - Principais fornecedores de aerogeradores eólicos *offshore*

Empresa	Nome	Potência	Pá	Diâmetro
Samsung	S7.0	7MW	85m	
MHI	MHI SeaAngel	7MW		167m
MHI Vestas	V164	8 a 10 MW	80m	164m
Adwen	AD-180	8MW	88,4m	180m
Siemens-Gamesa	SWT-8.0-154	8MW		154m
Enercon	E-126	7.5MW		127m
Ming Yang	SCD (2 pás)	6.0MW		140m
Obs.: Projeto lançado em 2014 SCD 8MW e 168m de diâmetro				
Senvion	Senvion 6.2M152	6.15MW		152m
GE	Haliade 6MW	6MW		150.8m
Sinovel	SL600	6MW		155m
Hyunday	Dongfang	5.5MW	68m	
Adwen	AD5-135	5MW		135m
Alstom	Haliade 150	6MW	73m	

Fonte: Barreto (2019).

Por intermédio da Tabela 3, tem-se a potência total dos aerogeradores para usinas eólicas *offshore* variando de 5 MW a 10MW. Além disso, Barreto (2019) discute que o desenvolvimento das tecnologias ainda é recente, com pesquisas no setor eólico *offshore* para adequação ao uso marítimo, o que pode ser notado pela concentração de fornecedores expressos na Tabela 3.

2.2 DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO MUNDO

A geração de energia eólica, segundo Araújo e Willcox (2018), apresentou crescimento expressivo a partir da década de 1970 com geração de eletricidade em maior escala. Tal expansão foi alinhada ao desenvolvimento tecnológico e científico dos aerogeradores, com os pioneiros sendo a Alemanha, a Dinamarca, os Estados Unidos e a Espanha e, em uma escala recente, a China e a Índia.

Neste contexto, a energia eólica *offshore*, segundo Pinto (2019), teve seu primeiro parque na Dinamarca, em 1991, apesar de não ser um parque robusto foi possível observar uma produção mais eficiente quando comparada a geração em terra.

Pinto (2018) complementa que, desde então, observa-se uma evolução de sistemas eólicos *offshore* com implementação de parques, como na Europa, principalmente no Reino Unido, Bélgica, Holanda, Alemanha e Dinamarca, na Ásia, nos Estados Unidos e na China.

Alinhado a recente inserção das usinas fora da terra, IRENA (2019b) argumenta que a energia eólica *offshore* pode ser considerada uma das energias renováveis emergentes que amadureceu nos últimos dois a três anos como uma consequência de melhorias tecnológicas, eficiência dos aerogeradores além de reduções de custos.

Em concordância com ações para atingir a economia de zero carbono tem-se, de acordo com IRENA (2019b), a energia eólica *offshore* como alternativa complementar à *onshore* no que diz respeito à seguridade energética. Além disso, IRENA (2019b) prevê crescimento significativo em cerca de dez vezes, passando de uma potência instalada de 23 GW em 2018 para 228 GW em 2020, e para 1000 GW em 2050.

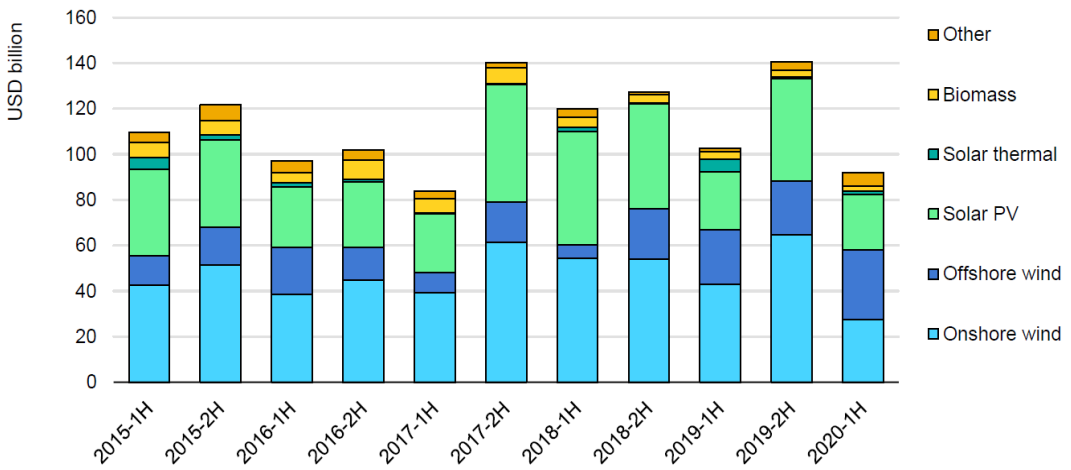
No relatório da IEA (2020) foi abordado os impactos da epidemia do coronavírus nos projetos de diversificação e renovabilidade das fontes elétricas, com projeções de diminuição das adições líquidas em 13% entre 2019 a 2020 como reflexo de atrasos em construções dada às medidas de bloqueio.

Apesar de tal cenário, o IEA (2020) discute a resiliência das fontes *offshore* frente a situação do mundo, com projetos dentro do prazo e sem variações, uma vez que os parques já estão financiados e em construção.

Com o intuito de visualizar os investimentos das fontes ao longo do tempo e mediante ao cenário da pandemia, observa-se na Figura 13, a decisão final de investimento (FID), a qual refere a última etapa de investimento para início da construção de uma usina renovável, entre 2015 a 2020 por semestre.

Por meio da Figura 13, observa-se variações nos investimentos em renováveis como solar e eólica *onshore*, ao longo dos anos. Sob a ótica de eólicas *offshore* tem-se uma expansão no investimento a partir do segundo semestre de 2018, com o pico em 2020, o que ilustra a resiliência e a recente inserção e projeção do parque no mundo.

Figura 13 - Investimentos finais em usinas renováveis entre 2015 a 2020

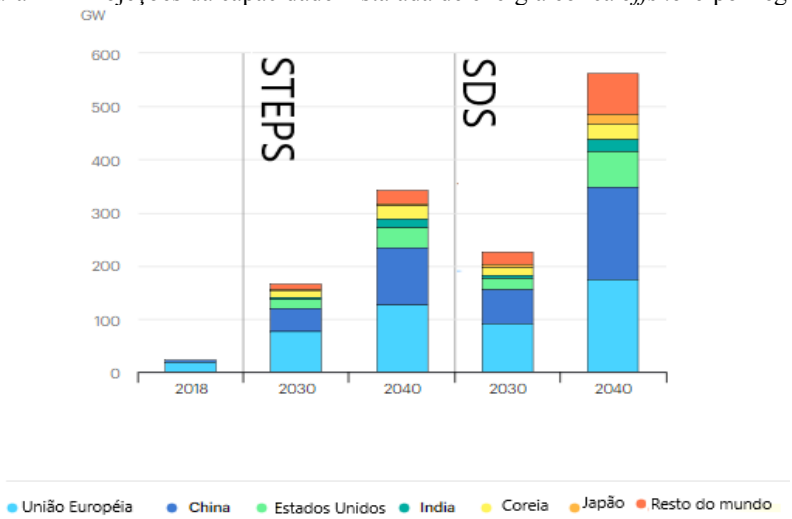


Fonte: IEA (2021).

Concomitantemente, com a situação atual dos parques eólicos *offshore*, IEA (2020) disserta sobre a perspectiva de aumento nas adições anuais do sistema para além dos locais com instalações já construídas. Para tal crescimento acelerado, torna-se necessário uma atenção política, a fim de garantir a integração segura e econômica ao setor elétrico.

Com o intuito de avaliar as perspectivas de instalação de capacidade eólica em diferentes localidades, a Figura 14 apresenta os dados observados em 2018 e as projeções dos cenários STEPS e SDS da fonte eólica *offshore* para os anos de 2030 e 2040.

Figura 14 - Projeções da capacidade instalada de energia eólica *offshore* por região



Fonte: IEA (2021).

Ao avaliar os dois cenários exemplificados na Figura 14, percebe-se a representatividade da União Europeia, da China, dos Estados Unidos e do Japão na expansão das usinas eólicas *offshore*. Outro ponto a ser avaliado concerne a projeção do cenário de

desenvolvimento sustentável com expressiva expansão de parques *offshore* das demais localidades apresentadas.

2.3 PERSPECTIVAS DA ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO BRASIL

De acordo com Pinto (2019), o Brasil tem cada vez mais ampliando o parque de energia eólica *onshore*. Tal afirmação pode ser comprovada por meio dos dados de geração elétrica expressos por ANEEL (2021), em que a fonte eólica se mostrou a terceira maior em termos de capacidade instalada com 9,88% do total no ano de 2020, em contraponto a 58,35% das hidrelétricas e 25,19% das usinas térmicas. Logo, se destacando como a segunda maior fonte de energia renovável brasileira.

Em termos de geração fora da terra, de acordo com UDOP (2021), o país ainda não possui parques eólicos *offshore*. Entretanto, UDOP (2021) relata que dados levantados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) demonstraram um potencial de 700 GW em eólicas *offshore* em até 50 metros, o que corresponde a quatro vezes a capacidade de geração do setor elétrico do país atualmente.

De acordo com Miguel (2016), pesquisas realizadas por Ortiz e Kampel sobre o potencial eólico *offshore* foram realizadas para avaliar as características dos ventos brasileiros, entre 1999 e 2009 em uma altura de 80 metros, com resultados identificando menores valores na costa do Estado de São Paulo, com 7 m/s valor viável para *onshore*, e maiores valores próxima a costa dos Estados de Sergipe e Alagoa, com velocidade de 12 m/s.

Em relação aos resultados da pesquisa de Ortiz e Kampel acerca do potencial eólico *offshore* brasileiro, EPE (2019) exemplifica os resultados com base no potencial eólico considerando a distância da costa nacional, conforme exemplificado na Tabela 4 e, também, o potencial eólico em termos de profundidade das águas brasileiras, conforme expresso pela Tabela 5.

Tabela 4 - Potencial eólico *offshore* por distância da costa brasileira

Distância da Costa	Potencial (GW)
0 - 10 km	57
0 - 50 km	259
0 - 100 km	514
0 - 200 mi (ZEE)46	1.780

Fonte: EPE (2019).

Tabela 5 - Potencial eólico *offshore* em termos do intervalo batimétrico da costa brasileira

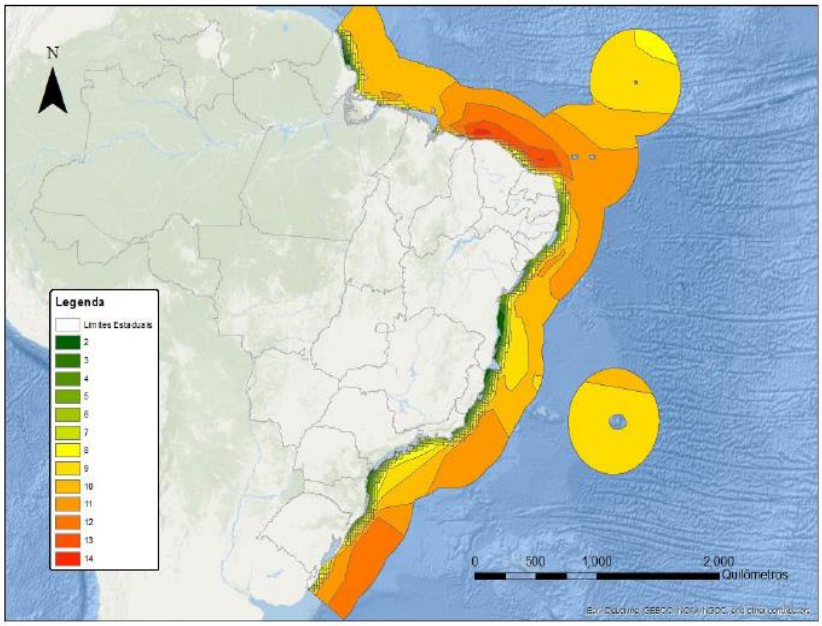
Intervalo batimétrico	Potencial (GW)
0 - 20 m	176
0 - 50 m	399
0 - 100 m	606

Fonte: EPE (2019).

Segundo EPE (2019), nesta pesquisa inicial acerca da velocidade média da costa brasileira não foram levantadas questões socioambientais relacionadas às áreas potencialmente sensíveis com alguma restrição referente a ambiente físico, biológico ou socioeconômico.

Para tanto, foi mapeado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a velocidade média potencial para eólica *offshore* considerando tais aspectos socioambientais, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Campo de vento médio no Atlântico Sudoeste considerando restrições socioambientais



Fonte: EPE (2019).

Em estudos iniciais apresentado em Roadmap (2020), obteve-se resultados que indicaram os ventos do litoral do nordeste com maior estabilidade quando comparado aos demais e, mesmo em locais onde o recurso tem maior variabilidade como no Rio Grande do Sul, obteve-se uma velocidade relativamente alta e uma alta permanência em ventos acima de 3,5 m/s.

Diante do expressivo potencial eólico *offshore* do país e dos indicadores de velocidade média expressos, o relatório Roadmap (2020) apresentou a projeção do fator de capacidade por região, conforme apresentado na Tabela 6, denotando características promissoras do vento para implantação de parques eólicos *offshore* no Brasil.

O fator de capacidade, segundo Rodmap (2020), consiste em uma forma de avaliar o potencial eólico da região, tendo como objetivo calcular o percentual de aproveitamento, efetivo ou estimado, do total da potência máxima instalada.

Tabela 6 - Fator de capacidade energia eólica *offshore* para região e faixa de velocidade avaliada na pesquisa

Faixa de Velocidade (m/s)	Fator de Capacidade			
	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul
6,0 - 6,5	22%	23%	22%	23%
6,5 - 7,0	25%	30%	32%	31%
7,0 - 7,5	32%	37%	38%	37%
7,5 - 8,0	36%	42%	43%	43%
8,0 - 8,5	40%	46%	47%	46%
8,5 - 9,0	47%	54%	49%	49%
9,0 - 9,5	53%	62%	53%	53%
9,5 - 10,0	56%	65%	56%	56%
≥ 10,0	59%	68%	59%	59%

Fonte: Roadmap (2020).

De face aos fatores de carga dos projetos *offshore* presente na Tabela 8, nota-se percentuais acima da média e do máximo de fator atingido pela eólica *onshore* no ano de 2019, que corresponderam a 43% e 60%, respectivamente.

No que tange às características de velocidade e eficiência na produção de energia por meio de parques eólicos *offshore*, Hodge (2018) pontua a necessidade de avaliação da velocidade de corte do sistema, velocidade em que a eficiência (Eg) é constante e, por conseguinte, onde ocorre a extração da potência máxima dos ventos pelo aerogerador. Velocidade acima pode danificar o sistema e, abaixo, a usina não opera maximizando sua produção.

Dado o potencial brasileiro e as condições do fator de capacidade, UDOP (2021) apresenta a perspectiva de empresas do setor elétrico brasileiro, que pontuaram a inserção do sistema a longo prazo dado o longo caminho para implementação, no que diz respeito à necessidade de regulamentação e diminuição de custos.

Corroborando com tal pontuação, o Relatório Decenal divulgado pela EPE (2019) considerou, pela primeira vez, a tecnologia eólica *offshore* como uma das fontes aspirantes à expansão do sistema, a partir de 2027.

No entanto, EPE (2019) discute que os estudos atuais apontaram que a fonte ainda possui custos elevados e, assim, não foi competitiva frente às demais opções para expansão. Apesar de atualmente não ser viável, EPE (2019) completa que estudos técnico-econômicos e socioambientais estão sendo realizados o que pode alterar a competitividade e permitir o aproveitamento eólico *offshore* nas próximas décadas.

Mediante ao setor eólico *offshore* emergente, Ferreira (2019) discute três principais limitações e restrições nacionais para implementação e investimento na tecnologia *offshore*.

- Diminuição de custo considerando a cadeia do setor elétrico de geração, transmissão, distribuição, operação e manutenção do empreendimento, além do custo de capital de financiamento ao longo do projeto (LCOE).
- Planejamento e regulação setorial por meio das instituições regulamentadoras, normativas e de operação, como a EPE, MME e ANEEL.
- Legislação ambiental a fim de definir critérios de impactos da tecnologia.

A fim de desenvolver uma avaliação da fonte eólica *offshore* diante da perspectiva de implementação de parques nacionais, o estudo foca no que concerne ao planejamento estratégico frente às demandas e aos pilares do setor elétrico brasileiro.

De acordo com Ferreira (2019), a geração de usinas eólicas *offshore* alinha-se com a Política Energética Nacional diante do cenário mundial, a qual tem com seis pilares principais: (i) promover e valorizar o mercado energético; (ii) promover e proteger os recursos ambientais; (iii) utilizar fontes alternativas de energia com aproveitamento de insumos e tecnologias aplicáveis; (iv)atrair investimentos para o setor elétrico; (v), fomentar a pesquisa e desenvolvimento de fontes renováveis; e (iv) mitigar os gases do efeito estufa.

Frente a perspectiva da energia elétrica *offshore,* segundo Roadmap (2020), existem seis projetos para implantação de parques eólicos *offshore* no Brasil na fase de licenciamento prévio. UDOP (2021) acrescenta, ainda, potenciais projetos a longo prazo da Petrobras que realizou estudos de mapeamento eólico na região Nordeste e irá mapear a região Sudeste, mas que por hora está investindo em pesquisa e desenvolvimento frente a eólica *offshore*.

O Quadro 1 ilustra os projetos eólicos *offshore* submetidos para avaliação ambiental e licenciamento denotando, assim, um setor em potencial para suprimento da demanda energética.

Quadro 1 - Projetos eólicos *offshore* em fase de licenciamento

Empreendimento	Características
Parque Eólico Offshore Caucaia Parazinho - Iparana	310 MW de Potência Total 1 parque eólico offshore (288 MW) formado por 48 aerogeradores de 6 MW de potência unitária Trecho semioffshore adicional (22 MW) formado por 11 aerogeradores de 2 MW de potência unitária, cada um associado a cada um dos 11 espigões que serão construídos na linha de costa para contenção da erosão causada pelo mar Área do parque eólico offshore = 6.700 ha Canteiro de obras = área no litoral do município de Caucaia 1 subestação marítima coletora Extensão da LT submarina (230 kV) = 4,5 km 1 pátio de transição mar-terra para os cabos Conexão na SE Cauípe Extensão da LT aérea (230 kV) = 25,52 km (alternativa 1) ou 19,89 km (alternativa 2) Ceará Início do licenciamento ambiental: 2016
Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I	400 MW de Potência total 10 parques eólicos (40 MW cada) 50 aerogeradores Potência unitária = 8 MW Área do complexo eólico = 7.224,33 ha Canteiro de obras = retroárea do Porto de Pecém/CE Instalação de uma Base de Operações e Manutenção local às margens do rio Aracati-Acu 1 subestação marítima coletora Extensão da LT submarina (230 kV) = 6.54 km 1 pátio de transição mar-terra para os cabos Conexão na SE Pecém II Extensão da LT aérea (230 kV) = 116.68 km Ceará Início do licenciamento ambiental: 2017
Planta Piloto de Geração Eólica Offshore3	5 MW de potência total 1 aerogerador Potência unitária = 5 MW Conexão via cabos submarinos até uma plataforma de exploração de petróleo (Ubarana 3) Extensão do cabo submarino (34,5 kV) = 1 km Instalação de 1 torre anemométrica a 350 m do aerogerador Rio Grande do Norte Início do licenciamento ambiental: 2018
Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I	3 GW de Potência Total 4 parques eólicos (750 MW cada) 200 aerogeradores Potência unitária = 15 MW Área do complexo eólico = 95.800 ha + 4.980 ha (para os cabos submarinos) Canteiro de obras = local não informado 4 subestações (1 para cada parque) Extensão da LT submarina (220 kV) = variando entre 38,02 km e 51,62 km, conforme o parque eólico 1 pátio de transição mar-terra para os cabos 1 subestação elevadora onshore, distante 2 km do pátio de transição Conexão na SE Pecém II Extensão da LT aérea (500 kV) = 91,4 km Ceará Início de licenciamento ambiental:2019
Complexo Eólico Maravilha	3 GW de Potência Total 4 parques eólicos (750 MW cada) 200 aerogeradores Potência unitária = 15 MW Área do complexo eólico = 77.096 ha + 5.800 ha (para os cabos submarinos) Canteiro de obras = local não informado 4 subestações (1 para cada parque) Extensão da LT submarina (220 kV) = variando entre 49,93 km e 67,13 km, conforme o parque eólico 1 pátio de transição mar-terra para os cabos 1 subestação elevadora onshore, distante 2 km do pátio de transição Conexão na SE Campos II Extensão da LT aérea (500 kV) = 40,05 km Rio de Janeiro Início do licenciamento ambiental: 2019
Complexo Eólico Marítimo Águas Claras	4 parques eólicos (750 MW cada) 200 aerogeradores Potência unitária = 15 MW Área do complexo eólico = 84.220 ha + 4.560 ha (para os cabos submarinos) Canteiro de obras = local não informado 4 subestações (1 para cada parque) Extensão da LT submarina (220 kV) = variando entre 13,85 km e 39,96 km, conforme o parque eólico 1 pátio de transição mar-terra para os cabos 1 subestação elevadora onshore, distante 2 km do pátio de transição Conexão na SE Capivari do Sul Extensão da LT aérea (500 kV) = 58,9 km Rio Grande do Sul Início do licenciamento ambiental: 2019

Fonte: Roadmap (2020).

2.3.1 Setor Elétrico Brasileiro

Em conformidade com o Acordo de Paris, segundo MMA (2021), o Brasil comprometeu-se a reduzir em 37% os níveis de gases do efeito estufa de 2005 até 2025 e cerca de 43% abaixo dos níveis de 2005, até 2030.

De acordo com MMA (2021), o plano para atingir tais metas envolve aumentar a participação de bioenergia em cerca de 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares nas florestas, além da inserção em 45% das energias renováveis na matriz energética brasileira.

Face às estratégias brasileiras, Lucon, Romeiro e Franser (2015) discutem oportunidades para redução dos GEEs voltadas, principalmente, para a utilização de métricas para o carbono como incentivo à eficiência industrial e para a priorização de energias renováveis modernas (eólica e solar) conjuntamente com a avaliação dos desafios acerca de grandes projetos em usinas hidrelétricas.

De acordo com a EPE (2019), apesar de simulações da operação mostrarem que a energia elétrica por meio de fontes renováveis alcançará 91% em 2029, estima-se aumento nas médias de emissões com projeções de 25 MtCO2e em 2020 e 30 MtCO2e em 2029 como reflexo das condições hidrológicas.

Mediante a representatividade das hidrelétricas na matriz elétrica brasileira, EPE (2019) discute que as emissões de GEE podem variar consideravelmente dependendo das condições hidrológicas, uma vez que situações com hidrologia desfavorável levam a necessidade de acionamento de termelétricas.

Devido a esta configuração da matriz elétrica nota-se uma projeção de diversificação do mix de fontes, a fim de minimizar os riscos de suprimento em conjunto com a necessidade da busca por uma economia de zero carbono, de crescimento de fontes incentivadas, como eólica e solar.

Em relação à estruturação do setor elétrico frente a representatividade no cenário energético tem-se, segundo Furtado (2015), mudanças significativas no setor elétrico nas últimas duas décadas, como a liberação do mercado elétrico através da Constituição de 1988, que alterou o papel do Estado no setor.

Através de Tolmasquim (2011) é possível observar que essa reestruturação deu-se através de duas reformas significativas, a de 1990 e a de 2004.

A reforma de 1990, segundo Oliveira (2018), foi impulsionada pelo endividamento do setor elétrico nacional, que teve como consequência a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema (ONS), resultando na privatização das companhias operadoras e na inserção de corrência frente exploração do potencial hídrico nacional.

A Reforma implementada em 2004, a qual definiu parâmetros para o planejamento da operação atual do sistema, de acordo com Tolmasquim (2011), foi realizada devido deficiências na anterior que resultaram na crise de abastecimento em 2001 e teve como base três premissas: a confiabilidade de suprimento, a modicidade tarifária e a universalidade.

Na reforma de 2004, sob a fala de Tolmasquim (2011), um dos pontos abordados e implementados em 2004 foi a retomada de um planejamento setorial com a desverticalização, que implementou dois ambientes de contratação: o Ambiente de Contratação Regulado e o Ambiente de Contratação Livre.

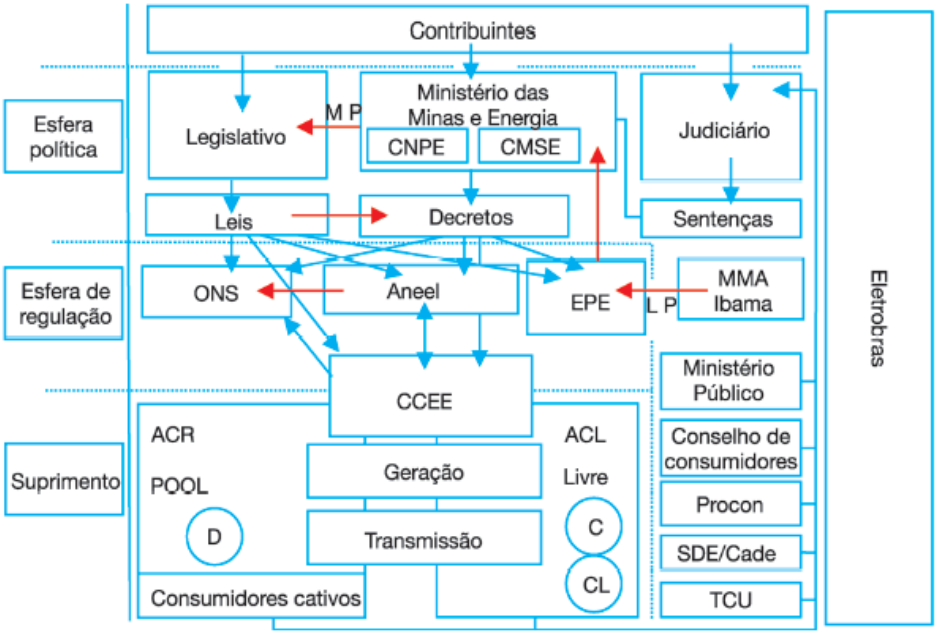
Segundo Oliveira (2018), o ambiente de contratação regulada (ACR) constitui do atendimento das demandas cativas por meio de leilões de energia e tem participação exclusiva de aerogeradoras e distribuidoras. Já o ambiente de contratação livre (ACL), apresenta a possibilidade de contratação de energia pelos consumidores com demanda acima de 500 kW e conta com participação de aerogeradoras, comercializadoras, importadoras e exportadoras de energia.

Com o intuito de entender o funcionamento do setor elétrico brasileiro, a Figura 16 exprime as interligações entre os setores chaves, identificando as esferas que envolvem o setor. Para o estudo de planejamento setorial tem-se, na esfera de regulação, a EPE que realiza estudos e projeções da matriz elétrica brasileira, além disso, para obtenção de dados das curvas horárias de atendimento a demanda tem-se a ONS como operante e realizador dos despachos para atendimento a rede, com a ANEEL regulando e normatizando o setor.

Na área de Suprimentos a discussão do estudo volta-se para a geração de energia centralizada, ou seja, a geração no ambiente de contratação regulado (ACR).

Mediante a Figura 16 percebe-se a ligação entre as instituições do setor elétrico brasileiro, com estudos de viabilidade de usinas eólicas *offshore* pela EPE, conforme demonstrado na discussão.

Figura 16 - Esferas e instituições do setor elétrico brasileiro



Fonte: Pinto (2019).

Nota: A Figura exprime as instituições envolvidas no setor elétrico brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como agente regulador, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) como agente envolvida na compra e venda de energia, Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Direito Econômico / Conselho Administrativo de Defesa Econômica (SDE/Cade), Tribunal de Contas da União (TCU)

A EPE, segundo Portal brasileiro de dados (2022), caracteriza-se como uma prestadora de serviços na área de pesquisas acerca do planejamento do setor energético, com projeções da matriz brasileira, estudos voltados para integração dos recursos energéticos e desenvolvimento da expansão e geração energética nacional.

O Plano Nacional de Expansão 2050 - PNE 2050 - desenvolvido pela EPE (2020), projetou o crescimento da demanda de energia por meio de dois cenários possíveis: o cenário de “Desafio da Expansão” e o “Cenário de Estagnação”.

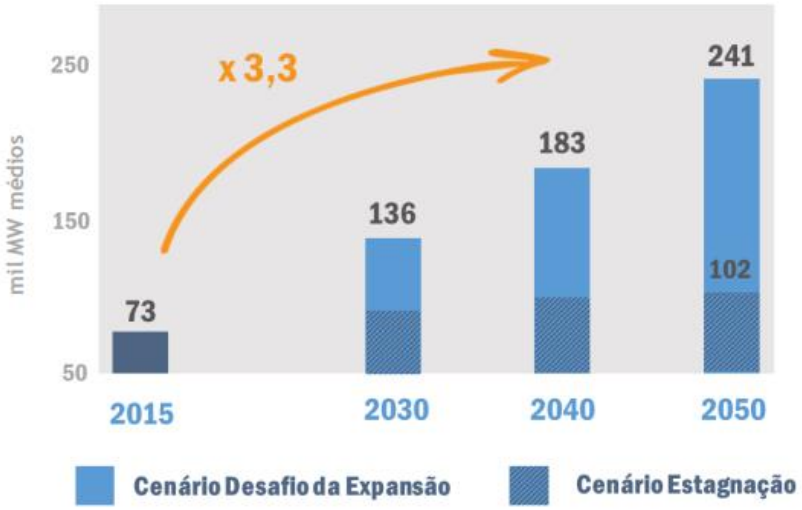
No cenário de Desafio da Expansão, segundo EPE (2020), projeta-se um crescimento médio da economia brasileira em 3,5% ao ano de 2015 a 2020. Do total demandado, 5% seria atendido por geração distribuída, geração descentralizada próxima ao centro consumidor, e 17% do total seria atendido por eficiência energética.

Já no Cenário de Estagnação, de acordo com EPE (2020), a projeção de crescimento é de cerca de 1% ao ano entre 2015 e 2020, tal cenário tem como premissa uma menor expansão

econômica e um crescimento populacional modesto, com cerca de 7% do consumo atendidos pela geração distribuída, enquanto a eficiência corresponde 10% do total.

Assim, a Figura 17 exprime a projeção do consumo elétrico brasileiro dado os cenários de expansão e estagnação.

Figura 17 - Evolução do Consumo de Energia Elétrica



Fonte: EPE (2020).

Mediante os resultados apresentados na Figura 17, EPE (2020) discute que as estimativas para o cenário de Desafio da Expansão projetam uma demanda de 172 mil MW médios para 2050, enquanto no cenário de Estagnação projeta-se continuar na faixa entre 65 mil a 70 mil MW médios.

A demanda de energia, de acordo com Capelli (2013), pode ser definida como a medida das potências solicitadas a rede em um determinado período de tempo, denominado período de integração, sendo no Brasil considerado o tempo em torno 15 minutos. Já o consumo refere-se a energia gasta durante o período de utilização. Ou seja, é equacionado como potência vezes o tempo, com a unidade de medida sendo em watts-horas (Wh) ou seus múltiplos como Quilowatt hora (KWh), Megawatt hora (MWh), etc.

Diante deste cenário de expansão da demanda é importante discutir como se dá o planejamento da operação de energia elétrica no Brasil.

2.3.2 Planejamento de Operação e a Teoria do Portfólio

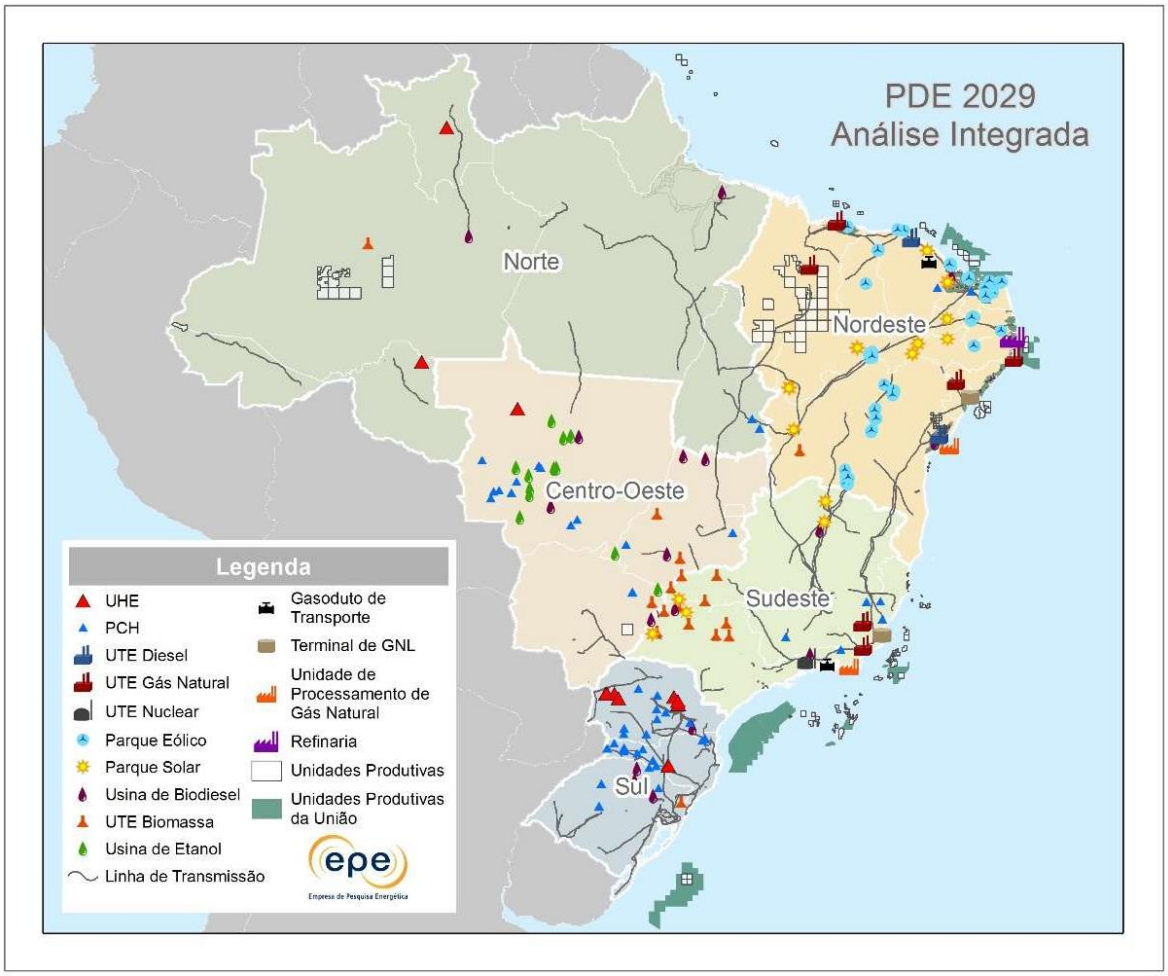
O processo de planejamento do setor elétrico, segundo Reis (2011), tem como objetivo determinar a ordenação, a prioridade e a distribuição temporal das obras a serem implementadas

a longo prazo buscando atingir duas premissas: a confiabilidade, por meio de um suprimento confiável, e o baixo custo, minimizando o capital investido durante todo o ciclo de vida do projeto.

De acordo com EPE (2019), o plano decenal da rede realiza uma análise espacial da expansão no horizonte temporal de dez anos, o que permite identificar possíveis efeitos cumulativos nas regiões de maior ocorrência de empreendimentos elétricos. Além disso, permite avaliar a integração e complementaridade entre as fontes, contribuindo para otimização da transmissão e do planejamento mais eficiente do setor.

De tal maneira, a Figura 18 demonstra o mapeamento da matriz do setor elétrico projetado no plano decenal no período de 2019 a 2029.

Figura 18 - Mapeamento integrado do mix das fontes do setor elétrico centralizado brasileiro



Fonte: EPE (2019).

Nota: A Figura exprime o mix de fontes para atendimento a demanda elétrica ao longo de todo o país, demonstrando a localidades das Usinas Hidrelétricas (UHE), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), Usinas Termoelétricas (UTE) por tipo de fonte, Parques Eólicos, Parques Solares e Usinas de etanol. Além disso, demonstra a parte de transmissão considerando as linhas de transmissão paras os centros de distribuição dos países

e as unidades produtoras das UTEs (gasoduto de Transporte, Terminal de Gás Natural Liquefeito (GNL), unidade de processamento de gás natural, refinaria e unidades produtivas.

Por meio da Figura 18 é possível observar a rede entre usinas do sistema centralizado, assim, mediante ao objetivo do planejamento do sistema no quesito de expansão, Reis (2011) destaca quatro pontos a serem considerados para delinear a configuração da matriz a longo prazo:

I. Previsões da demanda futura de eletricidade: envolve avaliar o crescimento do mercado energia elétrica;

II. Escolha de técnicas e tecnologias de geração e transmissão: análise da adequação às condições de operações futuras;

III. Definição e determinação da estrutura geral do sistema em toda sua dimensão;

IV. Seleção dos cenários de investimentos mais próximos do ótimo: com avaliação da locação e cronograma de entrada de novos equipamentos e componentes do sistema.

A fim de analisar os quatros pontos considerados para planejamento do setor elétrico a longo prazo, Reis (2011) pontua, também, quatro critérios probabilísticos com o objetivo de direcionar a análise de inserções e operações:

I. Critérios para atendimento do mercado: avaliar se, dentro de um certo nível probabilístico, o sistema é capaz de atender o mercado previsto em termos de energia e de ponta. Para traçar o atendimento de mercado, geralmente, são realizadas diversas simulações estocásticas e, caso o seja maior que o admitido que geralmente é 5%, atua-se no sistema para minimizar os riscos.

II. Reserva de geração: avalia-se o critério de reserva de geração, ou operação, que é calculada como a margem entre a potência instalada do sistema e o requisito de ponta considerando a reserva girante, capacidade do sistema de atender carga adicional imediatamente, e a reserva de manutenção.

III. Índices de confiabilidade: considera a avaliação acerca de índices de suprimento de carga por meio da consideração de riscos de déficit ou custo de energia não suprida.

IV. Influências aleatórias: considera avaliações sobre a capacidade de geração, como indisponibilidade de máquinas ou equipamentos importantes, atrasos no programa de geração e crescimento além do previsto.

Acerca da projeção a longo prazo, EPE (2019) expõe as possíveis fontes de produção de energia elétrica consideradas no planejamento decenal, conforme expresso no Quadro 2 subsequente.

Quadro 2 - Recursos disponíveis para expansão da oferta de energia elétrica

Fonte	Disponível a partir de	Como é definida a contribuição		
		MDI	NEWAVE	Suprimento de Potência
Hidrelétricas	2026*	Séries de energia e potências, obtidas a partir de simulação no modelo SUISHI, utilizando séries históricas de vazões **	Simulação hidrotérmica do NEWAVE utilizando reservatórios equivalentes de energia e 2.000 séries sintéticas	Cálculo de potência máxima disponível para todas as séries históricas utilizando metodologia da NT EPE-DEE-NT-035-r2/2017
Hidrelétricas Reversíveis	2026	Energia armazenada em momentos de excesso descontadas de perdas decorrentes do processo de armazenamento e descarga	Incremento de carga para representar o carregamento	Incremento da potência disponível para o atendimento
PCH e CGH	2023	Definida com discretização mensal a partir de dados históricos de geração		
Eólica *Onshore*	2023	Energia: a partir de dados de projetos habilitados em leilão Contribuição nos patamares de carga: construída a partir da base de dados AMA		P95 da geração esperada para todas as horas do mês
Eólica *Offshore*	2027	Utilização de dados de reanálise para pontos da costa brasileira, aplicando a mesma metodologia utilizada para os patamares do recurso *onshore*		
Solar Fotovoltaica	2023	A partir de dados de projetos habilitados em leilão		P95 da geração esperada para todas as horas do mês
Termelétricas a Biomassa Sucroenergética	2023	Definida com discretização mensal a partir de dados históricos de geração		
Termelétricas a Biogás	2023	Sazonalização definida a partir dos processos do setor sucroenergético e possibilidade de estocagem do insumo.		
Termelétricas a Biomassa Florestal	2024	Despacho definido pelo modelo de otimização, a partir dos CVUs definidos		Potência Disponível
Termelétricas a Gás Natural	2023			
Termelétricas a Carvão	2026			
Baterias Íon-Lítio	2024	Energia armazenada em momentos de excesso descontadas de perdas decorrentes do processo de armazenamento e descarga	Incremento de carga para representar o carregamento	Incremento da potência disponível para o atendimento

Fonte: EPE (2019).

Nota: Modelo de Decisão de Investimentos (MDI) é um modelo projetado para a minimização do custo total de investimento e operação, sob condições de incertezas. Newave: modelo para cálculo da garantia física de hidrelétricas e termelétricas baseado pelo Custo Marginal de Operação SUISHI: modelo utilizado no cálculo de garantia física de usinas despachadas centralizadamente. AMA: Acompanhamento das Medições Anemométricas P95: fator de capacidade equivalente aos 5% piores cenários de geração. CVUs: Custo Variável Unitário.

Em face à perspectiva de planejamento para usinas eólicas, Miguel (2016) discute acerca das variações do vento no curto, médio e longo prazo, com as variações ao longo do ano possuindo um comportamento sazonal, assim, considera-se em termos de estudo variações plurianuais no projeto de até 10%.

Pinto (2019) complementa que a previsão da geração de energia por usinas eólicas não é garantida apenas por uma boa previsão do vento, uma vez que depende de outros fatores e, assim, como deseja-se minimizar os riscos de operação a previsão de geração eólica está ligada à geração de uma região, não apenas de um aerogerador eólico.

A produção de energia de um parque eólico, segundo Pinto (2019), exige um tratamento estatístico dado que segue um princípio estocástico, logo, devem ser associadas probabilidades de ocorrência às estimativas de produção. Um processo estocástico, segundo Yates e Goodman (2017), refere-se a funções aleatórias no tempo.

Além disso, segundo Pinto (2019), deve-se transformar a incerteza do recurso eólico em incerteza de produção, o que pode ser feito pelo fator de sensibilidade, que consiste em perturbar o valor do vento original em cerca 3% e recalcular a energia.

Com o intuito de considerar aspectos probabilísticos nos parques eólicos *offshore*, a Tabela 7 exprime as variáveis e equações envolvidas no cálculo da produção de energia. Segundo Pinto (2019), para a estimativa central da produção de energia líquida com probabilidade de 50%, z é igual a 0.

Tabela 7 - Equações da produção de energia em processos estocásticos

Variável	Equação	Legenda
Distribuição de probabilidade da produção de energia	$f(E) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(E-E_m)^2/2\sigma^2}$ (Eq. 5)	f (E): probabilidade de a produção ser igual à energia E: PAE liquida – probabilidade de 50% de ser excedida; P50 σ: desvio-padrão absoluto da estimativa de produção de energia
Desvio-padrão absoluto	$\sigma = Inc_{Total} * E_m$ (Eq. 6)	Inc_{Total}: incerteza total Em: PAE líquida
Produção de energia liquida para a probabilidade desejada	$e = E_m(1 - z * Inc_{Total})$ (Eq. 7)	e: produção de energia liquida excedida para a probabilidade desejada Inc_{Total}: incerteza total na estimativa de Em Z: valor encontrado na tabela de probabilidade

Fonte: Pinto (2019).

Mediante aos riscos envolvidos no processo da previsão de geração de usinas eólicas tem-se, segundo Miguel (2016), os conceitos discutidos por Markowitz que estabelece uma carteira ótima de ativos, dado um determinado risco, com o objetivo de maximizar o retorno esperado minimizando as variabilidades.

Segundo Lima, Carvalho e Carneiro (2015), os conceitos discutidos por Markowitz no ano de 1952 ficou conhecido como a Teoria do Portfólio, que tem como objetivo atingir um percentual de penetração de cada ativo a fim de gerenciar a carteira de investimentos por meio da seleção de portfólios considerando suas correlações.

O conceito de correlações, de acordo com Lima, Carvalho e Carneiro (2015), refere-se a medida de relação entre uma série de dados com variação de -1 a +1 e, quanto mais perto de +1, maior a correlação positiva o que não favorece a diversificação proposta pela teoria, uma vez que tal característica faz com que não ocorra a compensação de um ativo mediante a perda do outro.

Já em relação aos riscos, Miguel (2016) discute duas caracterizações: o risco sistêmico, variações da conjuntura por regras mal definidas ou mal aplicadas, e o risco não sistêmico, intrínseco ao ativo e ao subsistema em que está inserido.

Samanez (2007) complementa que o risco sistêmico ou risco residual refere-se ao risco do mercado como um todo, enquanto os riscos não sistêmicos relacionam-se com os riscos operacionais de um ativo e do setor em que atua.

De face do conceito perante a uma usina eólica *offshore* tem-se, como uma visão de riscos não sistêmicos do processo e operação de um aerogerador, as variáveis expressas na Figura 11, como corrente de vento, congelamento dos aerogeradores, turbulências do ambiente, turbulência do vento, variação das marés e tempestades, correntes marítimas, ondas, mecânica do solo e erosão. Enquanto avaliando o sistema tem-se, como riscos de mercado, as características e fatores de cargas ao longo do litoral brasileiro.

De tal maneira, em relação a geração de usinas eólicas *offshore*, Pinto (2019) discorre que para uma grande região de parques o erro associado diminui, uma vez que o fato de agregar fazendas eólicas têm a tendência de cancelar o erro total associado. Assim, a inclusão de fazendas *offshore* reduz o risco do sistema, desta maneira, o objetivo do estudo visa encontrar o melhor portfólio para todo o sistema *offshore* brasileiro.

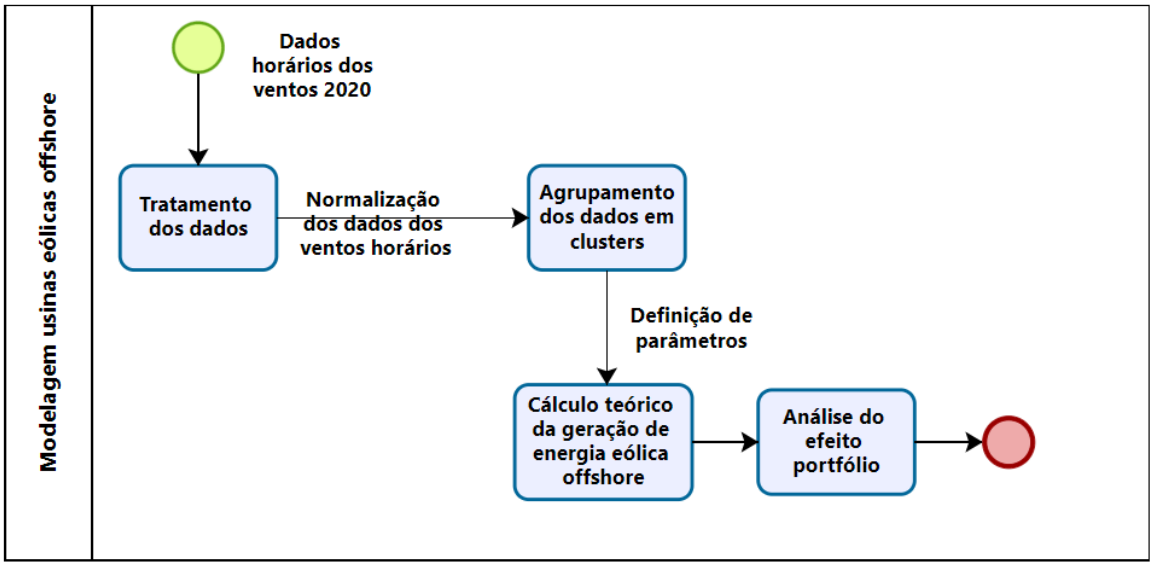
.

3. MODELAGEM DE DADOS

O capítulo aborda o referencial teórico envolvido na análise de agrupamento frente a premissa do efeito portfólio das usinas eólicas *offshore*.

De tal forma, a fim de explicar os conceitos envolvidos para desenvolvimento do estudo proposto, a Figura 19 demonstra, de forma esquemática, as entradas e saídas das etapas para obtenção dos objetivos traçados.

Figura 19 - Esquemático do desenvolvimento do estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Dado a Figura 19, o capítulo tem como propósito aprofundar nas técnicas a serem utilizadas para análise do conceito de efeito portfólio nas usinas eólicas *offshore,* descrevendo o algoritmo de agrupamento para aplicação da análise de *clusters* como base para aplicação dos conceitos voltados para a energia eólica *offshore.*

3.1 AGRUPAMENTO DE DADOS

O agrupamento, segundo Carvalho et al. (2011), refere-se a segmentação de dados de forma que séries similares sejam associadas a um mesmo *cluster*s com base em critérios de relação.

Para se realizar a análise de agrupamento, segundo Hair et al. (2009), existem princípios inerentes que se relacionam algoritmicamente nas etapas descritas a seguir:

I. Elencar o propósito da pesquisa e questões de planejamento como a atipicidade dos dados e se irá realizar padronização.
II. Selecionar uma medida de similaridade baseado no objetivo da pesquisa e nos dados que serão tratados.
III. Definir a característica do algoritmo de agrupamento, podendo ser hierárquico, não-hierárquico ou uma combinação dos dois métodos usados.
IV. Interpretação, validação e caracterização dos agrupamentos.

Sob a conceituação do procedimento de agrupamento hierárquico, Hair et al. (2009) o conceitua como combinações de processos que se repetem para definir a similaridade, entre grupos com múltiplos membros, a fim de se construir hierarquia, ou dendrograma, com n-1 soluções de agrupamento, sendo n o número de objetos.

O dendrograma, sob a fala de Albuquerque (2005), consiste em uma representação gráfica de todo o procedimento do método hierárquico por meio de uma árvore, com os nós representando os grupos e/ou objetivos relacionados a ele, assim, ao cortar o dendrograma em um nível desejado, obtém-se o número de grupos e os indivíduos que formam cada grupo.

Uma técnica utilizada frente ao resultado matemático do dendrograma é a otimização binária da ordem das folhas na árvore que, de acordo com Joseph, Gifford e Jaakola (2001), refere-se à ordenação para uma árvore binária de n elementos através da maximização da semelhança dos objetos adjacentes na ordenação.

No que tange a escolha da medida de similaridade, Hair et al. (2009) pontuam três métodos com maior utilização nos estudos de agrupamento: as medidas de distância, medidas correlacionais e medidas de associação.

As medidas de distância envolvem a distância euclidiana, euclidiana ao quadrado, euclidiana padronizada, distância de Mahalanobis em que utiliza a covariância amostral e a distância de Minkowski cujo expoente padrão é dois, já em relação a correlacional tem-se a correlação de Pearson e a de Spearman, enquanto a de associação baseia-se no cosseno dos ângulos dos pontos em análise.

A respeito dos métodos para modelagem hierárquica, o Quadro 3 expressa alguns dos métodos hierárquicos existentes.

Quadro 3 - Métodos hierárquicos de similaridade

Método	Descrição
Método de ligação completa	Similaridade entre objetos se baseia na distância máxima entre objetos em dois agrupamentos (a distância entre os membros mais distintos de cada agrupamento).
Método de ligação individual	Similaridade é definida como a distância mínima entre qualquer objeto em um agrupamento e qual- quer objeto de outro, o que simplesmente significa a distância entre os objetos mais próximos de dois agrupamentos
Ligação média	Similaridade como a distância média entre todos os objetos em um agrupamento e todos os objetos de outro. Essa técnica tende a combinar agrupamentos com pequenas variâncias.
Método centróide	Similaridade entre agrupamentos é medida como a dis- tância entre centróides de agrupamentos. Quando dois agrupamentos são combinados, um novo centróide é computado.
Método de Ward	Similaridade usada para juntar agrupamentos é calcu- lada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos somados sobre todas as variáveis. Esse método tende a resultar em agrupamentos de tamanhos aproximadamente iguais devido à sua minimização de variação interna.

Fonte: Elaboração própria a partir de Hair et al. (2009).

Enquanto o procedimento não-hierárquico pode ser definido, de acordo com Hair et al. (2009), como o processo em que produz uma solução de agrupamento para um conjunto de sementes, assim, em vez de utilizar a construção em forma de árvore utilizam-se sementes de agrupamento, a fim de reunir os objetivos dentro de uma distância pré-especificada.

No que tange aos métodos não-hierárquicos, Hair et al. (2009) cita o método de referência paralela em que as sementes são selecionadas simultaneamente no início e as distâncias de referência ajustam-se para incluir menos ou mais objetos no agrupamento.

A fim de obter resultados com maior acuracidade, Hair et al. (2009), também discute a necessidade de padronização das variáveis, com a forma mais comum sendo a conversão de cada variável em escores padrão (distribuição normal) em que é feito a subtração da média e a divisão pelo desvio padrão.

Na etapa de análise e validação do modelo pode ser utilizado, de acordo com Albuquerque (2005), a correlação cofenética. O coeficiente realiza uma comparação entre as distâncias da série observada com as distâncias previstas a partir do processo de agrupamento. Desta forma, tem-se uma medida do grau de ajuste entre a matriz de dissimilaridade original e a matriz resultante do modelo.

A correlação (r_{cof}) é dada através da formulação descrita por Bussab et al (1990), descrita na Tabela 8 subsequente.

Tabela 8 - Formulação para correlação cofenética

Formulação	Descrição
$r_{cof} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} (c_{ij} - \bar{c})(d_{ij} - \bar{d})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} (c_{ij} - \bar{c})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} (d_{ij} - \bar{d})^2}}$ (Eq. 8)	Em que: cij: valor de dissimilaridade entre os indivíduos i e j, obtidos a partir da matriz cofenética dij: valor de dissimilaridade entre os indivíduos i e j, obtidos a partir da matriz de dissimilaridade
$\bar{c} = \dfrac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} c_{ij}$, (Eq. 9)	Com n = número de observações.
$\bar{d} = \dfrac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} d_{ij}$. (Eq. 10)	

Fonte: Elaboração da autora a partir de Bussab et al (1990).

A correlação cofenética assemelha-se à correlação de Pearson. Segundo Martins e Domingues (2019), a correlação de Pearson consiste em avaliar a existência de uma relação linear entre duas variáveis com índice variando de -1 a +1. Sendo que, quanto mais próximo de |1|, maior a correlação, com valores acima de |0,7| considerados uma forte correlação entre amostras com trinta ou mais elementos.

A fim de calcular a correlação de Pearson considerando duas variáveis (X, Y) em um período de tempo t com um tamanho de amostra n, tem-se a seguinte equação expressa no Tabela 9.

Tabela 9 - Equação de correlação de Pearson

Formulação	Variável
$r_{xy} = \dfrac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}}$ (Eq. 11)	Onde: $S_{xy} = \sum XY - \dfrac{\sum X \sum Y}{n}$ $S_{yy} = \sum Y^2 - \dfrac{(\sum Y)^2}{n}$ $S_{xx} = \sum X^2 - \dfrac{(\sum X)^2}{n}$ Sendo $\sum XY = \sum_{i=1}^{n} X_i Y_i$

Fonte: Elaboração da autora a partir de Martins e Domingues (2019)

Mediante a análise da correlação cofenética é possível avaliar e analisar modelos de agrupamento aderentes aos dados observados. No caso do estudo, essa análise voltou-se para avaliar o comportamento dos ventos em diferentes regiões do litoral brasileiro buscando, através das técnicas discutidas, encontrar grupos com similaridade no comportamento.

4. RESULTADOS

O presente tópico tem como pressuposto discutir sobre a obtenção dos resultados aplicando a metodologia proposta no trabalho e o esquemático presente na Figura 19. Como base de dados utilizou-se os dados horários do vento por cidade presente no site do INMET.

Logo, o capítulo visa detalhar: o tratamento de dados, uma vez que a base de dados foi fundamental para todas as análises com necessidade de parametrizações e ajustes ao longo de todo o trabalho, o agrupamento entre as cidades, com as discussões para a escolha da metodologia empregada e, por fim, a avaliação dos resultados obtidos frente a premissa inicial do estudo, a avaliação do efeito portfólio nas usinas eólicas *offshore*.

4.1 AGRUPAMENTO DA VELOCIDADE HORÁRIA DO VENTO NAS CIDADES EM ANÁLISE

4.1.1 Tratamento dos dados

A parte inicial do tratamento de dados deu-se com o mapeamento dos municípios do litoral brasileiro, a fim de determinar as cidades que seriam analisadas no estudo a partir dos dados do INMET.

De acordo com IBGE (2022), o Brasil conta com 279 municípios defrontantes com o mar. No INMET foi possível encontrar dados referente a 59 municípios litorâneos no ano de 2020, logo, a amostragem, em um primeiro momento, reduziu em cerca de 79%.

De face com as bases extraídas, realizou-se a averiguação dos dados tabulados pelo INMET referente a velocidade horária do vento (m/s). Cada município deveria contar com 8784 observações, entretanto, alguns dados estavam incompletos e, assim, foi parametrizado a utilização de cidades com, pelo menos, 80% das observações preenchidas.

Uma vez parametrizado a quantidade de observações, foi observado cidades que, atendiam essa parametrização, mas que estavam repetidas como: Rio de Janeiro e Campos dos Goytacazes. Desse modo, a amostragem diminui para 33 municípios, conforme exemplificado no Quadro 4.

Quadro 4 - Avaliação das cidades a serem trabalhadas

Municípios	Estado	Número de dados	Status
Coruripe	AL	8104	Cidade atende
Salvador	BA	8784	Cidade atende
Conde	BA	8735	Cidade atende
Una	BA	8717	Cidade atende
Belmonte	BA	8400	Cidade atende
Fortaleza	CE	8777	Cidade atende
Natal	RN	8147	Cidade atende
Aracaju	SE	8784	Cidade atende
Linhares	ES	8782	Cidade atende
Vila Velha	ES	8265	Cidade atende
Arraial do Cabo	RJ	8559	Cidade atende
Campos dos Goytacazes	RJ	8784	Cidade atende
Iguape	SP	8779	Cidade atende
Rio Grande	RS	8784	Cidade atende
Torres	RS	7366	Cidade atende
São Mateus	ES	8775	Cidade atende
São Luís	MA	8782	Cidade atende
Duque De Caxias - Xerem	RJ	8784	Cidade atende
Macaé	RJ	8782	Cidade atende
Niterói	RJ	8720	Cidade atende
Parati	RJ	8640	Cidade atende
Rio De Janeiro - Forte de Copacabana	RJ	8311	Cidade atende
Santa Vitoria do Palmar - Barra do Chuí	RS	8784	Cidade atende
Tramandaí	RS	8784	Cidade atende
Araranguá	SC	8761	Cidade atende
Florianópolis	SC	8779	Cidade atende
Itajaí	SC	7273	Cidade atende
Itapoá	SC	8400	Cidade atende
Laguna - Farol de Santa Marta	SC	7249	Cidade atende
Valença	BA	8784	Cidade atende
Macapá	AP	8769	Cidade atende
Parnaíba	PI	8585	Cidade atende
Braganca	Pará	8777	Cidade atende
Rio de Janeiro - Jacarepaguá	RJ	8258	Duplicada
Rio de Janeiro - Vila Militar	RJ	7799	Duplicada
Caravelas	BA	5713	Excluir
Porto Seguro	BA	0	Excluir
Itapipoca	CE	0	Excluir
Recife	PE	874	Excluir
Macau	RN	5359	Excluir
Brejo Grande	SE	4589	Excluir
Oiapoque	AP	0	Excluir
Soure	PA	1200	Excluir
Angra Dos Reis	RJ	2743	Excluir
Bertioga	SP	1626	Excluir
Mostardas	RS	0	Excluir
Acaraú	CE	1200	Excluir
Vitoria	ES	5656	Excluir
Pres. Kennedy	ES	4935	Excluir
Turiaçu	MA	1540	Excluir
Joao Pessoa	PB	5932	Excluir
Rio De Janeiro-Marambaia	RJ	3473	Excluir
São Sebastiao	SP	5034	Excluir
Municípios	**Estado**	**Número de dados**	**Status**
Ilhéus	BA	0	Excluir

Salvador (Radio Farol)	BA	6164	Excluir
Maceió	Al	3374	Excluir
São Gonçalo	RJ	0	Excluir
Saquarema - Sampaio Correia	RJ	6260	Excluir

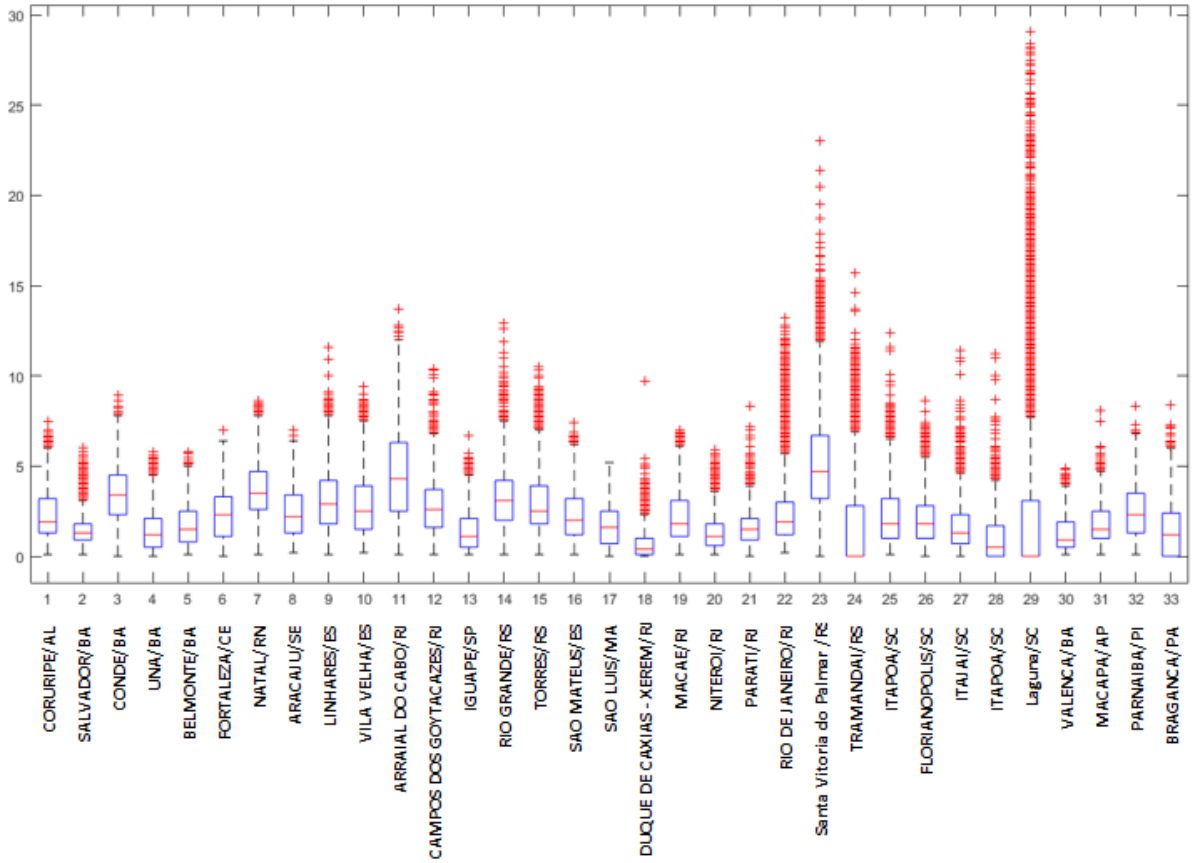
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A fim de ajustar a base de dados para o estudo, foi preenchido as observações faltantes considerando a média do vento observado no mesmo horário nos outros dias.

Através da tratativa dos dados, o estudo foi delimitado a avaliação de 33 cidades litorâneas, divididas em 14 estados, conforme destacado no Quadro 5, com identificação de "Cidade atende".

Mediante as adaptações e análise para o tratamento inicial dos dados e a padronização da série histórica das cidades pauta do estudo, plotou-se o gráfico do comportamento horário do vento utilizando o gráfico *Boxplot*, o qual representa a variação dos dados por meio de um diagrama de caixas representando o primeiro, segundo (mediana) e terceiro quartil e os eixos superiores e inferiores, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Boxplot velocidade horária dos ventos (m/s) em 33 cidades litorâneas em 2020



Fonte: Elaboração pela autora (2022)

A partir da curva da velocidade média dos ventos, presente na Figura 20, é possível visualizar a discussão a respeito da variabilidade do comportamento do vento em uma escala

horária, verificando oscilações acentuadas, com grande presença de *outliers*, ou seja, pontos que apresentam divergência do padrão identificado nas cidades.

Além disso, mediante ao gráfico *Boxplot*, avalia-se as médias e variações dos quadrantes entre as curvas das cidades, demonstrando variabilidades estatísticas significativas entre o grupo analisado. Assim, para agrupar através do algoritmo de similaridade fez-se a análise do agrupamento hierárquico.

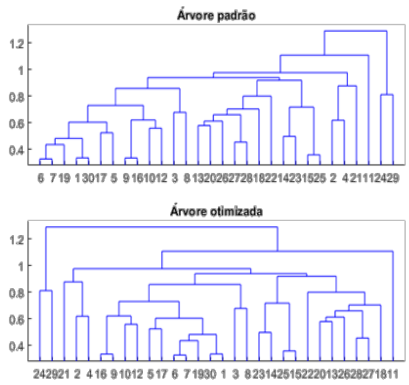
4.1.2 Aplicação do algoritmo de agrupamento

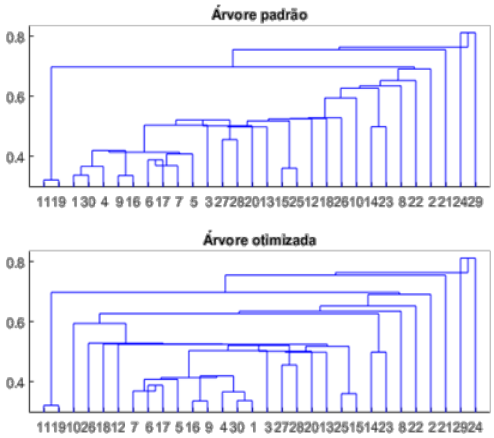
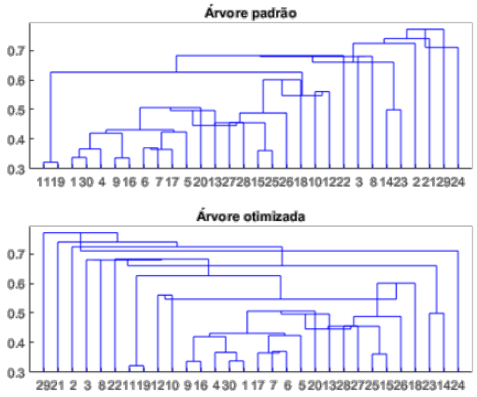
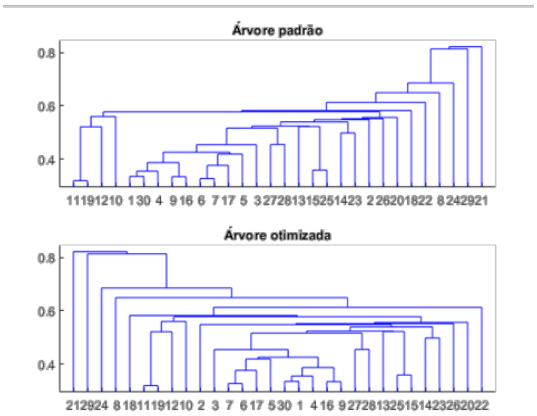
Com a definição das cidades e da padronização dos dados referente a velocidade horário dos ventos, foi realizado o algoritmo de agrupamento para as observações.

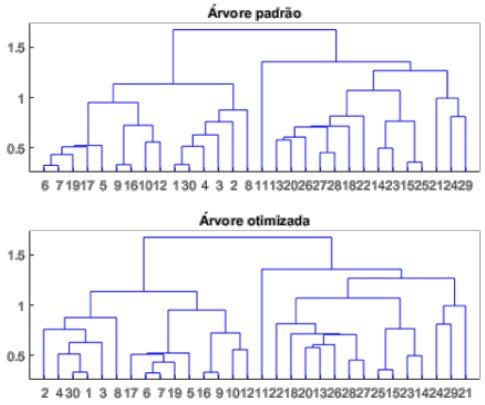
Inicialmente, os dados foram normalizados por meio da média e do desvio padrão e, em seguida, foram avaliados os métodos a serem adotados na definição dos *clusters.*

Para a escolha do modelo, fez-se teste entre os métodos hierárquicos considerando a medida de correlação e a medida euclidiana através do Software Matlab. Os quadros 5 e 6 exemplificam os resultados encontrados, respectivamente.

Quadro 5 - Resultados obtidos para avaliação dos métodos hierárquicos a medida de correlação

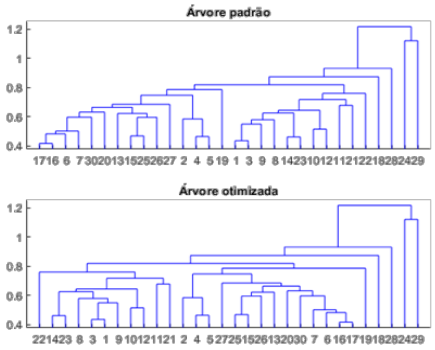
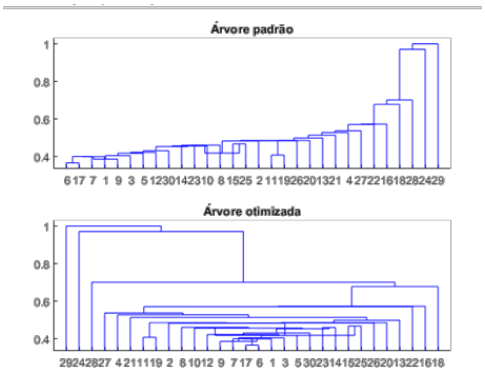
Medida de similaridade: correlação		
Método	**Coeficiente cofenética**	**Dendograma**
Ligação completa (complete)	**0,7148**	
Método	**Coeficiente cofenética**	**Dendograma**

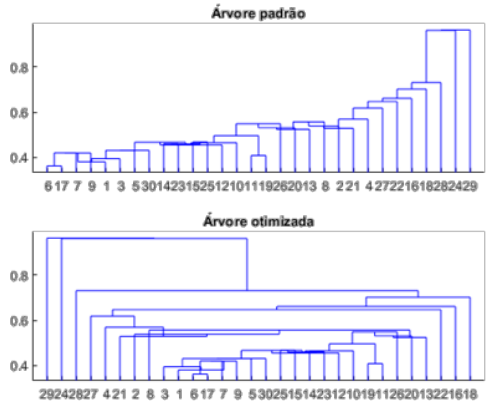
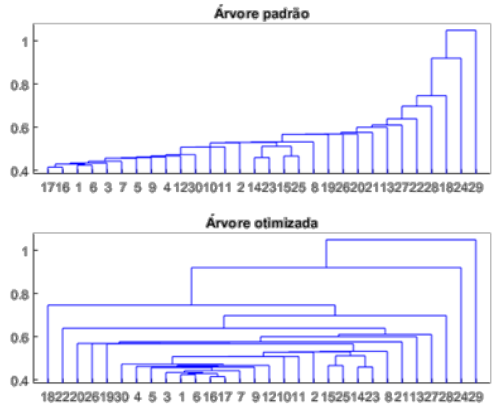
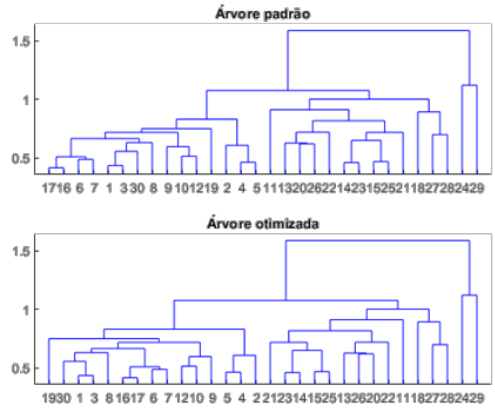
Centróide (centroid)	**0,6176**	
Ligação média (median)	**0,5236**	
Ligação individual (single)	**0,6521**	
Método	**Coeficiente cofenética**	**Dendograma**

Ward	**0,3087**	

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Quadro 6 - Resultados obtidos para avaliação dos métodos hierárquicos da medida euclidiana

Medida de similaridade: Euclidiana		
Método	**Coeficiente cofenética**	**Dendograma**
Ligação completa (complete)	**0,8753**	
Centróide (centroid)	**0,9502**	
Método	**Coeficiente cofenética**	**Dendograma**

Ligação média (median)	**0,9421**	
Ligação individual (single)	**0,9396**	
Ward	**0,8382**	

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

De face aos resultados obtidos utilizando a medida de similaridade de correlação e euclidiana, através dos resultados do coeficiente cofenético, tem-se valores mais próximos a um quando utilizado o método euclidiano.

Assim, foi escolhido o método euclidiano dado a uma maior aderência do método hierárquico. Para verificação do método adequado ao modelo combinou-se a correlação cofenética com os dendrogramas plotados, tanto o da matriz padrão quanto da matriz otimizada.

Ao verificar os modelos do método euclidiano tem-se que, apesar do método centroide, ligação média e ligação individual apresentarem um coeficiente maior quando comparada com o método Ward e completo, a árvore plotada no dendrograma do método Ward apresentou uma melhor visualização quanto aos grupos formados pelo modelo e, a árvore otimizada, foi próxima a matriz padrão.

Tendo em vista tais observações, o modelo hierárquico escolhido envolveu a medida de distância euclidiana e o método de Ward para avaliação dos clusters, cortando o dendrograma em quatro nós. O resultado obtido pode ser observado através do Quadro 7 a seguir, o qual exprime a relação entre as cidades em análise e seu respectivo cluster encontrado.

Quadro 7 - Relação entre cidades em análise e clusters encontrados

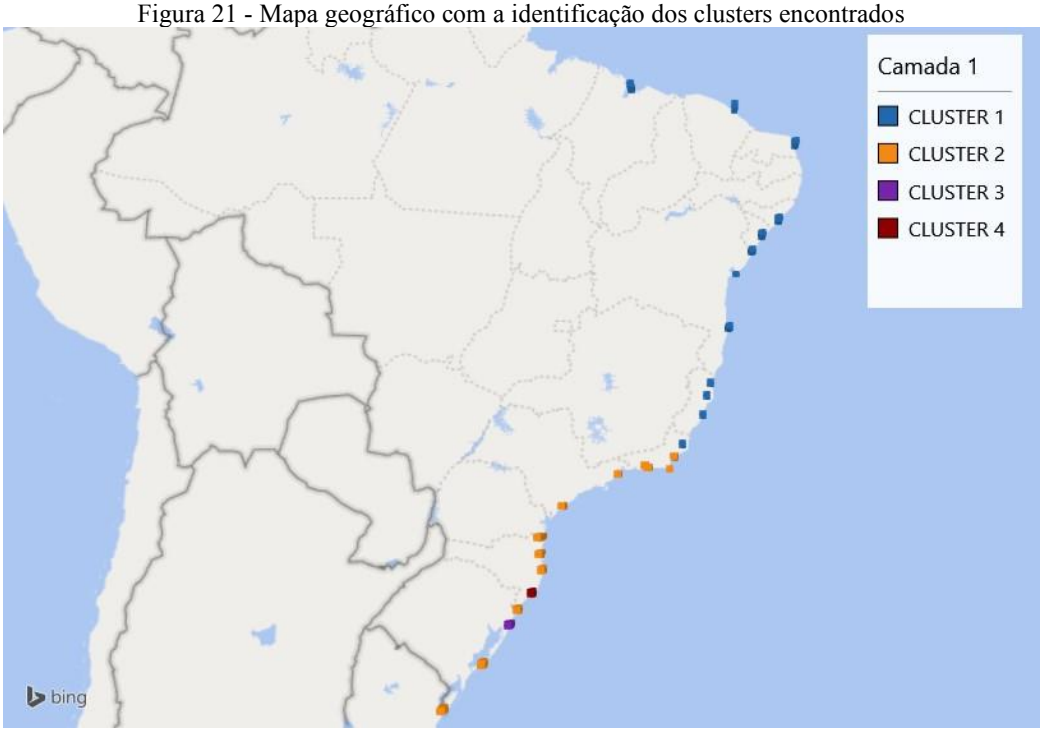
Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
CORURIPE - AL (CID1)	ARRAIAL DO CABO - RJ (CID18)	TRAMANDAI - RS (CID32)	Laguna - Farol de Santa Marta - SC (CID33)
SALVADOR - BA (CID2)	IGUAPE - SP (CID19)		
CONDE - BA (CID3)	RIO GRANDE - RS (CID20)		
UNA - BA (CID4)	TORRES - RS (CID21)		
BELMONTE - BA (CID5)	DUQUE DE CAXIAS - XEREM - RJ (CID22)		
FORTALEZA - CE (CID6)	MACAE - RJ (CID23)		
NATAL - RN (CID7)	NITEROI - RJ (CID24)		
ARACAJU - SE (CID8)	PARATI - RJ (CID25)		
LINHARES - ES (CID9)	RIO DE JANEIRO - FORTE DE COPACABANA - RJ (CID26)		
VILA VELHA - ES (CID10)	Santa Vitoria do Palmar - Barra do Chui - RS (CID27)		
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ (CID11)	ITAPOA - SC (CID28)		
SAO MATEUS - ES (CID12)	FLORIANOPOLIS - SC (CID29)		
SAO LUIS - MA (CID13)	ITAJAI - SC (CID30)		
VALENCA - BA (CID14)	ITAPOA - SC (CID31)		
MACAPA - AP (CID15)			
PARNAIBA - PI (CID16)			
BRAGANCA - Pará (CID17)			

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Para avaliação espacial dos clusters, plotou-se o Mapa Geográfico das cidades em análise no presente estudo, com a identificação do respectivo cluster. Assim, conforme pode ser observado na Figura 21, em uma análise geográfica, o cluster 1 engloba o nordeste do Brasil com algumas cidades do sudeste, enquanto o cluster 2 engloba a maior parte do sudeste e do sul e, os cluster 3 e 4, possuem apenas uma cidade do Sul respectivamente.

O resultado obtido corrobora para a discussão a respeito da complementaridade da energia eólica em diferentes regiões do país, demonstrando características similares em regiões próximas no mapa do litoral brasileiro.

Figura 21 - Mapa geográfico com a identificação dos clusters encontrados



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A fim de discutir os aspectos envolvidos nas cidades em estudos e seu respectivo cluster frente ao cenário elétrico brasileiro realizou-se, também, o modelo matemático de Programação Linear para avaliação do mix ótimo de geração de energia eólica *offshore* nas cidades em estudo.

Ao realizar um comparativo entre os dados obtidos pelo agrupamento (Figura 20) e o comportamento estatístico analisado pelo gráfico *Boxplot* (Figura 19), pontua-se que as duas variações em que se observou blocos com mediana no primeiro quartil sem base hastes inferiores (Tramandaí e Laguna) foram as cidades com agrupamentos isolados, no cluster 3 e 4, respectivamente.

Assim, os dois métodos de análise corroboraram para um comportamento distinto destas cidades quando avaliado a similaridade entre os ventos no litoral brasileiro.

4.2 POTÊNCIA MÁXIMA PROJETADA PARA OS AEROGERADORES NAS CIDADES LITORÂNEAS

Tendo em vista a avaliação do potencial eólico *offshore* para atendimento da projeção da demanda, fez-se necessário o levantamento e padronização dos dados da potência gerada por um aerogerador nas cidades do estudo.

Para aplicação do cálculo da potência, inicialmente, foi necessário calcular a densidade do ar no local de acordo com a temperatura do ambiente.

Assim, utilizou-se das observações do INMET, extraindo os dados referente a Temperatura horária do ar (°C) - Bulbo Seco. O tratamento do dado seguiu a lógica da variável vento horário (m/s), sendo preenchido os dados faltantes pela média do horário nos demais dias observados.

A Temperatura Bulbo Seco caracteriza-se, segundo INMET (2022), pela medida da temperatura do ar, a partir do termômetro de bulbo seco do psicrômetro, nas estações tradicionais, já nas estações automáticas refere-se a média da temperatura do ar.

A respeito da variável altura utilizou-se como parâmetro a altitude da cidade costeira em análise, uma vez que, conforme discutido, a viabilidade de projetos eólicos *offshore* estão relacionados a aproveitamentos eólicos situados entre 1 a 30 km da costa, a uma profundidade de cerca de 10 metros, conforme discutido por Santos (2013).

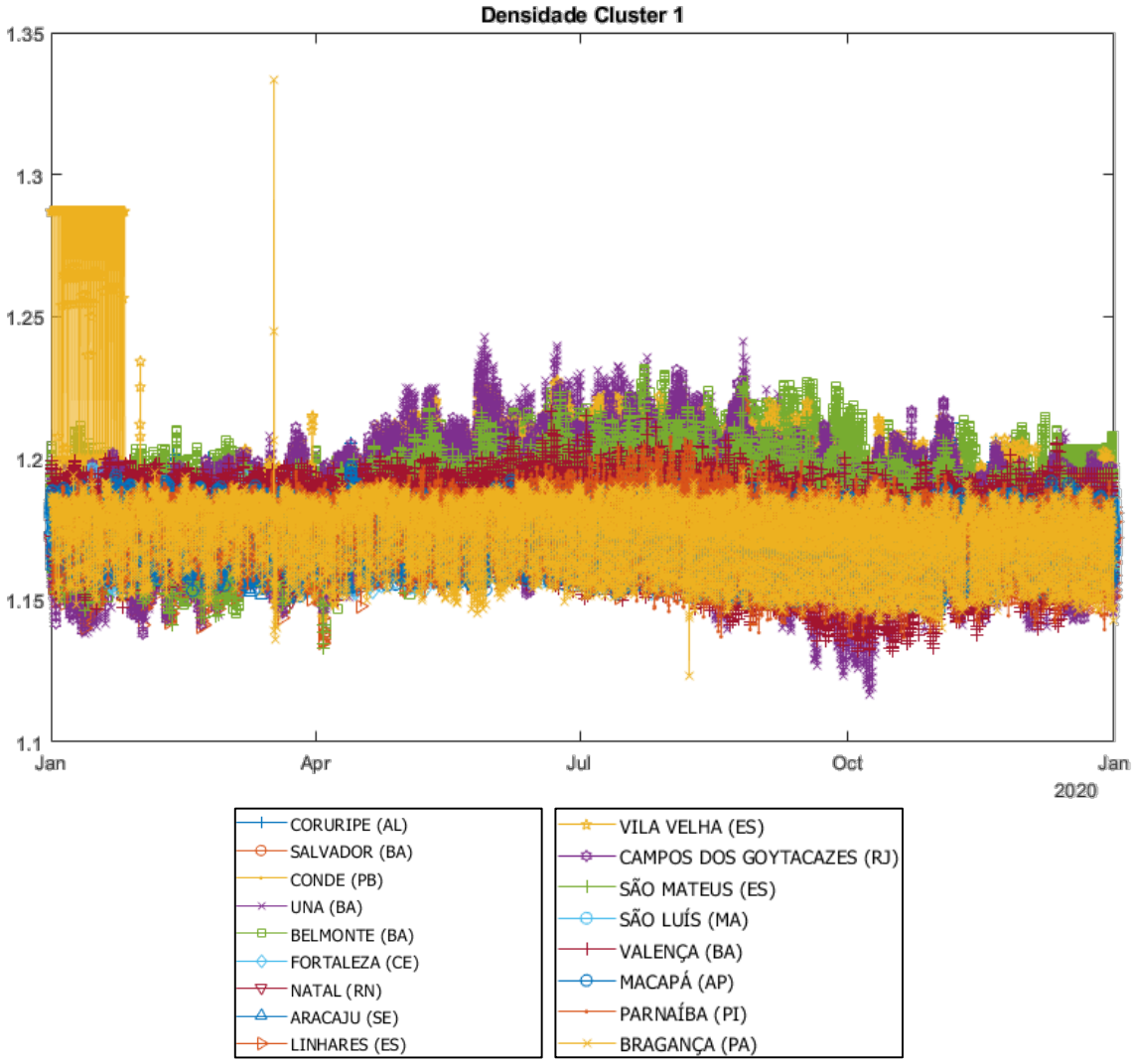
Assim, a média da altura entre as cidades analisadas foi de 12 metros, o que corrobora com a pontuação de Santos acerca da existência de baixa profundidade e proximidade da costa para a viabilização dos projetos eólicos.

Mediante aos parâmetros de altura e temperatura, aplicou-se a Equação 2, exemplificada na Tabela 1. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24, que destacam a variação da densidade, em uma escala horária, nas 33 cidades em análise no ano de 2020 subdivididas nos clusters encontrados no tópico anterior.

Na Figura 22 analisa-se a variação de densidade do Cluster 1, com dezessete cidades, podendo perceber uma variação entre os meses do ano, com variações semelhantes e sem grandes rupturas de um período a outro, com leves tendências de decrescimento no final do ano alinhadas as estações do ano, dado que a densidade é inversamente proporcional a temperatura.

Além disso, observa-se a cidade de Vila Velha (ES) com pontos fora da curva entre os meses de Janeiro a Julho, com estabilidade a partir do final do ano.

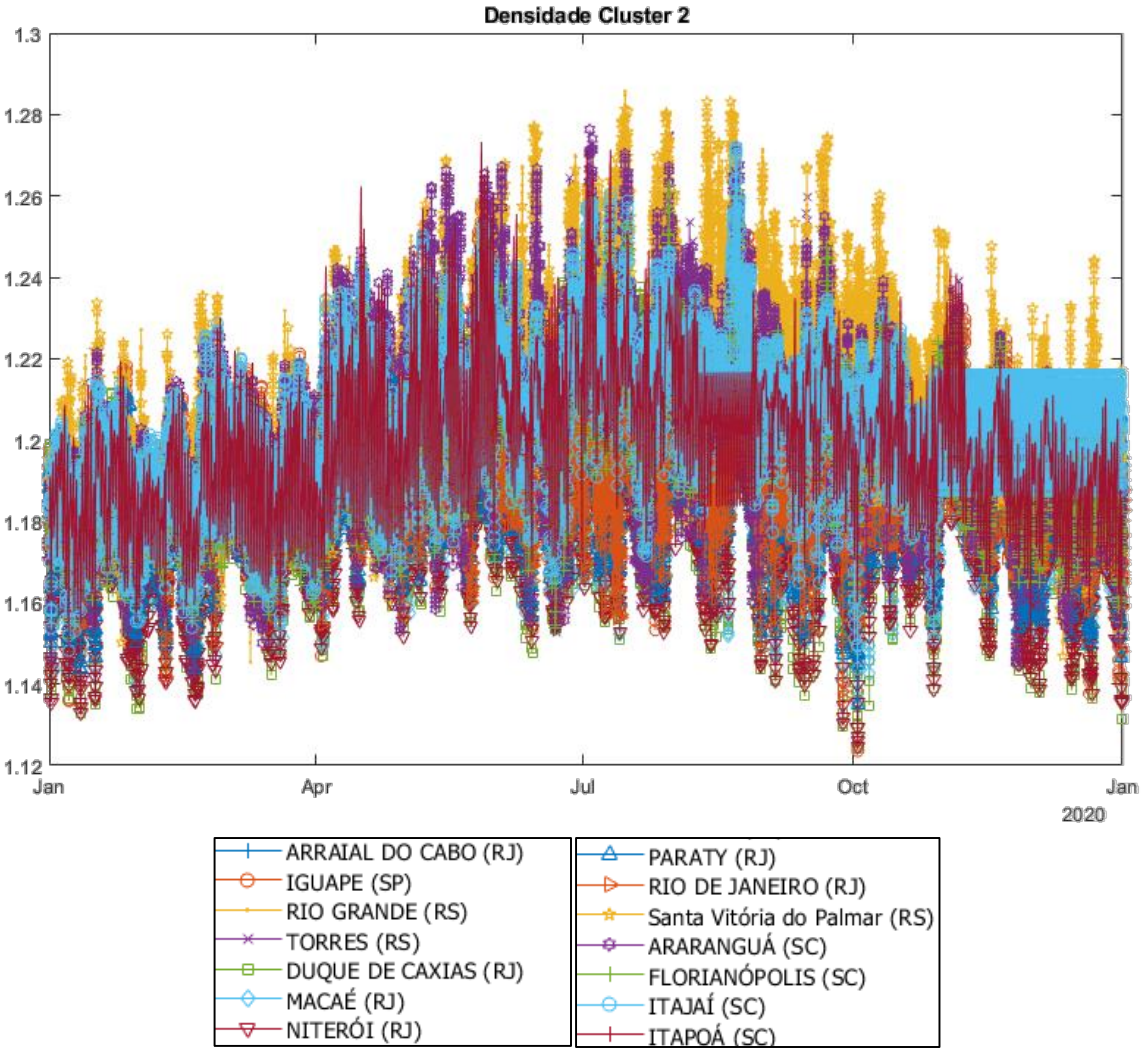
Figura 22 - Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 1 em análise no ano de 2020



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Dado a Figura 23 verifica-se a variação de densidade do Cluster 1 no ano de 2022 para quatorze cidades litorâneas. Assim como no Cluster 2, verifica-se uma variabilidade ao longo de todo o ano, com padrões de crescimento e decréscimo em meses próximos.

Figura 23- Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 2 em análise no ano de 2020

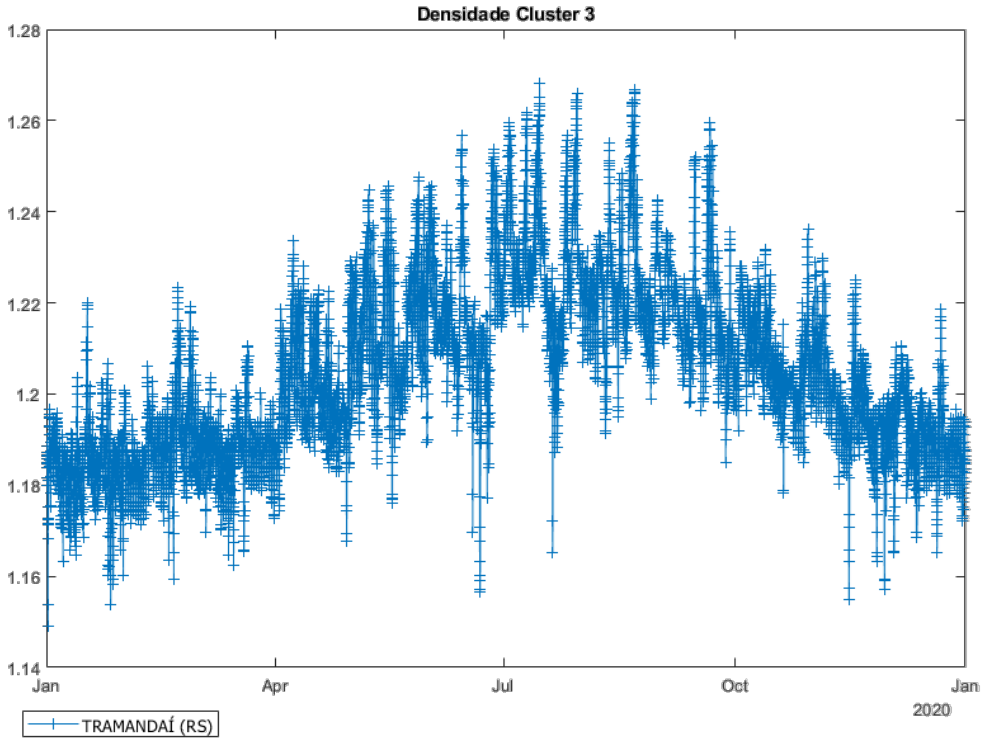


Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Ao gerar a curva para o Cluster 3 e Cluster 4, Figura 24 e Figura 25, respectivamente, avaliou-se um comportamento geral semelhante entre os agrupamentos, o que pode ser discutido pela perspectiva de tendência de temperaturas mediante aos meses, apesar de variações específicas de determinadas localidades que influenciam no percentual de crescimento pontual de cada cluster.

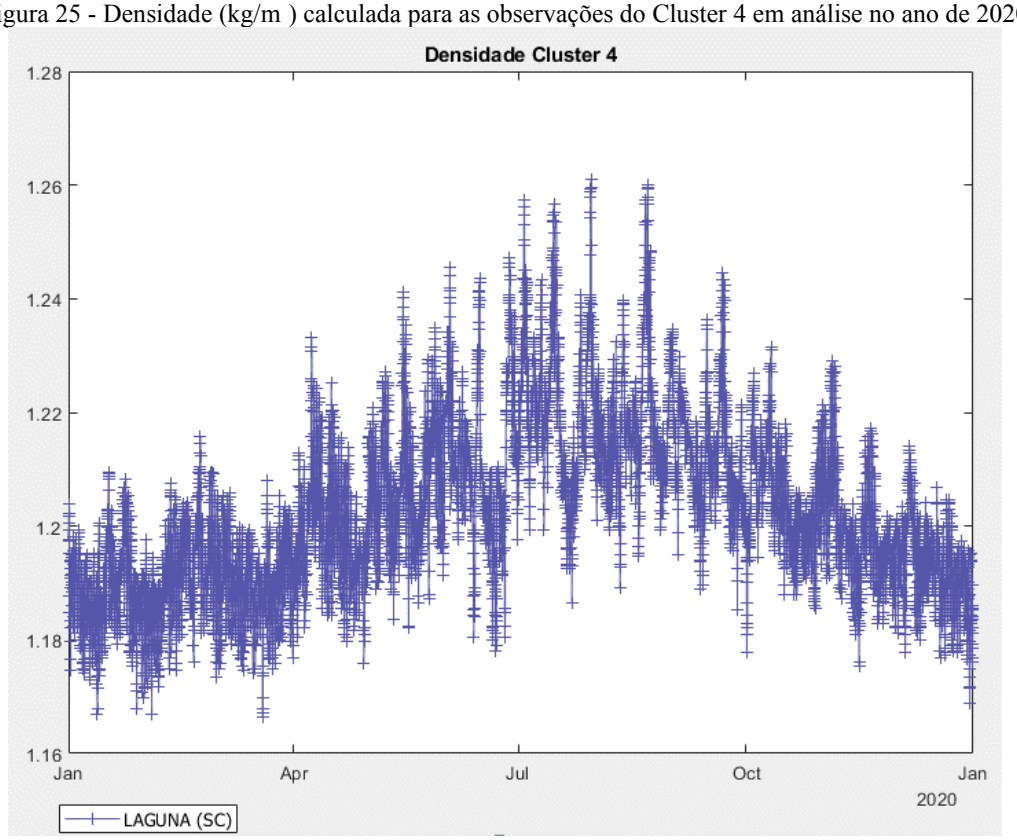
A semelhança tange na forma de curva que tendencia a densidades menores próximos ao verão (Dezembro a Março), com curvas crescentes próximas de Junho a Setembro (Inverno).

Figura 24 - Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 3 em análise no ano de 2020



Fonte: Elaboração da autora (2022)

Figura 25 - Densidade (kg/m) calculada para as observações do Cluster 4 em análise no ano de 2020

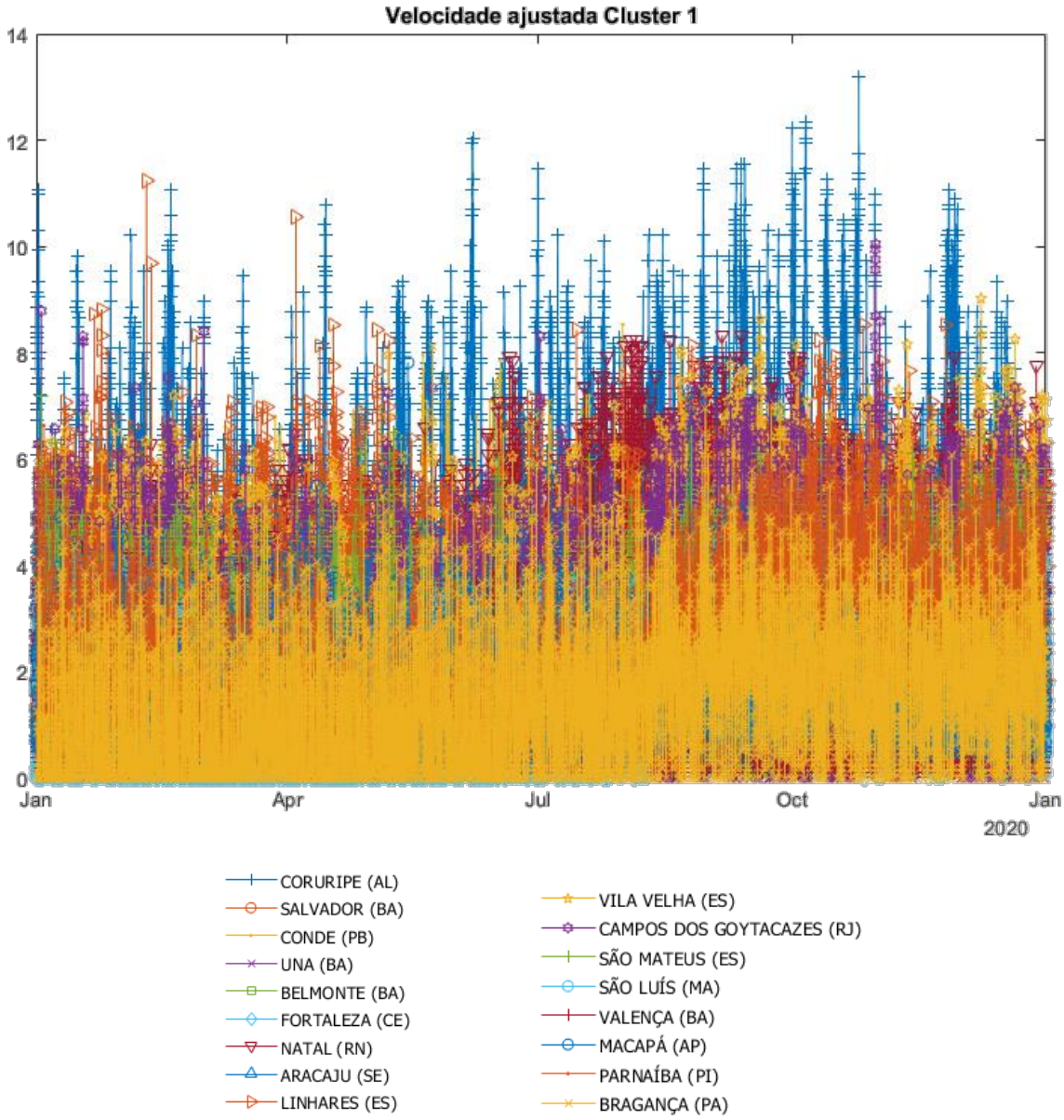


Fonte: Elaboração da autora (2022)

Com o foco de calcular a potência gerada por um aerogerador nas respectivas cidades foi necessário, anteriormente, aplicar o teorema logarítmico na velocidade observada, conforme Equação 1, presente na Tabela 1.

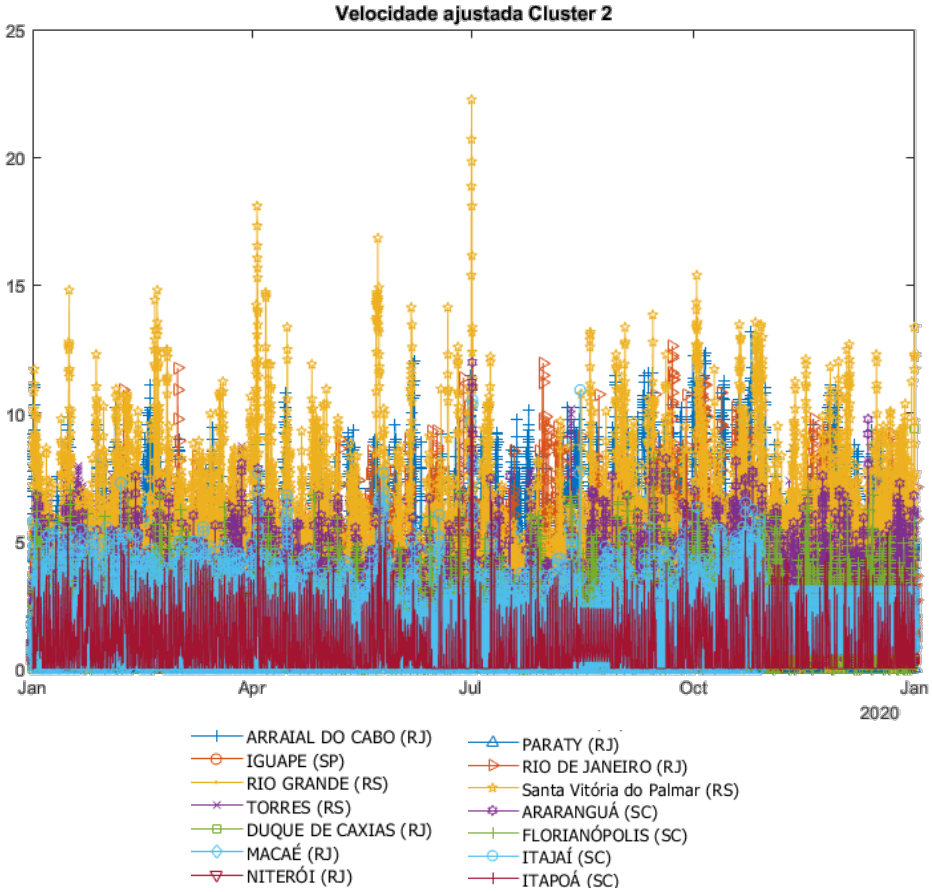
Assim, como parâmetros para o cálculo, padronizou-se um erro de 33% para cálculo da altura extrapolada verticalmente e um fator de rugosidade igual a 0,003. Os resultados apresentados assemelharam-se com a curva plotada para as velocidades das cidades, com desvio médio 4,1% de quando comparado aos dados originais. Os resultados estão segregados nos quatro clusters em análise, representados na Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29.

Figura 26 – Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020



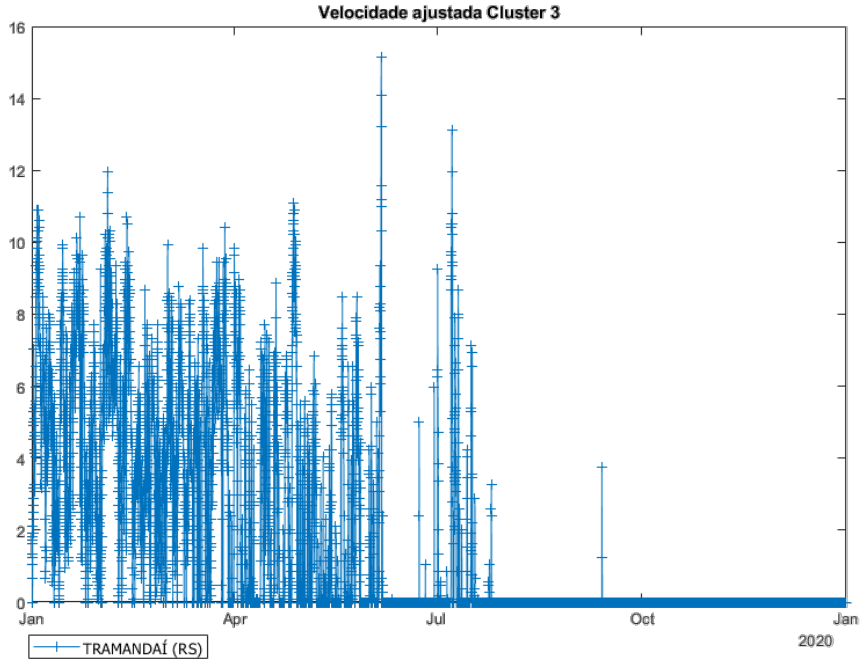
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 27- Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020



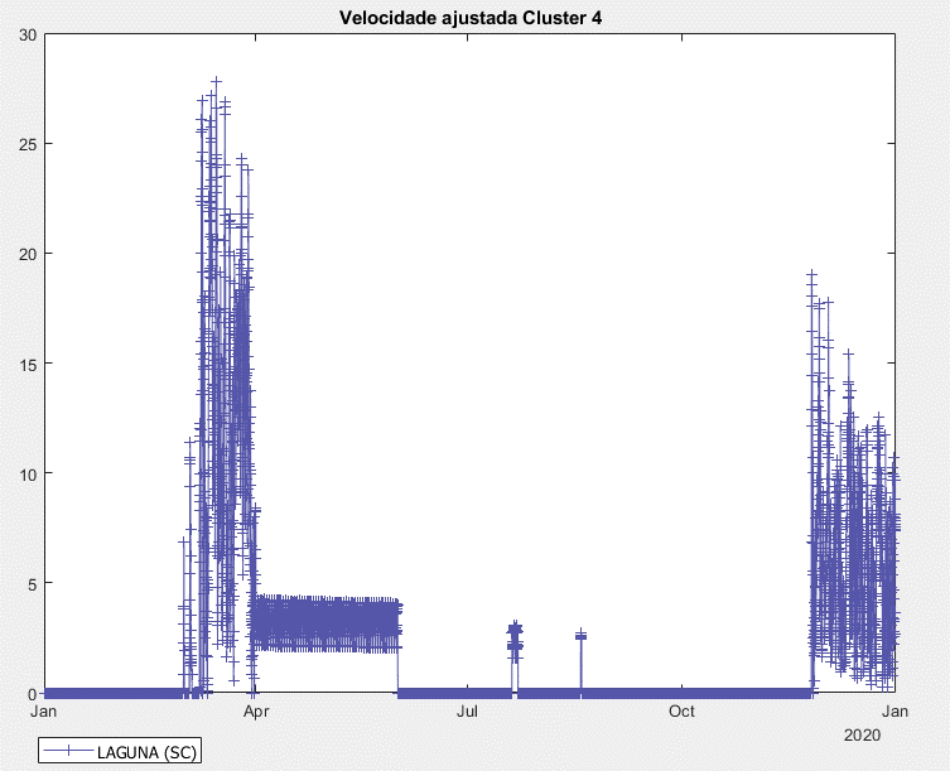
Fonte: Elaboração da autora (2022)

Figura 28 - Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020



Fonte: Elaboração da autora (2022)

Figura 29 - Aplicação da lei logarítmica na série temporal dos ventos horários (m/s) no *cluster* 1 em 2020



Fonte: Elaboração da autora (2022)

Diferentemente da análise aplicada para o comportamento dos clusters perante a curva de densidade do período de 2020, ao avaliar as curvas dos agrupamentos voltados para análise da velocidade ajustada no mesmo ano, observa-se que curvas que não tendenciam para um padrão geral em comum.

Com o cálculo das variáveis aplicou-se, então, a fórmula de Potência do aerogerador eólico, Equação 4 da Tabela 1, com Cp igual a 4, e Eg igual a 0,98.

Para a equação, tomou-se como base o modelo Siemens-Gamesa, descrito na Tabela 4, com diâmetro de 154 metros e potência máxima de 8MW, dado o diâmetro das pás, foi considerado uma área de varredura de 18267 metros.

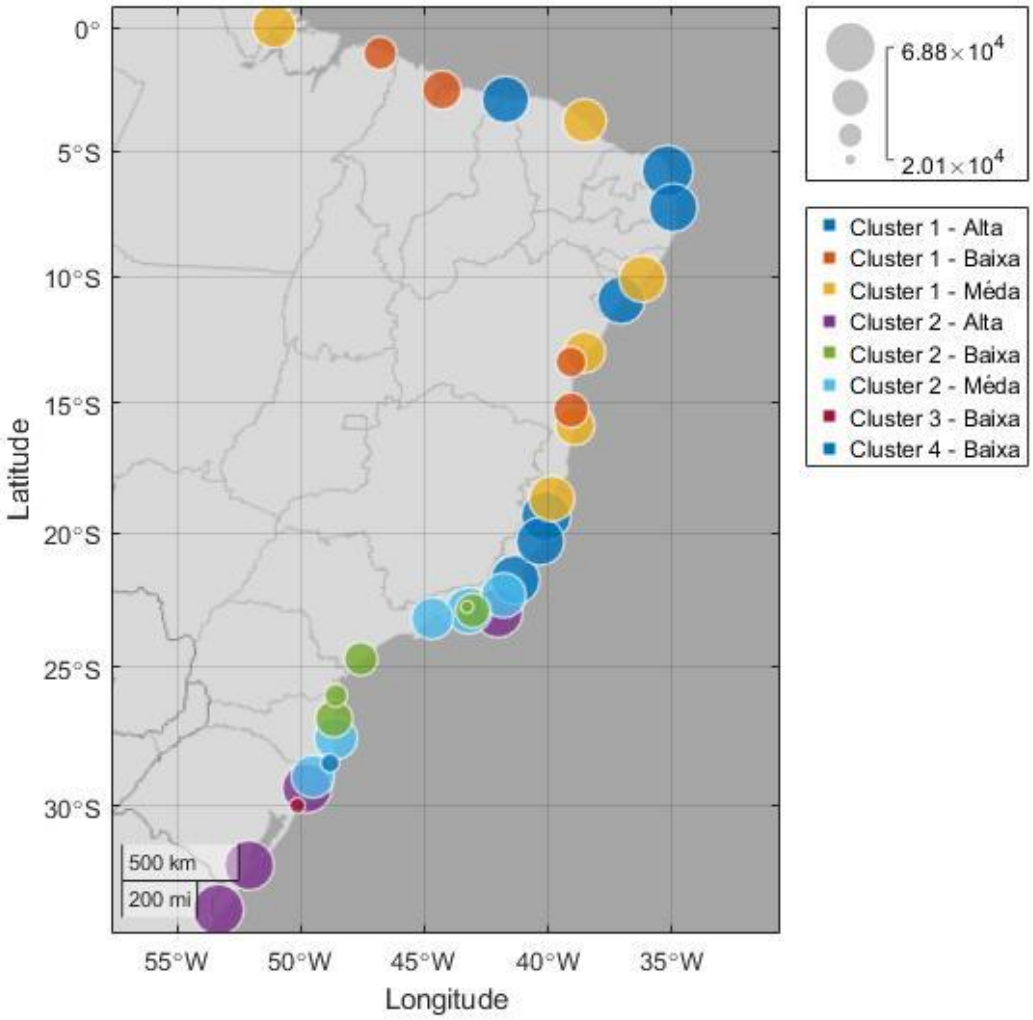
Mediante a aplicação da fórmula, foi realizada a plotagem do gráfico através do somatório da potência prevista horária para um aerogerador, em cada cidade, no ano de 2020. A Figura 23 detalha o potencial de geração anual dos aerogeradores localizados ao longo do litoral brasileiro, identificando três grupos:

- Alta geração: o grupo de alta geração refere-se aos onze aerogeradores com maior potência prevista para o ano de 2020.
- Média geração: o grupo de média geração é caracterizado pelas potências intermediárias entre a alta e a baixa geração.

- Baixa geração: o grupo de baixa geração refere-se às observações com menores potências previstas para o ano de 2020, com segmentação de onze dados.

Ao segregar a análise, relacionou-se os três grupos classificadores aos clusters obtidos no tópico anterior, calculando o somatório da potência máxima anual dos aerogeradores. O resultado encontrado está expresso através do *plot* geográfico apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Potência máxima de um aerogerador (MW) calculado para as cidades dos estudos



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Em vista da representação geográfica segregada nos grupos de análise e dos clusters encontrados, presente na Figura 30, pode-se observar determinadas hipóteses, tais como:

- Concentração dos ventos do Nordeste no cluster 1, com distribuição entre as classes Alta, Média e Baixa, enquanto, as cidades do Sudeste presente no cluster 1 apresentaram uma tendência a estar no grupo de Alta Geração;

- No cluster 2, observou-se uma distribuição estável em todos os grupos classificadores, tanto no Sudeste quanto no Sul. Com apenas uma cidade do Sudeste apresentando Alta Geração, e uma maior porcentagem de cidades do Sul com tal característica.
- No cluster 3 e 4, com apenas uma cidade do Sul em ambos, apresentou característica de Baixa Geração.

As observações levantadas a partir da análise geográfica e segregada pelos parâmetros, corroboram com a discussão levantada no Capítulo de Agrupamento, uma vez que se percebe uma diferença no comportamento entre uma classe e outra.

Por meio de um panorama integrado, ao verificar os resultados ilustrados na Figura 23, tem-se uma potência prevista em torno de 1.696 GW por ano, para os trinta e três aerogeradores espalhados um em cada cidade mapeada, o que atenderia cerca de 0,36% da demanda elétrica em 2020 que, segundo ANEEL (2022), foi de 475.640.467 MWh.

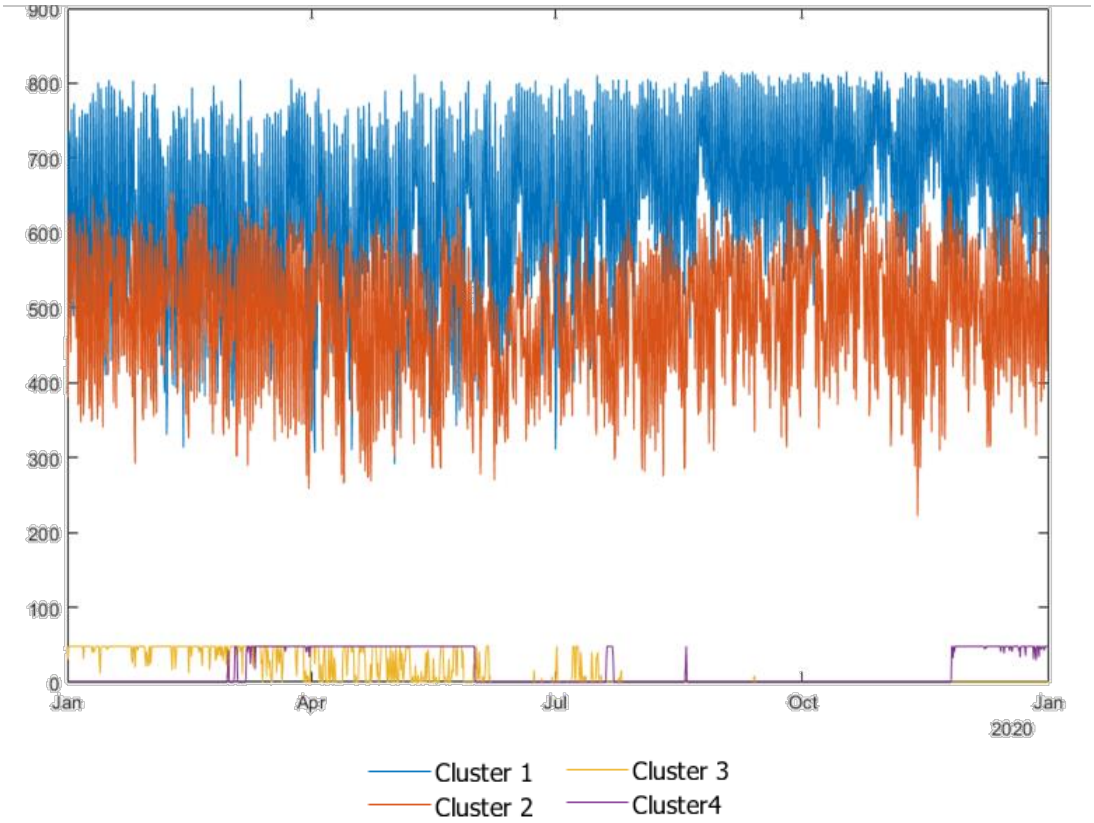
Entretanto, a análise do atendimento da demanda de forma anual pode induzir a riscos, uma vez que a energia eólica é uma energia intermitente, tendo característica de estabilidade a nível anual, com alta variação em menores escalas. Assim, para realizar a análise frente a minimização de riscos e avaliação da variabilidade em termos de períodos diários, tem-se a análise do efeito portfólio no capítulo subsequente.

4.3 ANÁLISE DO EFEITO PORTFÓLIO

Diante das discussões acerca do agrupamento das cidades baseadas no comportamento do vento médio coletado a partir dos dados do INMET com o ano base de 2020 torna-se viável avaliar o efeito portfólio ao agrupar tais análises.

Inicialmente, plotou-se a curva de geração de um aerogerador nas cidades agrupadas dos *clusters* encontrado no tópico anterior. Assim, foi somado a potência de dezessete aerogeradores funcionando de acordo com a curva de geração (Figura 10) referente a um ano para o Cluster 1, quatorze para o Cluster 2, um para o Cluster 3 e um para o Cluster 4.

Figura 31 – Geração (MWh/h) total modelada para os *clusters* em relação ao ano de 2020



Fonte: Elaboração da autora (2022)

No Cluster 1, é possível observar uma maior variabilidade entre os meses, o que vai de encontro com o que foi discutido anteriormente, uma vez que, o Cluster 1 configura-se, no modelo, com cidades do Nordeste, sendo apenas uma do Sudeste. Assim, torna-se necessário uma avaliação em termos de horários para verificação do atendimento a esta premissa do comportamento do vento anteriormente debatida por outros autores.

Já no Cluster 2, observa-se uma tendência de volatilidade ao longo do ano, com impacto entre os meses outubro e novembro, mas sem variações disruptivas. Enquanto o Cluster 3 apresentou variações no início do ano, com curva zerada no final e, o Cluster 4, apresentou uma curva com alta instabilidade anual.

Por meio da curva da Figura 30 tem-se, em termos de representatividade, uma maior participação do Cluster 1 para atendimento da demanda, isto também se assemelha com a participação *onshore* dado que a maioria das cidades presente em tal cluster é da região Nordeste, seguido do Cluster 2 e do Cluster 3. O Quadro 8 exprime o percentual da participação dos agrupamentos das usinas eólicas ao longo dos meses no período projetado, bem como o percentual da demanda não atendida em termos mensais.

Quadro 8 - Representatividade do cluster do atendimento demanda latente projetada

	REPRESENTATIVIDADE NO SUPRIMENTO			
	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER4
Jan	52,6%	43,5%	3,9%	0,0%
Fev	51,5%	44,6%	3,9%	0,0%
Mar	51,6%	41,8%	3,3%	3,3%
Abr	52,2%	41,4%	2,2%	4,2%
Mai	52,8%	41,5%	1,4%	4,3%
Jun	57,4%	42,2%	0,4%	0,0%
Jul	56,5%	42,6%	0,6%	0,4%
Ago	58,5%	41,4%	0,0%	0,1%
Set	57,6%	42,3%	0,0%	0,0%
Out	57,4%	42,6%	0,0%	0,0%
Nov	58,2%	41,1%	0,0%	0,7%
Dez	56,2%	39,9%	0,0%	3,8%
Média	55,4%	42,0%	1,1%	1,5%
Desvio	2,6%	0,9%	1,4%	1,7%

Fonte: Elaboração da autora (2022)

Por meio da Figura 31 observa-se o Cluster 1 com maiores gerações seguido do Cluster 2, com instabilidade na geração do Cluster 3 e 4. Tal comportamento foi corroborado ao avaliar o percentual de representatividade.

O Cluster 1, apresentou uma média de 55,2% de atendimento, tal índice teve certa constância aos longos dos meses da geração modelada para 2020, com maior desvio negativo em Fevereiro e Março, e maiores desvios positivos em Agosto e Novembro, o que indica o comportamento de estabilidade sazonal dos ventos do Nordeste discutido.

Já o Cluster 2, notou-se um percentual de 42%, tal valor indica um potencial a ser explorado, principalmente na região Sul do país onde pode ser observado altas gerações modeladas (Figura 30). Além disso, em termos de representatividade, teve o menor desvio ao longo dos meses, com 0.9%, o que exemplifica a curva de geração que, apesar de ter variações, o cluster não apresentou tendência acentuada.

O comportamento do Cluster 3 e do Cluster 4 foi semelhante, tendo gerações pontuais ao longo do ano com representatividade de 1.1% e 1.4%, respectivamente.

Com o intuito de visualizar as variações da geração eólica *offshore* modeladas em termos de períodos do dia nos meses do ano, elaborou-se o Quadro 9, em que foi calculado a variação entre um período e outro durante os meses. Foi considerado os seguintes intervalos

para os períodos: Madrugada de 00:00 às 05:59, Manhã 06:00 às 11:59, Tarde 12:00 às 17:59 e Noite de 18:00 às 23:59h.

Quadro 9 – Variação (%) entre os períodos em termos mensais para os clusters

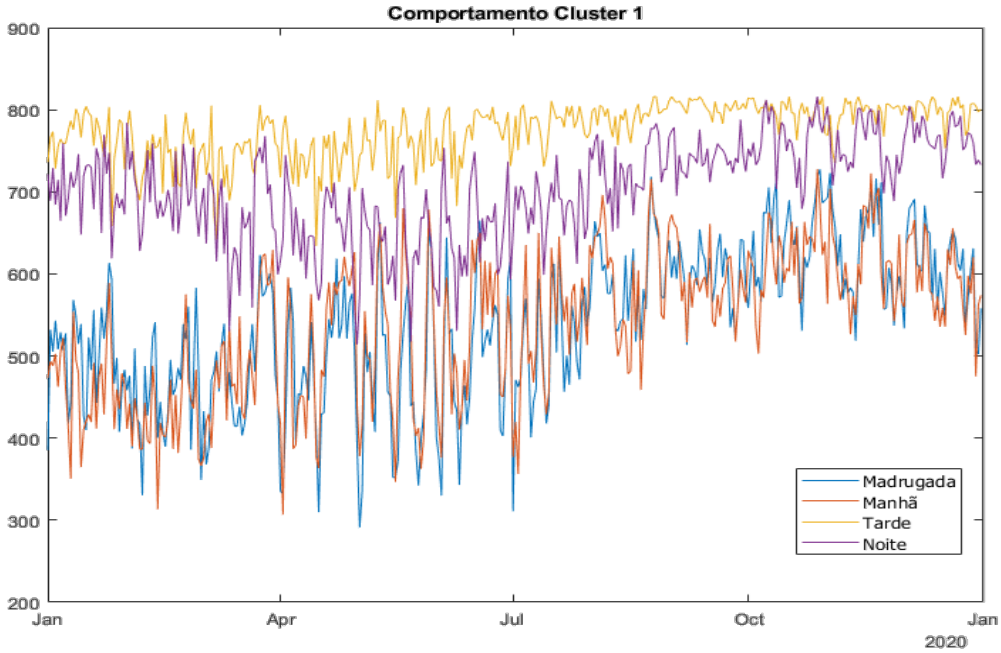
	MADRUGADA				MANHÃ			
	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
Jan								
Fev	-38,6%	-27,2%	-14,0%		-7,5%	-9,5%	-6,9%	
Mar	-26,5%	-23,5%	-14,5%	7444,4%	2,0%	-12,4%	-16,4%	-5,5%
Abr	-29,6%	-34,3%	-42,8%	16,1%	4,3%	-6,4%	-23,1%	0,0%
Mai	-25,5%	-25,3%	-55,9%	3,3%	7,7%	-2,6%	0,6%	0,0%
Jun	-24,4%	-25,7%	-75,1%	-100,0%	5,4%	-1,9%	-46,7%	
Jul	-19,3%	-10,7%	11,8%		4,4%	-3,4%	17,6%	12,5%
Ago	-12,1%	-21,0%	-100,0%	-100,0%	-0,8%	-1,1%		
Set	-20,4%	-21,6%		-100,0%	-1,8%	-4,1%	0,0%	
Out	-10,6%	-13,3%			-3,3%	-4,0%		
Nov	-20,8%	-31,6%			-1,4%	-4,4%		-6,7%
Dez	-16,6%	-23,4%		420,8%	-2,7%	-3,0%		-5,9%
MÉDIA	-22,2%	-23,4%	-41,5%	1083,5%	0,6%	-4,8%	-10,7%	-0,9%

	TARDE				NOITE			
	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
Jan								
Fev	74,2%	44,3%	15,7%		-6,1%	-2,7%	2,4%	
Mar	52,4%	63,3%	26,7%	4,5%	-10,6%	-1,3%	1,5%	4,5%
Abr	45,6%	58,8%	53,2%	0,0%	-11,8%	-6,1%	5,1%	0,0%
Mai	49,4%	45,3%	49,7%	0,0%	-15,9%	-7,2%	-5,1%	0,0%
Jun	47,1%	32,0%	94,7%		-15,7%	-6,2%	-19,4%	
Jul	47,5%	36,2%	81,3%	-11,1%	-12,8%	-8,3%	-31,3%	-11,1%
Ago	33,4%	46,7%			-8,1%	-5,8%		
Set	36,7%	38,3%	-100,0%		-7,8%	-5,6%		
Out	29,0%	36,3%			-4,7%	-4,8%		
Nov	29,0%	54,1%		7,1%	-5,3%	-6,3%		7,1%
Dez	35,4%	45,2%		7,7%	-4,1%	-6,7%		7,7%
MÉDIA	43,6%	45,5%	31,6%	1,4%	-9,4%	-5,6%	-7,8%	1,4%

Fonte: Elaboração da autora (2022)

Conforme identificado no Quadro 9, a geração eólica *offshore* apresentou variações positivas, principalmente, no período da tarde, sendo o período da madrugada e da manhã apresentando menores gerações. Para melhor visualizar o comportamento da curva de cada cluster em relação ao período do dia, foi plotado as curvas da geração (MW) de cada cluster nos períodos do dia (madrugada, manhã, tarde e noite), as curvas plotadas estão ilustradas na Figura 32, para o Cluster 1, Figura 33, para o Cluster 3, Figura 34, para o Cluster 3 e, Figura 35, para o Cluster 4.

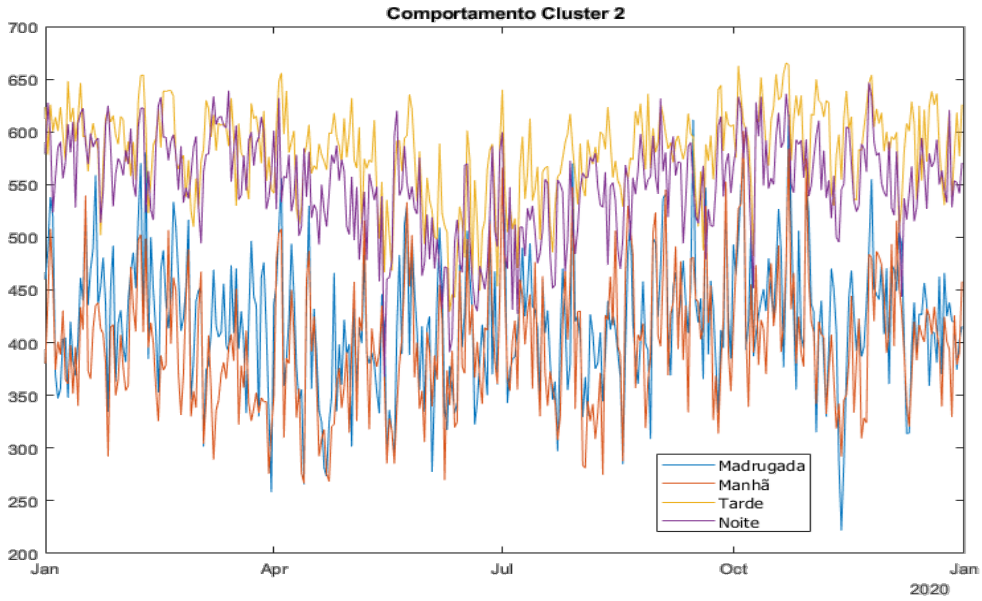
Figura 32 - Curva de geração (MW) do Cluster 1 nos períodos do dia



Fonte: Elaboração da autora (2022)

Mediante o Quadro 8 e a curva presente na Figura 31 observa-se que, em termos de variabilidade, o Cluster 1 apresenta maior variação nos meses iniciais, principalmente, entre Fevereiro e Junho o que corrobora para o perfil dos ventos discutidos, em que há uma maior instabilidade da curva com menores gerações entre Fevereiro e Março, com maior estabilidade no final do ano e maior geração no período da tarde e da noite. Para o Cluster 2 tem-se a Figura 33 abaixo.

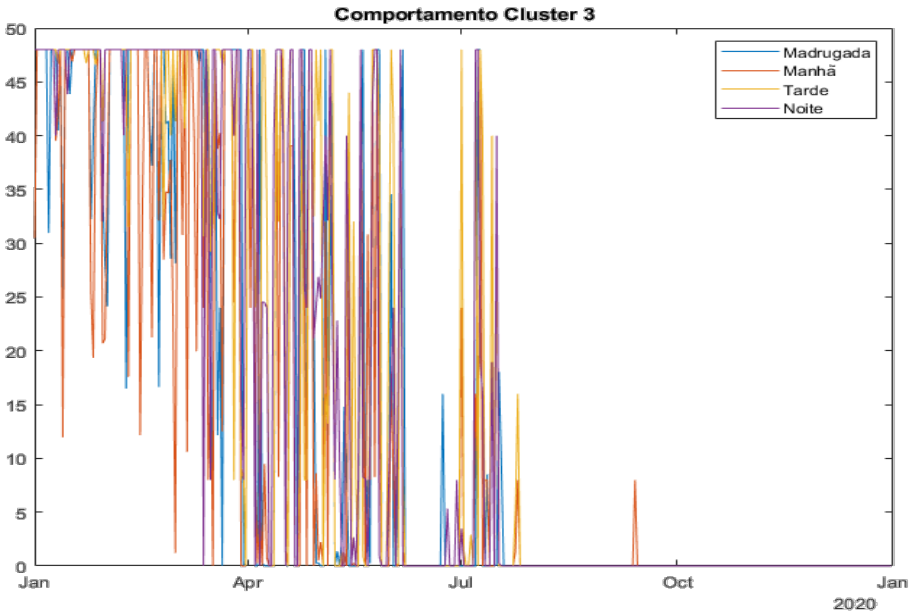
Figura 33 - Curva de geração (MW) do Cluster 2 nos períodos do dia



Fonte: Elaboração da autora (2020)

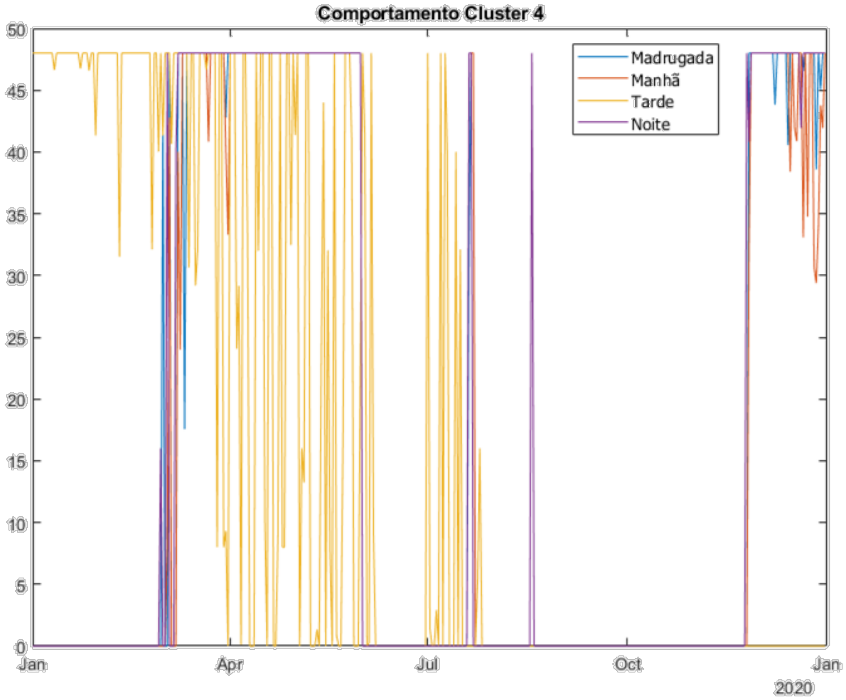
Já no Cluster 2, foi possível observar frequência de variações ao longo de todos os meses e períodos, entretanto, os percentuais não tiveram muita alteração entre si, tendo maiores gerações também no período da tarde e noite. Com o intuito de avaliar o Cluster 3 e o Cluster 4, tem-se a Figura 34 e a Figura 35.

Figura 34 - Curva de geração (MW) do Cluster 3 nos períodos do dia



Fonte: Elaboração da autora.

Figura 35 - Curva de geração (MW) do Cluster 4 nos períodos do dia



Fonte: Elaboração da autora (2022)

No Cluster 3, os percentuais foram afetados pela não geração nos últimos meses do ano. Demonstrando uma alta variação no início do ano, com gerações semelhantes ao longo do dia nos meses iniciais. Já a curva do Cluster 4, apresenta-se na Figura 35.

A curva do Cluster 4 apresenta instabilidade ao longo de todo o ano, com pontos em que ocorre a geração e outros em que a geração é nula, além disso, é possível observar que os percentuais de decréscimo ocorrem no período da manhã, tarde e noite e, apenas no período da madrugada, tem-se variações positivas.

Ao analisar os clusters, tem-se como direcionamento para avaliação do portfólio em termos de atendimento do suprimento projetado para o atendimento da demanda latente, assim, é possível verificar, no Nordeste em escalas anuais, com variações acentuadas em tempos menores. Além de um alto potencial de aproveitamento dos ventos do Sul do país, com instabilidades acentuadas nas cidades de Tramandaí e Laguna.

Já para a avaliação de complementaridade entre os clusters na busca por garantia de atendimento do suprimento, foram calculados três pontos: a variação mensal e a escala de geração, com a identificação de pontos que corroboram para a avaliação do efeito de portfólio. Os cálculos estão expressos no Quadro 10 a seguir.

No que tange a escala de geração tem-se uma relação crescente, uma vez que aumenta a escala aumenta o volume de geração. Assim, uma escala de 12 representa o mês em que o cluster teve a maior geração.

Mediante ao cálculo da variação mensal, observa-se diferenças no comportamento do Cluster 3 e Cluster 4 diante do Cluster 1 e 2 em todos os pontos, devido à grande diferenciação de sua curva.

Quadro 10 – Variação e escala de geração mensal para os agrupamentos para a projeção do período de 2021-2045

	VARIAÇÃO MENSAL				ESCALA DE GERAÇÃO			
	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
Jan					6	11	12	1
Fev	-10%	-6%	-5%		1	5	11	5
Mar	9%	2%	-8%	100%	5	8	10	9
Abr	-3%	-5%	-29%	20%	2	2	9	10
Mai	3%	2%	-37%	3%	4	3	8	12
Jun	0%	-7%	-79%	-100%	3	1	6	1
Jul	6%	8%	64%		7	4	7	7
Ago	9%	2%	-100%	-85%	10	7	1	6
Set	-3%	1%		-100%	8	9	5	1
Out	7%	8%			12	12	1	1
Nov	-4%	-9%			9	6	1	8
Dez	3%	3%		100%	11	10	1	11
Média	1,3%	-0,1%	-27,8%	-8,8%				

Fonte: Elaboração da autora (2022)

Como um panorama geral dos dados apresentados no Quadro 10, observa-se as menores gerações do Cluster 1 no início do ano, sendo que no mês de Fevereiro verificou-se uma escala de 1, o que indica a menor geração do ano. Em contraponto, o Cluster 2 apresenta gerações médias no início do ano, com Março representando a sétima maior geração.

Já no final do ano, a partir de julho e agosto, inverte o comportamento dos ventos, conforme discutido anteriormente. Os ventos do Cluster 1 tornam-se mais estáveis impactando, também, na curva de geração. Já o Cluster 2, tem maior variabilidade ao longo de todo o ano, não demonstrando um comportamento de crescimento nem decrescimento acentuado na curva, assim, no final do ano, o Cluster 1 apresentou escalas maiores, principalmente, no mês de Julho.

Nota-se, no Cluster 3, maiores escalas nos meses iniciais, o que também se relaciona com a curva de geração, uma vez que nos meses finais não apresenta geração, já no Cluster 4 as maiores curvas ocorrem no final do ano, apesar das instabilidades.

Assim, é possível verificar alguns meses de complementariedade entre o Cluster 3 e 4, como Janeiro, em que foi a maior geração do Cluster 3 sem geração do Cluster 4, Junho e Setembro em que o Cluster 3 apresentou as maiores gerações de sua curva e Cluster 4 teve curva nula ou com baixa geração e, nos meses de Agosto, Novembro e Dezembro, que o inverso ocorreu.

As análises realizadas tornam possível discutir o efeito de portfólio, uma vez que o comportamento dos ventos é particular entre os agrupamentos. Sobretudo, quando avaliado a escala de geração do Cluster 1 com o Cluster 3, além de pontos específicos entre o Cluster 1 e Cluster 2 e a relação entre o Cluster 3 e Cluster 4.

De tal maneira, discute-se o efeito de portfólio em termos de seguridade do atendimento da demanda latente nas projeções de demanda para o sistema elétrico entre os clusters tendo como um dos principais fatores a variabilidade entre os períodos do dia para tal avaliação, além de variações no comportamento do vento em determinados meses do ano.

4.3.1 Discussão dos resultados obtidos

O estudo envolvendo o tópico de geração eólica *offshore* buscou determinar, através do comportamento do vendo, os clusters entre diferentes cidades litorâneas a fim de avaliar o efeito portfólio para modelagem de pontos de inserção eólica *offshore*.

Para a avaliação do efeito portfólio, inicialmente identificou o agrupamento do comportamento do vento, variável diretamente ligada na potência máxima do aerogerador.

Assim, foi possível observar uma tendência do efeito de complementariedade no que tange a minimizar os riscos de falta de suprimento entre as cidades escolhidas no modelo linear principalmente quando avaliado em escalas ao longo dos meses devido a diferença do comportamento da curva do vento e das variações no início e no final do ano dos agrupamentos encontrados.

Mediante ao resultado encontrado, foi possível corroborar para as discussões trazidas a respeito da variabilidade eólica no curto prazo, com estabilidade ao longo do ano, com a identificação do comportamento dos *clusters* frente aos meses com maior tendência de diminuição dos ventos, Fevereiro e Março, e com maior estabilidade, Agosto e Setembro para o Cluster com maior representatividade no suprimento da demanda, o Cluster 1.

Como forma de análise geral do estudo, obteve-se os resultados voltadas paras o fluxo desenhado (Figura 19), com pontuações acerca de:

- Característica do clusters: as observações indicaram agrupamentos com cidades geograficamente próximas. Assim, teve-se bem delimitado as cidades no Nordeste e algumas do Sudeste próximas do Nordeste no cluster 1, com cidades do Sul e cidades do Sudeste com proximidade no cluster 2, com duas cidades do Sul com curvas *outliers* no Cluster 3 e Cluster 4.
- Definição das equações para cálculo da potência: a fim de projetar as curvas para os clusters encontrados equalizou as variáveis de densidade e velocidade ajustada. Para a densidade, foi possível delimitar a tendência da curvatura de acordo com as estações do ano, dado a proporcionalidade inversa a temperatura. Já para a curva de velocidade ajustado não foi possível visualizar claramente a tendência a partir dos gráficos de geração.
- Cálculo da geração modelada para aerogerador *offshore*: a curva de potência do aerogerador, utilizando parâmetros médios offshore, indicou curvas com perfis semelhantes ao que é visualizado para o Nordeste, com perspectivas de aproveitamento do estado do Sul.
- Efeito portfólio: para avaliação do efeito portfólio foi necessário destrinchar os dados a partir dos períodos do dia segregando a análise em escala de geração, representatividade e variação.

  Para o Cluster 1 foi verificado uma variação com acentuações de acordo com a estabilidade do vento esperado, com gerações em maiores escalas no final,

principalmente em Julho, com o inverso ocorrendo no início do ano, principalmente em meados de Fevereiro.

Já no Cluster 2, observou variações ao longo de todo o ano, complementando o Cluster 1 nos meses citados (Julho e Fevereiro). Enquanto o Cluster 3 e 4, apresentaram instabilidades ao longo do ano, apresentando certa complementariedade no que tange aos meses em que uma cidade está gerando e a outra está sem curva de potência projetada.

Os resultados obtidos frente aos objetivos traçados para o estudo foram realizados através de curvas aproximadas, uma vez que foram utilizadas bases para o litoral brasileiro, com possibilidade utilização do estoque para modelagem de usinas eólicas *offshore* através de bases na costa do litoral brasileiro.

5. CONCLUSÕES

As análises realizadas poderão agregam no estudo para inserção de usinas eólicas *offshore,* uma vez que a fonte se encontra em fase de maturação e de desenvolvimento tecnológico, no que tange a avaliação de locais para maximizar o atendimento do suprimento considerando menores escalas e o risco sistêmico.

No que tange ao risco sistêmico, o algoritmo de agrupamento possibilitou visualizar os comportamentos e agregações entre as regiões brasileiras, bem como o potencial latente no Sul.

Além disso, para realizar a projeção da curva de geração dos agrupamentos encontrados, o estudo modelou as curvas horárias através da aplicação das fórmulas de densidade e velocidade ajustada baseando nas premissas e variáveis envolvidas na geração, assim, poderá ser utilizado para adaptar a série proveniente da costa para possível implementações de parques eólicos *offshore*.

Para otimizar a aderência do modelo ao sistema elétrico brasileiro, poderia propor um estudo acerca da análise estocástica da fonte com projeções de probabilidade de geração frente a previsão de inserção de novas fontes.

Ademais, propõe realizar um modelo decisório de investimento considerando todos os custos embutidos na fonte eólica *offshore*, bem como as projeções de desenvolvimento tecnológico, as projeções de demanda e as projeções de geração.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. A. de. **Estabilidade em análise de agrupamento** (*cluster analysis*). Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco. Pernambuco, 2005.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. Disponível em <Informações de Geração - ANEEL>. Acesso em 11 de março de 2021.

ANON, J. **O que é a Rede Zero Carbono e qual a sua importância?.** Disponível em <O que é a Rede Zero Carbono e qual a sua importância? | ONU News>. Acesso em 11 de março de 2021.

ARAÚJO, B. P. de.; WILLCOX, L. D. **Reflexões críticas sobre a experiência brasileira de política industrial no setor elétrico.** BNDES Setorial 47, p. 163-220, 2018.

ARCE, P. E. B. **Aplicação da teoria de portfólio para otimização de carteiras de contratos de energia elétrica e gestão de riscos.** Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2014.

BARRETO, F. de M. **Mapeamento tecnológico da geração de energia eólica *offshore*.** 2019. 121f.: il. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BONNICI, T. S.; GALEA, D. ***PEST analysis***. *Wiley Encyclopedia of Management*, John Wiley & Sons, Ltd: 2014.

BUSSAB, W. DE O; MIAZAKI, E. S; ANDRADE, D. **Introdução à análise de agrupamentos.** São Paulo: Associação Brasileira de Estatística, 1990. 105p.

CAPELLI, A. **Energia elétrica:** qualidade e eficiência para aplicações industriais. 1. ed. -- São Paulo: Érica, 2013.

CARVALHO, D. E. de.; SUTTER, M. B.; POLO, E. F.; WRIGHT, J. T. C**. Construção de cenários:** apreciação de métodos mais utilizados na administração estratégica. XXXV ANPAD, 2011.

CARVALHO, D. E.; SUTTER, M. B.; POLO, E. F.; WRIGHT, J. T. C. Construção de cenários: apreciação de métodos mais utilizados na administração estratégica. In: Anais do XXXV EnANPAD - Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

CHAVES, L. I.; MURARI, C. A. F. **Uma Perspectiva para o Setor Elétrico Brasileiro** - Horizonte 2029. Revista Brasileira de Energia | Vol. 26, Nº 1, 1º Trimestre de 2020.

CISL, Confederazione Italiana Sindacati Lavoratori. ***A new climate for business:*** *Planning your response to the Paris Agreement on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge Institute for Sustainability Leadership,* 2016.

COLBURN, K.; GERHARD, J.; MOSKOVITZ, D.; SCHULTZ, R. ***Integrating Energy and Environmental Policy.*** *Regulatory Assistance Project* (RAP), 2013.

CRESESB, **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Eólica**. Disponível em <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&catid[]=1&catid[]=5>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

DNV (DET NORSKE VERITAS). DNV-RP-C205: ***Environmental Conditions and Environmental Loads.*** [s. L.]: Det Norske Veritas, 2010. 124 p. Disponível em: . Acesso em: 04 dez. 2019.

EDP. Eólicas em alto mar. Disponível em < https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/eolicas-em-alto-mar >. Acesso em 19 de dezembro de 2021.

ENERGY DATA. ***Global Wind Atlas***. Disponível em <Global Wind Atlas>. Acesso em 11 de março de 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília: MME/EPE, 2019.

___. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020

FEREIRA, E. M. da. S. **Energia Eólica Offshore:** Tratamento de dados e avaliação de aproveitamento em áreas de grande potencial no Brasil. 2019. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético.

FILHO, P. M. C. **Análise de modelos numéricos para cálculo dos parâmetros da Distribuição de Weibull**: estudo de caso para o campus do PICI da UFC. Trabalho de conclusão de curso, Gradução em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. 2013.

FURTADO, A. T. **Políticas de inovação no setor elétrico brasileiro**. Edufes, 2015.

FUTUREN. Completing a wind project. Disponível em <Completing a wind project | FUTUREN (futuren-group.com)>. Acesso em 11 de março de 2021.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002

GRYNING, S. E. ***Wind Energy***. Coursera: Universidade Técnica da Dinamarca (DTU). Notas de Aula, 2021.

HAIR, J. F. Jr.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J., ANDERSON, R. E., TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados.** 6ª Ed. Porto Alegre, Bookman: 2009.

HODGE, B. K. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. Rio de Janeiro, LTC: 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Municípios defrontantes com o mar**. Disponível em < https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/24072-municipios-defrontantes-com-o-mar.html?=&t=o-que-e>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

IEA, International Energy Agency. ***Renewable Energy Market Update****: Outlook for 2020 and 2021*. OECD Publishing. Paris: 2020.

___. ***Data and statistics***. Disponível em <Data & Statistics - IEA>. Acesso em 11 de março de 2021.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Históricos.** Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em 14 de fevereiro de 2022.

IRENA, *International Renewable Energy Agency.* ***Climate Change and Renewable Energy****: National policies and the role of communities, cities and regions (Report to the G20 Climate Sustainability Working Group (CSWG). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi,* 2019a.

_____. *Future of wind:* ***Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*** *(A Global Energy Transformation paper). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi,* 2019b.

JESUS, J. A. S. de. **Modelagem e controle do aerogerador síncrono usado no Aerogerador de três pás modelo AGW 110/2.1 para conversão de energia com velocidade de 4 m/s**. ISSN 2236-6717. Revista Científica Semana Acadêmica, 2018.

JOSEPH, Z. B.; GIFFORD, D. L.; JAAKKOLA, T. S. ***Fast optimal leaf ordering for hierarchical clustering.*** Bioinformatics Vol. 17 Suppl. 1 Pages S22–S29, 2001.

LEMBO, C. **Energia e o Sistema Multilateral de Comércio**. São Paulo: Atlas, 2015.

LIMA, M. A. F. B.; CARVALHO, P. C. M.; CARNEIRO, T. C. **Teoria do Portfólio aplicada à previsão de recurso Solar e Eólico.** VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2015. ISSN 2177-6164.

LUCON, O.; ROMEIRO, V. FRANSER, V. ***Bridging the gap between energy and climate policies in Brazil***. WRI, 2015.

MARTINS, G. A.; DOMINGUES, O. **Estatística geral e aplicada**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MIGUEL, F. K. **Aplicação da Teoria de Portfólio de Markowitz para a Geração de Energia Elétrica Proveniente de Empreendimentos Eólicos no Brasil.** 2016. 312 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Discussões para implementação da NDC do Brasil**. Disponível em <NDC do Brasil (mma.gov.br)>. Acesso em 11 de março de 2021.

NUNES, J. P. C. e. S. **Análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2020.

OLIVEIRA, V. A. **Estudo do mercado de energia elétrica no ambiente de contratação livre**. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. 2018.

PINTO, M. de. O. **Energia elétrica**: geração, transmissão e sistemas interligados. 1ª Ed. Rio de Janeiro : LTC, 2018.

PINTO, M. **Energia eólica**: princípios e operação 1ª Ed. São Paulo, Érica: 2019.

PORTAL BRASILEIRO DE DADOS ABERTOS. **Empresa de Pesquisa Energética** – EPE. Disponível em < https://dados.gov.br/organization/about/empresa-de-pesquisa-energetica-epe>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

Portal brasileiro de dados abertos. **Empresa de Pesquisa Energética** – EPE. Disponível em < https://dados.gov.br/organization/about/empresa-de-pesquisa-energetica-epe>. Acesso em 20 de fevereiro de 2022.

REIS, L. B. dos. **Geração de energia elétrica.** 2ª Ed. São Paulo: Manole, 2011.

ROADMAP. **Eólica *Offshor*e Brasil**: Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima. EPE, Brasília: 2020.

ROSA, F.; HAYDT, G. **Premissas para Inserção de Energia Eólica na Expansão do SIN.** Disponível em <https://cenarioseolica.editorabrasilenergia.com.br/2018/12/04/premissas-para-insercao-de-energia-eolica-na-expansao-do-sin/>. Acesso em 14 de fevereiro de 2022**.**

SAMANEZ, C. P. **Gestão de investimentos e geração de valor**. São Paulo, Pearson Prentice Hall: 2007.

SANTOS, M. A. dos. **Fontes de energia nova e renovável.** 1ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SILVA, G. R. Característica de vento da região Nordeste: Análise, Modelagem e Aplicações para Projetos de Centrais Eólicas. Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

SILVA, I. M. C. F.; SOUSA, A. de.; NETO, A. de. L. T.; NÓBREGA, F. A. da.; SOUZA, J. S. de.; LEÃO, A. **Eficiência energética na iluminação pública** – avaliação da eficiência de sistemas utilizando vapor de sódio, vapor metálico, led e aerogerador eólico em avenidas. Revista FENEC - 1(2): 276-285, setembro, 2017, 276.

TOLMASQUIM, M. T. **Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro.** Synergia, 2011.

UDOP, União Nacional da Bioenergia. **Energia eólica offshore entra no radar no Brasil e atrai Equinor e Neoenergia**. Disponível em <Energia eólica offshore entra no radar no Brasil e atrai Equinor e Neoenergia (udop.com.br)>. Acesso em 11 de março de 2021.

UNIC Rio, Centro de Informação das Nações Unidas no Brasil. **Acordo de Paris sobre o clima**. Disponível em <Acordo de Paris sobre o Clima | As Nações Unidas no Brasil>. Acesso em 13 de março de 2021.

WERAPUN, W., TIRAWANICHAKUL, Y. E WAEWSAK, J. ***Wind Shear Coefficients and their Effect on Energy Production***. Energy Procedia, vol. 138, p.1061–1066, 2017.

WRI Brasil, *World Resources Institute* Brasil. **O Acordo de Paris: Ponto Decisivo para uma Solução Climática.** Disponível em <O Acordo de Paris: Ponto Decisivo para uma Solução Climática | WRI Brasil>. Acesso em 11 de março de 2021.

WRI, *World Resources Institute*. ***World Greenhouse Gas Emissions:*** 2016. Disponível em <World Greenhouse Gas Emissions: 2016 | World Resources Institute (wri.org)>. Acesso em 11 de março de 2021.

YATES, R. D.; GOODMAN, D. J. **Probabilidade e processos estocásticos: uma introdução amigável para engenheiros eletricistas e da computação**. 3ª Ed. Rio de Janeiro, LTC: 2017.

ANEXO E – TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 02 de maio de 2022.

MARIANA AID RAMOS COSTA	201649040
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)	Matrícula
Mariana Aid Ramos Costa	128.924.206-28
ASSINATURA	CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.