



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDMAR ARAUJO SOARES

**ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTES
RENOVÁVEIS NA PARAIBA**

Orientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

JOÃO PESSOA

2023

EDMAR ARAUJO SOARES

**ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTES
RENOVÁVEIS NA PARAIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
apresentado ao corpo Docente do curso de
graduação em Engenharia Mecânica, da
Universidade Federal da Paraíba, como parte
dos requisitos necessários para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Sandro Marden Torres

ORIENTADOR

JOÃO PESSOA

2023

EDMAR ARAUJO SOARES

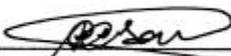
**ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTES
RENOVÁVEIS NA PARAIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
apresentado ao corpo Docente do curso de
graduação em Engenharia Mecânica, da
Universidade Federal da Paraíba, como parte
dos requisitos necessários para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

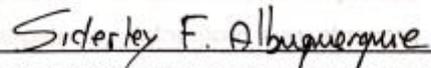
Prof. Dr. Sandro Marden Torres

Presidente da Banca - UFPB



Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

Examinador 1 - UFPB



Prof. Dr. Siderley Fernandes Albuquerque

Examinador 2 - UFPB

DEDICATÓRIA

Eu dedico este trabalho a minha mãe, Maria Aparecida Araujo da Silva, pela fé inabalável em meu potencial e por todo o sacrifício que feito para me proporcionar uma educação de qualidade. E ao meu filho que sempre estive presente nos momentos de alegria e nos desafios. Sua presença e incentivo tornaram esta jornada mais significativa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram de forma significativa para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sem o apoio, orientação e encorajamento de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço ao meu orientador/professor Sandro Marden Torres, pela orientação constante, pela paciência e pelo conhecimento compartilhado. Suas orientações críticas e valiosas foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional ao longo deste processo. Suas palavras de incentivo e compreensão nos momentos de estresse foram essenciais para me manter motivado.

Aos meus colegas de curso, em especial Aldo Ribeiro de Lima, Francisco Henrique Alves Nitão Barbosa, Jhadson Mendes de Oliveira e Herbert Melo Vieira por compartilharem conhecimento, experiências e amizades ao longo desta jornada acadêmica. Juntos, enfrentamos desafios e celebramos conquistas.

Agradeço também a todos os participantes da pesquisa, em especial a Ana Caroline Romão Ferreira Feitosa cujas respostas e contribuições foram fundamentais para a obtenção dos resultados deste trabalho.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC. Se esqueci de mencionar alguém, saibam que agradeço sinceramente a todos que tornaram este trabalho possível.

Muito obrigado a todos.

“A educação é o grande motor do mundo do desenvolvimento pessoal. É através dela que a filha de um camponês se torna médica, que o filho de um mineiro pode chegar a chefe de mina, que o filho de trabalhadores rurais se torna presidente de uma grande nação.”

Nelson Mandela.

RESUMO

Este presente trabalho tem como objetivo analisar o potencial e o impacto da geração de energia eólica na transição energética do Brasil, em especial no estado da Paraíba, destacando o crescimento das energias renováveis e a importância da energia eólica como uma fonte sustentável e promissora na região. A metodologia da pesquisa foi qualitativa, com coleta de dados sobre a expansão dos parques eólicos, o desenvolvimento da cadeia produtiva, os benefícios econômicos e ambientais, além dos desafios enfrentados. Os resultados apontam para um aumento significativo na capacidade de geração eólica, contribuindo para a redução das emissões de carbono e a diversificação da matriz energética. A Paraíba está se consolidando como um polo de energia limpa, impulsionando o desenvolvimento sustentável e a transição para um sistema energético mais verde. Conclui-se que a Paraíba possui um grande potencial eólico que pode ser explorado, contribuindo para a transição energética do país e garantindo um suprimento de energia mais limpa e sustentável. Portanto, a energia eólica tem um papel fundamental na matriz energética da Paraíba e representa uma alternativa promissora para o futuro do setor elétrico.

Palavras-Chave: Energia eólica, Transição energética, Energias renováveis no Estado da Paraíba, Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

This study aims to analyze the potential and impact of wind power generation in Brazil's energy transition, particularly in the state of Paraíba, highlighting the growth of renewable energies and the importance of wind power as a sustainable and promising source in the region. The research methodology was qualitative, involving the collection of data on the expansion of wind farms, the development of the production chain, the economic and environmental benefits, as well as the challenges faced. The results indicate a significant increase in wind generation capacity, contributing to the reduction of carbon emissions and the diversification of the energy matrix. Paraíba is establishing itself as a clean energy hub, driving sustainable development and the transition to a greener energy system. We conclude that Paraíba has significant wind potential that can be harnessed, contributing to the country's energy transition and ensuring a cleaner and more sustainable energy supply. Wind energy therefore plays a crucial role in Paraíba's energy matrix and represents a promising alternative for the future of the electricity sector.

Keywords: Wind energy, Energy transition, Renewable energies in the State of Paraíba, Sustainable development."

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz de Energia Elétrica	16
Figura 2 - Matriz de energia elétrica brasileira.....	17
Figura 3 - Matriz de energia elétrica brasileira.....	19
Figura 4 - Principais áreas promissoras para aproveitamentos eólicos na Paraíba	22
Figura 5 - Distribuição geral dos ventos.....	37
Figura 6 - Distribuição geral dos ventos.....	40
Figura 7 - Velocidade do vento X Vazão do Rio.....	41
Figura 8 - Complexo Chafariz	44
Figura 9 - Usina termoelétrica EPASA	46
Figura 10 - Complexo Solar Luzia.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de Geração Eólico dos Atlas Estaduais	20
Tabela 2 - Potencial de geração eólico offshore	21

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo de geração de energia no Brasil no ano de 2022 42

Gráfico 2 - Gráfico comparativo da quantidade de energia gerada na Paraíba
de cada fonte ao longo do tempo..... 43

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.2 ESTADO DA ARTE	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA	16
2.2 MARCO LEGAL	17
2.3 POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO	18
2.4 SISTEMAS DE CONVERSÃO	29
2.5 PREÇO ESTIMADO POR FONTE DE GERAÇÃO.....	36
2.6 PRINCIPAIS FABRICANTES	37
2.7 SUSTENTABILIDADE E ASPECTOS PÓS USO	38
3. METODOLOGIA	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5. CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	49

1.INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por energia elétrica está impulsionada pelo crescimento populacional, industrialização, urbanização, avanços tecnológicos, eletrificação de setores e busca por fontes mais limpas. Nos últimos anos, tem havido um aumento significativo nos investimentos em energias renováveis, em resposta às preocupações ambientais crescentes relacionadas aos métodos tradicionais de geração de energia.

A principal prioridade da indústria atualmente é atender a demanda crescente, concentrando-se no desenvolvimento de produtos e tecnologias para otimizar a eficiência e a confiabilidade dessas fontes renováveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o estado da arte acerca de um estudo sobre parques eólicos para geração e distribuição de energia elétrica no estado da Paraíba.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Descrever o atual estágio de transição energética no setor elétrico brasileiro.
2. Relatar a evolução do uso de energias eólicas no Brasil, e, em especial no estado da Paraíba, inclusive com a identificação dos marcos regulatórios pertinentes.
3. Investigar os fundamentos de conversão, sua capacidade e estabilidade da geração das energias alternativas paraibana.

1.2 ESTADO DA ARTE

De acordo com Cruz et al (2020), a demanda mundial por energia cresceu significativamente devido ao aumento populacional e ao desenvolvimento socioeconômico. E as fontes não renováveis de energia são a maior representatividade de geração e distribuição de energia no mundo, e por isso, vem buscando novas formas de tecnologia para substituí-las por fontes renováveis devido a sustentabilidade e limitações de recursos finitos.

Atualmente, a matriz energética elétrica brasileira é composta por grande parte pelas hidrelétricas, cerca de 60% de acordo com a Aneel (2023). Apesar das usinas hidrelétricas serem uma fonte renovável, elas precisam de períodos pluviais constantes para atender a demanda de energia elétrica, o que infelizmente não ocorrem em diversas áreas do país. Por isso, a necessidade de diversificar a matriz e procurar novas formas de geração e distribuição de energia com origens renováveis e sustentáveis, para atender a população.

Os parques eólicos estão gradualmente integrando a matriz energética nacional, refletindo uma crescente valorização das fontes de energia renovável. Progressivamente, as energias: eólica e solar estão desempenhando um papel cada vez mais significativo no contexto energético brasileiro, em resposta às necessidades associadas ao desenvolvimento sustentável.

Um dos principais desafios enfrentados pelo setor de energia renovável reside na grande variabilidade dos recursos energéticos naturais. Nesse contexto, torna-se extremamente relevante a avaliação do grau de flutuação anual desses recursos, o que se torna imperativo já nas etapas iniciais do projeto proposto.

Portanto, este trabalho realizou um estudo sobre parques eólicos para aumentar e diversificar a matriz elétrica do Estado Paraíba.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir.

O primeiro capítulo refere-se a uma abordagem introdutória sobre a pesquisa desenvolvida, a motivação que levou a fazê-la, os objetivos a serem alcançados, o estado da arte e a estruturação do trabalho.

No segundo capítulo refere-se à fundamentação teórica sobre os marcos regulatórios da geração de energia elétrica, dados da demanda de energia elétrica no Estado da Paraíba.

No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia empregada no desenvolvimento deste trabalho. Utilizou-se a metodologia de referências e qualitativa nesta pesquisa.

No quarto capítulo apresenta-se os resultados obtidos em forma de gráficos e tabelas e as respectivas discussões referentes aos resultados.

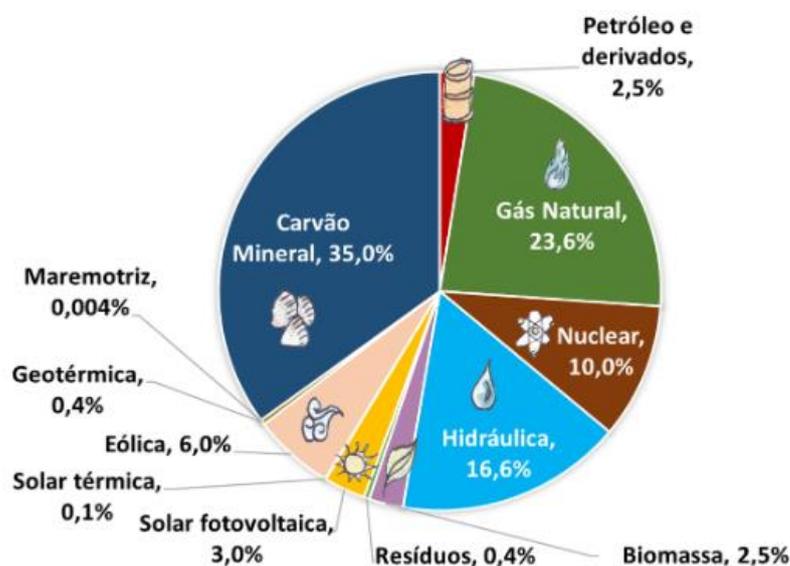
Por fim, no quinto capítulo apresenta-se os aspectos conclusivos da pesquisa e indicações para novos trabalhos a serem desenvolvidos posteriormente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA

De acordo com a EPE (2023) a maioria dos países possuem uma matriz elétrica composta por fontes não renováveis como o carvão, óleo, gás natural entre outros, como mostra a figura 1.

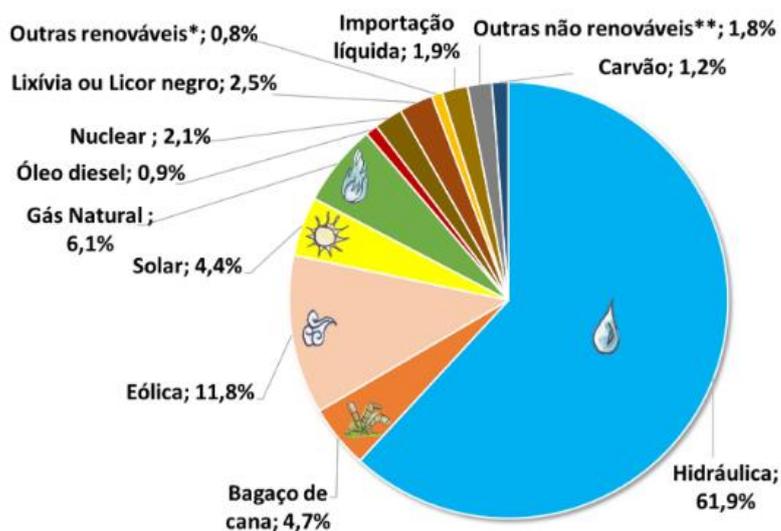
Figura 1 – Matriz de Energia Elétrica



Fonte: IEA (2022)

A matriz elétrica brasileira diferente de muitos países é composta em sua maioria por fontes renováveis, principalmente por hidrelétricas. Além disso, observa-se um crescimento substancial da capacidade de geração de energia eólica, o que fortalece a manutenção da predominância de fontes renováveis em nossa matriz elétrica, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Matriz de energia elétrica brasileira



Fonte: IEA (2022)

2.2 MARCO LEGAL

No Brasil, o desenvolvimento da energia eólica se deu a partir da busca por alternativas para a expansão da geração após a crise energética de 2001. A diversificação da matriz energética brasileira encontrou na eólica uma alternativa flexível, escalável e de rápido prazo de implantação (BNDS, 2018).

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, instituído pela Lei nº 10.438/2002, foi o primeiro ato legislativo fomentador da introdução das fontes renováveis na matriz energética brasileira, tendo como objetivo diversificá-la e, com isso, incrementar a segurança do suprimento. Desde então, esforços governamentais podem ser contabilizados com o objetivo de viabilizar o uso comercial da fonte eólica no Brasil (EPE, 2023).

Com o advento da Lei nº 10.848/2004, regulamentada pelo Decreto nº 5.163/2004, instrumentos legislativos que trouxeram o chamado “Novo Modelo do Setor Elétrico”, foi aberta a significativa oportunidade de a fonte eólica atender às distribuidoras por meio de participação nos leilões de energia no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), o que possibilitou aos

empreendedores das eólicas *onshore* maiores possibilidades de investimento, uma vez que os contratos celebrados com o atual pool de distribuidoras proporcionam uma receita favorável à obtenção de financiamentos para construção (EPE, 2020).

Atualmente, o Brasil ainda não tem parques eólicos offshore (no mar) em operação comercial, no entanto a energia eólica terrestre (onshore) está experimentando um crescimento significativo em todo o país. O que gera um grande interesse por expansão em novas áreas incluindo a marítimas, no entanto esse seguimento ainda não possui legislação.

2.3 POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

A avaliação do potencial eólico de uma região demanda um processo sistemático que envolve a coleta e análise cuidadosa de dados relacionados à velocidade e ao padrão dos ventos.

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (CRESESB, 2003 *apud* GRUBB e MEYER, 1993). Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 m.

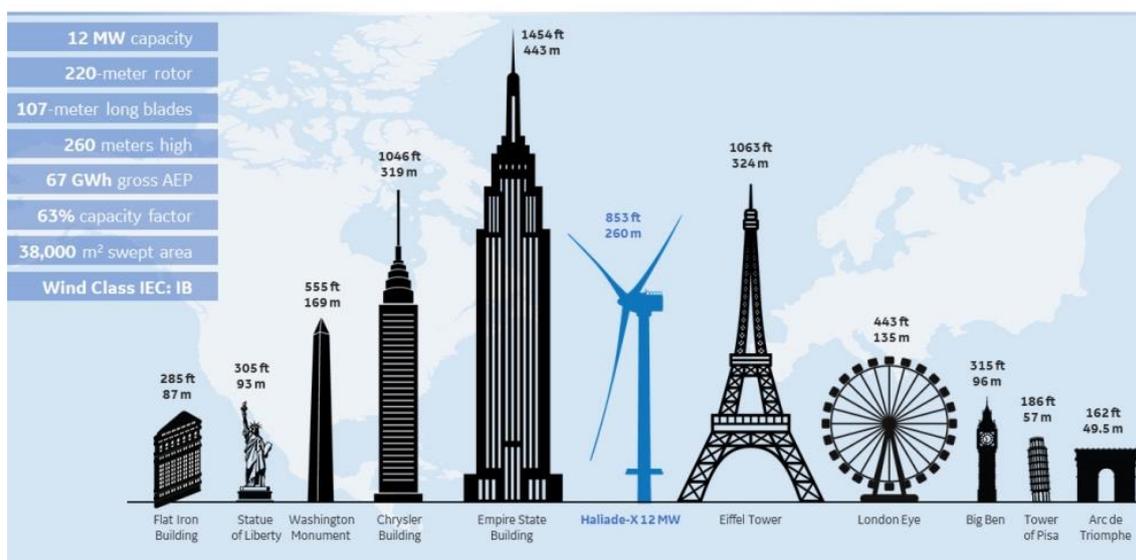
O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2001 e concebido para a altura de 50 metros (altura suficiente para as tecnologias dos aerogeradores da época), foi, sem dúvida, um importante marco para o desenvolvimento do setor eólico no Brasil. Porém, ao longo do tempo, a tecnologia de aerogeradores desenvolveu-se significativamente disponibilizando modelos de maiores potências e dimensões para operação em alturas mais elevadas, quando comparados aos modelos comercializados em 2001.

Por isso em 2017 foi lançado o novo Atlas Eólico Brasileiro que utilizou o modelo de mesoescala Brams (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) para estimar a velocidade e a direção

do vento em todo o país, para as alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 metros.

O potencial de geração de energia eólica está intrinsecamente ligado à altura das turbinas eólicas utilizadas. Estudos que consideram turbinas de até 200 metros de altura estão, de fato, ficando obsoletos diante dos avanços tecnológicos no setor. Atualmente, existem turbinas eólicas significativamente maiores em operação, como a Haliade-X da General Electric, que ultrapassa os 200 metros de altura como mostra a figura 3. Essas turbinas de última geração representam um avanço notável na eficiência da geração de energia eólica. Com a altura adicional, essas turbinas conseguem capturar ventos mais fortes e mais constantes, resultando em uma produção de eletricidade mais eficaz. O aumento da altura das turbinas permite acessar camadas mais altas da atmosfera, onde os ventos são mais consistentes, expandindo assim o potencial de geração eólica e melhorando a rentabilidade desses parques.

Figura 3 - Matriz de energia elétrica brasileira



Fonte: GE (2023)

Desde então, diversos estudos têm sido publicados sobre o potencial eólico, a maioria em nível estadual e seguindo cada qual seu próprio modelo técnico, refletindo o potencial à sua época de edição. Os resultados

indicam que o Brasil possui um enorme potencial eólico onshore a ser explorado.

Na tabela 1 mostra o potencial eólico de alguns estados brasileiros, com base do ano de 2020.

Tabela 1 - Potencial de Geração Eólico dos Atlas Estaduais

Estados	Data da Publicação	Potência Instalável (MW)			Energia Anual (GWh)		
	Altura	75m 80m* 70m**	100m	150m 140m*	75m 80m* 70m**	100m	150m 140m*
Alagoas	2008	336	649	n.d.	822	1.340	n.d.
Bahia	2013	38.600*	70.100	195.200	150.400*	273.500	766.500
Ceará	2019	23.144*	41.770	94.274	82.660*	153.065	362.162
Espírito Santo	2009	448	1.143	n.d.	1.073	2.397	n.d.
Minas Gerais	2010	24.742	39.043	n.d.	57.812	92.076	n.d.
Paraíba	2017	6.000**	14.700	42.100	23.690**	58.770	167.880
Paraná	2007	1.363	3.375	n.d.	3.756	9.386	n.d.
Pernambuco	2017	6.600*	10.725	20.830*	25.775*	42.100	84.159*
Rio de Janeiro	2002	1.524	2.813	n.d.	4.835	8.872	n.d.
Rio Grande do Norte	2003	19.431	27.080	n.d.	55.901	69.293	n.d.
Rio Grande do Sul	2014	n.d.	102.800	245.300	n.d.	382.000	911.000
São Paulo	2012	15	564	n.d.	48	1.753	n.d.
Total dos Atlas		122.203	314.762	597.704	406.772	1.094.552	2.291.701

Fonte: PNE 2050 (2021)

No que se refere ao potencial eólico marítimo, a EPE (2023) realizou um estudo utilizando dados de reanálises da base ERA5, que é disponibilizada pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Esta base contém informações horárias com uma resolução de 30 km para toda a Zona Econômica Exclusiva, abrangendo o período de 2000 a 2017. Os resultados estão apresentados na tabela 2 a seguir, e a conclusão é que o potencial, mesmo levando em consideração as incertezas associadas aos dados, é bastante significativo.

Tabela 2 - Potencial de geração eólico offshore

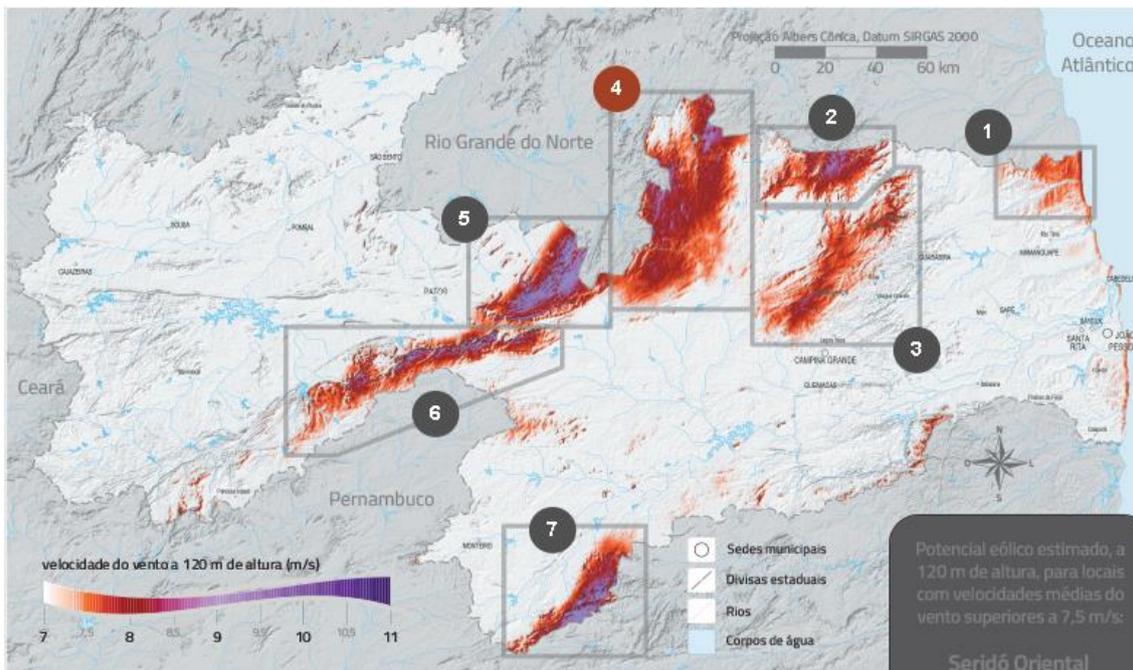
Velocidade (m/s)	Batimetria (m)							
	0-20	20-50	50-100	>100	0-20	20-50	50-100	>100
	GW				TWh			
>6.0	628	641	531	9.100	1.789	2.048	1.576	30.140
>6.5	522	591	467	8.420	1.582	1.949	1.450	28.793
>7.0	276	421	237	5.833	1.008	1.528	902	21.872
>7.5	129	209	159	4.014	566	890	667	16.101
>8.0	100	147	137	2.056	456	664	587	8.934
>8.5	63	81	87	993	308	398	383	4.612
>9.0	15	28	7	399	82	149	38	1.929
>9.5	3	2	1	11	16	12	3	63

Fonte: PNE 2050 (2021)

As análises não consideraram nenhuma restrição nas áreas exploráveis, como por exemplo áreas de proteção ambiental, rotas comerciais, rotas migratórias de aves, áreas de exploração de petróleo ou outras áreas com usos conflitantes. Por isso, estes resultados ainda são preliminares e o real potencial explorável poderá ser maior ou menor do que os dados apresentados acima.

Em relação ao Estado da Paraíba o mapeamento eólico evidenciou sete áreas distintas de relevante potencial, indicadas na figura 4, no qual vamos detalhar os principais aspectos de cada área.

Figura 4 - Principais áreas promissoras para aproveitamentos eólicos na Paraíba



Fonte: Mapa Eólico (2023)

- **ÁREA 1: MATARACA**

De acordo com mapa eólico (2023), a região localizada no Litoral Norte do Estado, acessível através da BR-101 a 104 km de João Pessoa. O potencial eólico está concentrado em Mataraca e Rio Tinto, com uma população urbana predominante de 30.383 habitantes e um PIB combinado de 172,7 milhões de reais. A topografia da região é caracterizada por terrenos de baixa complexidade, com falésias e dunas no litoral, planícies no interior e uma altitude média de 40 metros, principalmente dedicados ao cultivo de cana-de-açúcar. Além disso, existem três comunidades indígenas, cinco unidades de conservação e áreas destinadas a assentamentos rurais nas proximidades das áreas de maior potencial.

A área é atendida por três subestações da Energisa, atual concessionária de energia do Estado da Paraíba, que também servem como pontos de conexão para os parques eólicos existentes, totalizando 63 MW de capacidade instalada, com a energia sendo transmitida por linhas de 69 kV.

A avaliação da região considera uma velocidade média anual do vento de aproximadamente igual a 7,38 m/s e com altitude de 101,6 metros.

Portanto, a 120m de altura, para locais com velocidades médias do vento superiores a 7,5m/s o potencial eólico estimado em Mataraca é de 317 MW.

- *ÁREA 2: CURIMATAÚ*

A região situada ao norte das microrregiões do Curimataú Ocidental e Oriental, localizada a uma distância de 177 km de João Pessoa. Nessa área, o potencial eólico abrange diversos municípios, como Araruna, Cuité, Damião e Cacimba de Dentro, com uma população total de 60.505 habitantes, sendo aproximadamente metade dessa população residente em áreas urbanas, e apresentando um PIB combinado de 295,2 milhões de reais (Mapa Eólico, 2023).

De acordo com o mapa eólico (2023), a topografia da região é caracterizada por sua complexidade, com áreas montanhosas, afloramentos rochosos e planaltos, predominantemente utilizados para a agricultura familiar, e ainda com extensões de caatinga arbórea, sobretudo em Cuité. A região é servida por duas subestações da Energisa, localizadas em Araruna e Cuité, interligadas à rede de 69 kV. Além disso, existem alternativas de interconexão por meio das subestações Dona Inês e Paraíso, situadas no Estado do Rio Grande do Norte, também operando em 69 kV. A região também é cortada por linhas de transmissão de 138 e 230 kV da CHESF, localizadas em Cuité. Adicionalmente, está prevista uma futura interconexão em 500 kV entre a subestação Campina Grande III e a subestação Ceará Mirim 2 (RN), com um traçado provável que passa pela Serra de Araruna.

Levando em consideração a velocidade média anual do vento avaliada na torre Damião é aproximadamente de 8,08 m/s a 101,6 metros de altura, assim a região exibe um substancial potencial eólico.

Portanto, a 120m de altura, para locais com velocidades médias de vento superiores a 7,5m/s o potencial eólico estimado em Curimataú é de 959 MW.

- **ÁREA 3: SERRA DA BORBOREMA**

Localizada entre as microrregiões de Esperança e Brejo Paraibano, distando 166 km de João Pessoa. O potencial eólico abrange diversos municípios, incluindo Pocinhos, Puxinanã, Montadas, Areial, Esperança, Remígio, Algodão de Jandaíra, Casserenguê, Arara, Solânea, Bananeiras, Dona Inês e Areia, que somam uma população de 195.098 habitantes, sendo 60% dela residente em áreas urbanas. O PIB combinado desses municípios totalizou 1,08 bilhão de reais (Mapa eólico, 2023).

A topografia da região varia desde planaltos de média complexidade ao sul até regiões montanhosas ao norte. Existem áreas de afloramento rochoso e extensões de caatinga arbórea, características típicas do agreste da Paraíba. Além disso, é observado o fracionamento em lotes em várias áreas desses municípios, com utilização voltada para a agricultura e pecuária. Também há áreas destinadas a assentamentos rurais.

A região é atendida por cinco subestações da Energisa, localizadas em Dona Inês, Bananeiras, Pilões, Areia e Esperança, interligando-as à rede de 69 kV, também operada pela Energisa. Há ainda alternativas de interligação por meio das subestações Campina Grande I e II, operando em 230 kV. Além disso, a região é cortada por linhas de transmissão de 138 e 230 kV da CHESF. Por fim, está prevista uma interligação em 500 kV entre a futura subestação Campina Grande III e a subestação Ceará Mirim 2 (RN), com um traçado provável passando pela microrregião do Brejo Paraibano.

De acordo com o modelamento deste estudo a velocidade média anual do vento é de aproximadamente 8,5 m/s a 120 metros de altura. Assim, a 120m de altura, para locais com velocidade média de vento superiores a 7,5m/s o potencial eólico estimado em Serra da Borborema é de 1.475 MW.

- **ÁREA 4: SERIDÓ ORIENTAL**

Situada na microrregião do Seridó Oriental, a região possui como principal acesso a PB-177, que a atravessa no sentido Norte-Sul, contando também com outras importantes ligações rodoviárias, tais como as PB-137, PB-151 e PB-167. As principais cidades da região são Picuí (a 244 km da capital) e Juazeirinho (a 217 km). O potencial eólico abrange municípios como Baraúna, Frei Martinho, Nova Palmeira, Pedra Lavrada, Cubati, Seridó, Tenório e Nova Floresta, resultando em uma população total de 84.429 habitantes, sendo 60% dela residente em áreas urbanas. A soma do PIB desses municípios alcançou 412,0 milhões de reais (Mapa eólico, 2023).

A geografia da região é caracterizada pelo Planalto da Borborema, apresentando elevações predominantes acima de 500 metros, com variações de terreno que incluem áreas planas e serranas. A paisagem da região é marcada por áreas intensamente ocupadas, com poucas extensões de caatinga remanescentes. Além disso, foram identificadas áreas destinadas a assentamentos rurais.

A região é servida por três subestações da Energisa, situadas em Pedra Lavrada e Juazeirinho, conectando as localidades à rede de 69 kV. Existem outras opções de interligação, incluindo a SE Cuité e a SE Currais Novos, esta última operando em 230 kV e localizada no estado do Rio Grande do Norte. Já na região, estão cadastrados projetos eólicos de acordo com a ANEEL com capacidade total de 205,2 MW para futura instalação, todos localizados no município de Picuí.

Quanto à expectativa de vento médio anua varia entre 8,5 e 9,0 m/s nas áreas mais promissoras, a uma altura de 120 metros. Medidas de vento obtidas na torre instalada em Juazeirinho indicam uma expectativa de longo prazo de 6,68 m/s a uma altura de 101,5 metros.

Portanto, a 120m de altura, para locais com velocidade média de vento são superiores a 7,5m/s o potencial eólico estimado em Seridó Oriental é de 3.989MW.

- **ÁREA 5: SERIDÓ OCIDENTAL**

Inserida na microrregião do Seridó Ocidental é localizada nas proximidades da cidade de Santa Luzia, que é o centro da região, está situada a 267 km de João Pessoa. O potencial eólico abrange os municípios de São José do Sabugi, Santa Luzia, Junco do Seridó, São Mamede, Areia de Baraúnas, Passagem e Quixabá, totalizando uma população de 38.979 habitantes, concentrada predominantemente nas respectivas áreas urbanas. O PIB combinado desses municípios alcançou 218,5 milhões de reais.

A topografia da região é complexa, caracterizada pelo relevo da Serra da Borborema, onde prevalece a cobertura de caatinga arbórea, com poucas áreas de intervenção humana.

A região é atendida pela subestação de Santa Luzia e por uma linha de transmissão em 69 kV que atravessa sua porção nordeste, paralelamente à rodovia BR-230. Possíveis pontos alternativos de conexão incluem as subestações de Pedra Lavrada, Juazeirinho, Patos e Teixeira.

De acordo com o modelamento realizado durante este estudo, a expectativa para o vento médio anual atinge até 9,5 m/s nas melhores áreas, a uma altura de 120 metros.

Portanto, a 120m de altura, para locais com velocidade média do vento superior a 7,5m/s o potencial eólico estimado em Seridó Ocidental é de 1.452MW.

- **ÁREA 6: SERRA DO TEIXEIRA**

Localizada na microrregião da Serra do Teixeira, senso a cidade central Teixeira, distante 310 km da capital. O potencial eólico se estende pelos municípios de Jurú, Água Branca, Imaculada, Catingueira, Mãe d'Água, Maturéia, Teixeira, Cacimba de Areia, Cacimba e Taperoá, abrangendo uma população de 84.857 habitantes, com metade dela vivendo em áreas rurais. O PIB combinado desses municípios totaliza 396,6 milhões de reais.

A geografia da região é caracterizada principalmente por serras de alta complexidade, com altitudes variando entre 500 e 1.000 metros, bem como áreas de planaltos de média complexidade. A paisagem é definida por extensões de caatinga arbórea e áreas dedicadas à agricultura. No centro da região encontra-se o Parque Estadual Pico do Jabre, que inclui ainda áreas destinadas a assentamentos rurais.

A subestação de Teixeira é um dos pontos de conexão à rede de 69 kV da Energisa na área, com alternativas que incluem as subestações de Piancó e Patos. A região já possui projetos eólicos cadastrados na ANEEL, totalizando 56 MW de capacidade para futura instalação, localizados no município de Teixeira.

Com base na expectativa de vento médio anual de longo prazo no local da torre Teixeira, que foi utilizada na avaliação da região, a velocidade média do vento é de 6,88 m/s a uma altura de 101,5 metros.

Portanto, a 120m de altura, para locais com velocidade média de vento superiores a 7,5m/s o potencial eólico estimado em Serra do Teixeira é de 1.236MW.

- **ÁREA 7: SÃO JOÃO DO TIGRE E CAMALAU**

Situada na microrregião do Cariri Ocidental, no sul do Estado, o potencial eólico concentra-se nos municípios de São João do Tigre e Camalaú, com este último localizado a 302 km de João Pessoa. A população residente nesses dois municípios é de 10.145 habitantes, dos quais 60% vivem em áreas rurais. O Produto Interno Bruto (PIB) combinado alcançou 49,8 milhões de reais.

A topografia da região é de alta complexidade devido à presença da serra que marca a fronteira com o Estado de Pernambuco, caracterizada por afloramentos rochosos, cobertura de caatinga e baixo grau de intervenção humana, devido às limitações de acesso. A região abriga a Área de Proteção Ambiental (APA) das Onças, abrangendo a maior parte das áreas com relevante potencial eólico.

A energia elétrica é fornecida para as cidades a partir das Subestações (SE) em Monteiro e Sumé, que estão interligadas à rede de distribuição de 69 kV da Energisa. A subestação de Tacambó, localizada no Estado de Pernambuco, apresenta-se como uma possível alternativa de conexão.

De acordo com as estimativas obtidas por modelagem durante este estudo, a expectativa para o vento médio anual de longo prazo é de até 9,2 m/s nas melhores áreas, a uma altura de 120 metros.

Portanto, a 120m de altura, para locais com velocidade média de vento superiores a 7,5m/s o potencial eólico estimado em São João do Tigre e Camalaú é de 451MW.

Com relação a rede de distribuição de energia elétrica no Estado da Paraíba, em janeiro de 2021 Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) concluiu e energizou, a linha de transmissão que interliga as subestações de Pau Ferro, em Pernambuco, e a de Santa Rita II, na Paraíba. A linha de transmissão, de circuito simples, em 230 kV, tem extensão de 85 quilômetros, entre os municípios de Igarassu (PE) e Santa Rita (PB). De acordo com a Chesf (2021) este empreendimento não apenas amplia o fornecimento de eletricidade para o Estado da Paraíba, mas também melhora a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional. Isso se traduz em benefícios diretos para municípios como Alhandra, Bayeux, Caaporã, Cabedelo, Conde, Cruz do Espírito Santo, João Pessoa, Lucena, Pedras de Fogo, Pitimbu, Rio Tinto e Santa Rita, abrangendo uma área de 2.800 quilômetros quadrados, com uma população de mais de 1,3 milhão de habitantes e um PIB superior a R\$ 29,5 bilhões.

No entanto, vale ressaltar que atualmente a Paraíba é alto suficiente na geração de energia elétrica por outras fontes geradoras, fazendo com que a energia gerada pela hidroelétrica da Chesf, localizada em sobradinho, na Bahia, seja destinada para outros estados. Porém, a linha de transmissão que interliga ambos os Estados e de suma importância para a confiabilidade de todo o sistema de fornecimento.

2.4 SISTEMAS DE CONVERSÃO

A energia eólica é uma forma de energia renovável obtida a partir da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. O processo de conversão de energia eólica geralmente envolve os seguintes passos:

1°. Captação da Energia Cinética do Vento:

A energia cinética do vento é capturada pelas pás das turbinas eólicas. A energia cinética do vento é representada pela fórmula:

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Onde:

E = Energia cinética do vento

m = Massa do ar

v = Velocidade do vento

2°. Conversão da Energia Cinética em Energia Mecânica:

Quando o vento atinge as pás da turbina, a energia cinética é convertida em energia mecânica. A potência mecânica gerada pelas pás da turbina é relacionada à energia cinética do vento pela fórmula:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

Onde:

P = Potência mecânica

ρ = Densidade do ar

A = Área da seção transversal varrida pelas pás da turbina

v = Velocidade do vento

3°. Conversão de Energia Mecânica em Energia Elétrica:

A potência elétrica gerada pelo gerador é representada pela fórmula:

$$P = \frac{T \times \omega}{2\pi}$$

Onde:

P = Potência elétrica

T = Torque resultante da força do vento nas pás

ω = Velocidade angular

2π = Constante representando um ciclo completo em radianos

4°. Lei de Faraday (Indução Eletromagnética):

A tensão induzida em um gerador é descrita pela Lei de Faraday da indução eletromagnética:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Onde:

V = Tensão induzida

N = Número de espiras do enrolamento

Φ = Fluxo magnético

dt = Mudança no tempo

A energia solar é uma fonte de energia renovável que se baseia na conversão da radiação solar em eletricidade. Esse processo de conversão se dá principalmente por meio de sistemas fotovoltaicos, compostos por painéis solares equipados com células fotovoltaicas. Essas células convertem diretamente a luz solar em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico, gerando corrente contínua que pode ser transformada em corrente alternada para uso em residências, indústrias e outras aplicações. O processo de conversão de energia solar geralmente envolve os seguintes passos:

1°. Captação da Energia Solar por Painéis Fotovoltaicos:

A energia solar é capturada por painéis fotovoltaicos. A energia transportada pelos fótons da luz solar é convertida em corrente elétrica através do efeito fotovoltaico. A relação entre a energia transportada pelos fótons e a corrente elétrica gerada pode ser expressa pela equação:

$$P = A \times G \times \eta$$

Onde:

P = Potência elétrica gerada

A = Área dos painéis solares

G = Intensidade da radiação solar incidente

η = Eficiência dos painéis solares

2°. Conversão de Corrente Contínua em Corrente Alternada:

A corrente contínua (CC) gerada pelos painéis fotovoltaicos é convertida em corrente alternada (CA) por meio de um inversor. A relação entre a corrente contínua e a corrente alternada pode ser descrita por uma equação que considera a eficiência do inversor:

$$PAC = PDC \times \eta_{\text{inversor}}$$

Onde:

PAC = Potência em corrente alternada

PDC = Potência em corrente contínua

η_{inversor} = Eficiência do inversor

3°. Armazenamento de Energia (Opcional):

Em alguns casos, a energia solar pode ser armazenada em baterias para uso posterior. A capacidade de armazenamento de uma bateria é dada pela equação:

$$Q = I \times t$$

Onde:

Q = Capacidade de carga da bateria

I = Corrente elétrica

t = Tempo de carga

4°. Utilização na Rede Elétrica ou Consumo Direto:

A eletricidade gerada pelos painéis solares pode ser utilizada diretamente na rede elétrica ou consumida localmente, dependendo da demanda energética. A quantidade de eletricidade gerada e utilizada está relacionada à potência e ao tempo, expressa pela fórmula:

$$E = P \times t$$

Onde:

E = Energia elétrica

P = Potência

t = Tempo de uso

Os motores a combustão são sistemas de conversão termoelétrica que transformam a energia proveniente da queima de combustíveis em energia mecânica. Este processo se baseia na combustão de materiais como gasolina, diesel ou outros combustíveis, gerando calor que expande gases no interior do motor. Essa expansão resulta no movimento dos pistões, criando energia mecânica que é usada para movimentar geradores. O processo de conversão de energia termoelétrica geralmente envolve os seguintes passos:

1°. Geração de Calor:

Na energia termoelétrica, o calor é gerado pela queima de combustíveis fósseis, como carvão, gás natural ou óleo combustível, ou por processos de fissão nuclear em usinas nucleares. A energia térmica gerada é representada pela equação:

$$Q = mc\Delta T$$

Onde:

Q = Calor gerado

m = Massa do combustível

c = Capacidade térmica do material

ΔT = Variação de temperatura

2°. Geração de Vapor:

O calor produzido é utilizado para aquecer a água e gerar vapor. A quantidade de calor necessária para converter água em vapor pode ser calculada pela fórmula:

$$Q = m \times \lambda$$

Onde:

Q = Calor necessário para a mudança de fase

m = Massa de água

λ = Calor latente de vaporização

3°. Movimento da Turbina a Vapor:

O vapor gerado aciona uma turbina, convertendo a energia térmica em energia mecânica. A potência mecânica gerada é diretamente proporcional à variação da energia cinética do vapor e pode ser representada pela equação:

$$P = \dot{m} \times \Delta h$$

Onde:

P = Potência mecânica gerada

\dot{m} = Fluxo mássico de vapor

Δh = Variação da entalpia do vapor

4°. Geração de Energia Elétrica:

A turbina a vapor aciona um gerador que converte a energia mecânica em eletricidade. A potência elétrica gerada é relacionada à potência mecânica pelo rendimento do gerador:

$$P = \eta \times P \text{ mecânica}$$

Onde:

P = Potência elétrica gerada

η = Eficiência do gerador

O sistema de conversão hidroelétrico é um método de geração de energia que utiliza a força da água em movimento para produzir eletricidade. Esse processo começa com a construção de uma represa em um rio ou curso d'água, formando um reservatório. A água acumulada na represa é liberada em direção às turbinas da usina hidrelétrica. Essas turbinas são responsáveis por transformar a energia cinética da água em energia mecânica, girando um eixo conectado a um gerador elétrico. Esse movimento gera eletricidade por meio da indução eletromagnética. O processo de conversão de energia hidroelétrico geralmente envolve os seguintes passos:

1°. Captação da Energia Cinética da Água:

Na geração hidroelétrica, a energia cinética da água em movimento é capturada através da queda d'água de uma represa. A energia cinética da água é dada pela equação:

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Onde:

E = Energia cinética da água

m = Massa da água

v = Velocidade da água

2°. Conversão da Energia Potencial em Energia Mecânica:

A energia potencial da água, devido à sua altura acima do nível do mar, é convertida em energia mecânica. A energia potencial gravitacional é dada por:

$$E_p = m \times g \times h$$

Onde:

E_p = Energia potencial gravitacional

m = Massa da água

g = Aceleração devido à gravidade

h = Altura

3°. Movimento das Pás da Turbina:

A água em movimento aciona as pás da turbina. A potência mecânica gerada está relacionada à quantidade de água que passa pela turbina e à altura da queda d'água, representada pela equação:

$$P = \rho \times g \times Q \times h$$

Onde:

P = Potência mecânica gerada

ρ = Densidade da água

g = Aceleração devido à gravidade

Q = Vazão de água

h = Altura da queda d'água

4°. Geração de Energia Elétrica:

A potência mecânica é usada para acionar um gerador que converte a energia mecânica em energia elétrica. A potência elétrica gerada é relacionada à potência mecânica pelo rendimento do gerador:

$$P = \eta \times P \text{ mecânica}$$

Onde:

P = Potência elétrica gerada

η = Eficiência do gerador

2.5 PREÇO ESTIMADO POR FONTE DE GERAÇÃO

Os custos de geração de energia por fontes variam dependendo de vários fatores, como localização, tecnologia utilizada, escala do projeto, condições climáticas e avanços tecnológicos, políticas governamentais e custos de financiamento. No entanto, em termos gerais temos que:

Energia Eólica: Historicamente, a energia eólica tem se tornado cada vez mais competitiva em termos de custo. Em muitas regiões, o custo de geração de energia eólica terrestre pode estar na faixa de 30 a 60 dólares por megawatt-hora (MWh). Projetos eólicos offshore tendem a ser mais caros, muitas vezes na faixa de 60 a 100 dólares por MWh, devido aos maiores custos de instalação e manutenção.

Energia Solar: A energia solar fotovoltaica tem visto uma redução significativa de custos ao longo dos anos. Os custos de geração solar podem variar amplamente, dependendo da localização, tamanho do projeto e tecnologia utilizada. Em áreas com bom potencial solar, os custos de geração podem estar na faixa de 20 a 50 dólares por MWh para instalações fotovoltaicas.

Termoelétrica: A geração termoelétrica inclui diversas fontes, como carvão, gás natural e nuclear. Os custos podem variar consideravelmente. No caso do carvão, por exemplo, os custos de geração podem variar entre 60 e 150 dólares por MWh, dependendo da eficiência da usina, do preço do carvão e das regulamentações ambientais. Usinas de gás natural podem ter custos na faixa de 40 a 100 dólares por MWh. As usinas nucleares podem ter custos na faixa de 30 a 90 dólares por MWh, dependendo de diversos fatores.

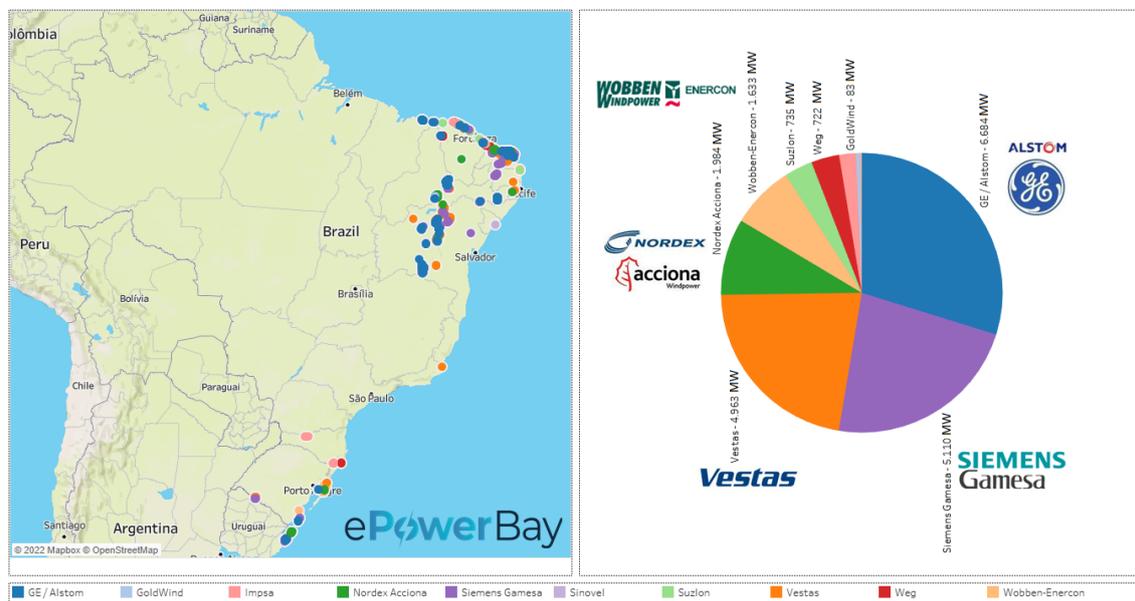
Hidroelétrica: A energia hidrelétrica é frequentemente considerada uma das fontes mais baratas de energia. Em áreas propícias para a construção de usinas hidrelétricas, os custos podem variar significativamente. Em geral, o custo de geração de energia hidrelétrica pode variar de 30 a 60 dólares por MWh.

2.6 PRINCIPAIS FABRICANTES

O mercado de turbinas eólicas no Brasil é liderado por algumas empresas renomadas, tanto internacionalmente como por fabricantes nacionais como apresentado na figura 5. Essas empresas são reconhecidas por sua experiência, tecnologia e capacidade de fornecer turbinas eólicas de qualidade para parques eólicos no Brasil. Entre as principais fornecedoras de turbinas eólicas no país estão:

GE/Alstom, Siemens Gamesa, Vestas, NordexAcciona, Wobben-Enercon

Figura 5 - Distribuição geral dos ventos



Fonte: EPOWERBAY (2023)

Com relação aos fabricantes de aerogeradores, foram identificados 11 diferentes fornecedores. Entretanto, atualmente, os 5 maiores são responsáveis pelo fornecimento de aproximadamente 90% dos equipamentos em operação.

Atualmente, o cenário dos maiores fabricantes de aerogeradores em operação no Brasil reflete um mercado diversificado em termos de presença e capacidade de geração. A Alstom/GE lidera com uma capacidade instalada de 6.684 MW, distribuídos em sete estados: Rio Grande do Sul, Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Maranhão. Em seguida, a

Siemens/Gamesa detém 5.110 MW de capacidade em operação em sete estados: Rio Grande do Sul, Bahia, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. A Vestas aparece com 4.963 MW operando em sete estados: Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. A Nordex/Acciona contribui com 1.984 MW em seis estados: Rio Grande do Sul, Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. Por fim, a Wobben-Enercon possui 1.633 MW em operação, distribuídos em sete estados: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Bahia, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. Esses números evidenciam a presença significativa e a distribuição geográfica desses fabricantes de aerogeradores no território brasileiro, refletindo o desenvolvimento e a consolidação do setor de energia eólica no país.

2.7 SUSTENTABILIDADE E ASPECTOS PÓS USO

A geração de energia através de fontes renováveis como eólica, solar, termoelétrica e hidroelétrica oferece inúmeros benefícios em termos de sustentabilidade e redução da pegada de carbono. No entanto, o pós-uso desses sistemas apresenta desafios significativos que precisam ser considerados para garantir a viabilidade ambiental a longo prazo.

Com relação a energia eólica após o uso das turbinas, surge a questão dos resíduos das pás das turbinas, que geralmente são feitas de materiais compostos, como fibra de vidro. O descarte desses materiais é um desafio, já que atualmente não existem processos eficientes de reciclagem para lidar com esses resíduos. No entanto, esforços estão sendo feitos para desenvolver métodos de reciclagem e reutilização mais eficazes para as pás das turbinas eólicas.

Já com relação a energia solar as células fotovoltaicas usadas em painéis solares contêm materiais como silício, vidro, e outros compostos, muitos dos quais podem ser reciclados. No entanto, o processo de reciclagem de painéis solares não é ainda amplamente implementado e eficiente. Aumentar a capacidade de reciclagem e reutilização dos materiais dos painéis

solares é essencial para lidar com os resíduos e minimizar o impacto ambiental.

Com relação as termoelétrica as usinas frequentemente utilizam combustíveis fósseis, o que gera desafios ambientais significativos devido às emissões de dióxido de carbono. Após o uso, a questão crítica é o gerenciamento do CO₂ produzido. Estratégias de captura e armazenamento de carbono (CCS) têm sido desenvolvidas para reduzir as emissões, mas ainda é um desafio implementar essas tecnologias de forma escalável e economicamente viável.

E com relação a hidroelétrica, apesar de ser uma fonte de energia limpa, as represas hidroelétricas têm impactos ambientais significativos no ecossistema fluvial e terrestre. Após o uso, a sedimentação nos reservatórios e o impacto na vida aquática são desafios a serem considerados. Além disso, a desativação de grandes usinas hidroelétricas no final de suas vidas úteis pode ser complexa e onerosa.

Para o futuro, é fundamental investir em pesquisa e desenvolvimento para soluções de reciclagem mais eficazes para os componentes utilizados na geração de energia a partir de fontes renováveis. Isso inclui a criação de processos de reciclagem economicamente viáveis e o desenvolvimento de tecnologias de ponta para lidar com resíduos de maneira mais sustentável.

Além disso, a inovação em tecnologias de armazenamento de energia e na melhoria da eficiência dos sistemas é crucial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar o impacto ambiental.

Portanto, a abordagem holística envolvendo regulamentações mais rígidas, incentivos para a indústria, investimentos em pesquisa e educação sobre sustentabilidade são essenciais para enfrentar os desafios do pós-uso e assegurar que a geração de energia a partir de fontes renováveis seja verdadeiramente sustentável no longo prazo.

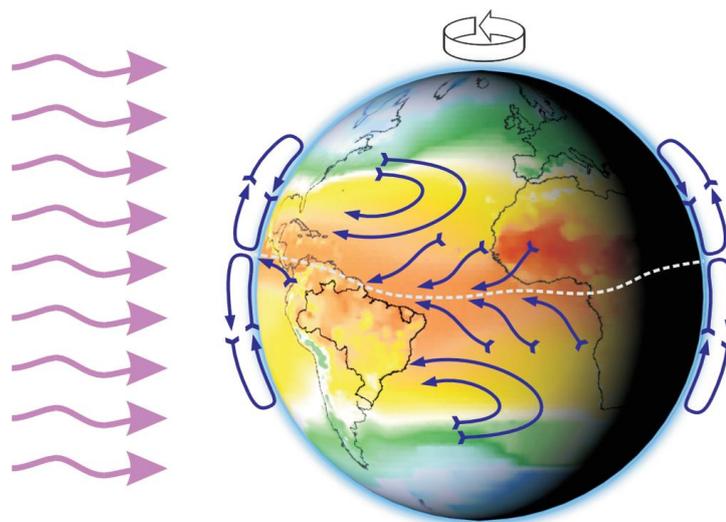
3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado com base em uma pesquisa qualitativa, através do uso de material bibliográfico, como agências governamentais, artigos, monografias e dissertações sobre a geração de energia eólica, sendo analisados documentos que tratam de assuntos referentes a políticas públicas de incentivo deste tipo de energia renovável em escala global e nacional, em especial no Estado da Paraíba. Além disso, a pesquisa baseou-se em consultas nas Resoluções Normativas da ANEEL e da ANP, bem como o Mapa eólico da Paraíba e a EPE sobre a participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira e mundial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição geral dos ventos sobre o Brasil é controlada pelos aspectos da circulação geral planetária da atmosfera próxima, conforme se apresenta na figura 6. Dentre esses aspectos, sobressaem os sistemas de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte e a faixa de baixas pressões da Depressão Equatorial.

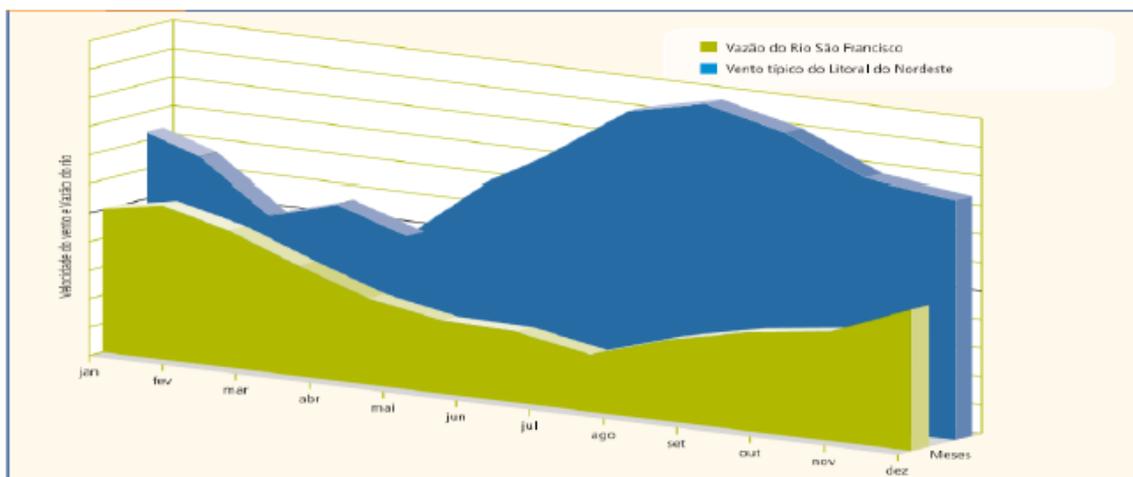
Figura 6 - Distribuição geral dos ventos



Fonte: CEPEL (2001)

A relação entre a capacidade de geração de energia elétrica do rio São Francisco e a capacidade de geração de energia eólica no Nordeste pode ser vista como inversamente proporcional em alguns aspectos. Quando o rio São Francisco tem sua menor capacidade de geração, a energia eólica no Nordeste tende a ter um maior potencial de produção de eletricidade, como apresentado na figura 7.

Figura 7 - Velocidade do vento X Vazão do Rio



Fonte: CBEE (2000)

Durante o período em que o rio São Francisco apresenta sua menor vazão, geralmente entre os meses de inverno, a redução das chuvas na área de captação diminui a quantidade de água disponível para a produção de energia hidrelétrica ao longo do rio. Nesses momentos, a capacidade de geração de energia elétrica a partir da hidroeletricidade tende a ser afetada negativamente, devido à escassez de água nos reservatórios das usinas ao longo do rio.

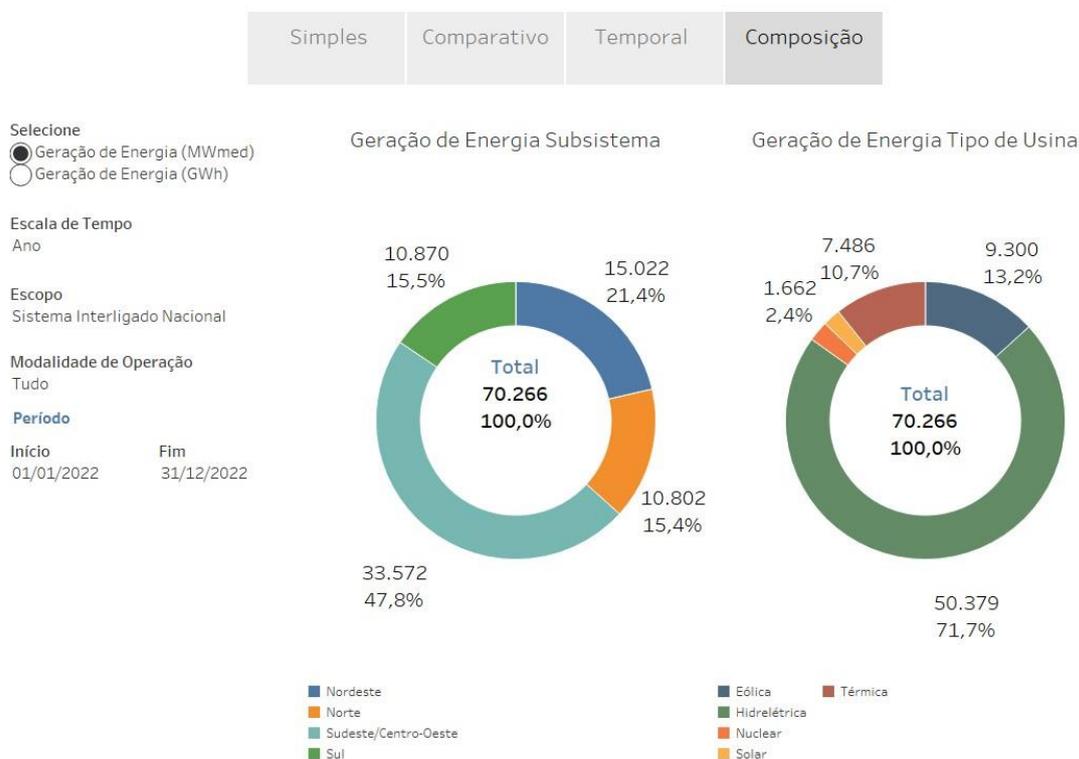
Por outro lado, é exatamente nesse período de menor capacidade de geração hidrelétrica que a energia eólica, especialmente no Nordeste do Brasil, atinge seu potencial máximo. Durante os meses de inverno, os ventos na região costeira do Nordeste atingem sua maior intensidade, o que favorece a produção de energia eólica. A força dos ventos é um fator determinante para a geração eficiente de eletricidade por meio de turbinas eólicas.

Essa dinâmica inversa entre a capacidade de geração de energia elétrica do rio São Francisco e a energia eólica no Nordeste ressalta a complementaridade entre diferentes fontes de energia. Enquanto a energia hidrelétrica pode enfrentar momentos de menor disponibilidade devido à sazonalidade das chuvas, a energia eólica pode se tornar mais proeminente e suprir parte da demanda elétrica, oferecendo uma alternativa durante esses períodos de menor geração hidrelétrica.

Utilizado o programa fornecido pelo site da ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico do governo, foi plotado o gráfico de geração de energia subsistema versus a geração de energia com o tipo de usina, com os dados do ano de 2022 a nível nacional.

Para gerar o gráfico comparativo da Gráfico 1 foi selecionado a unidade de medida da capacidade de geração em megawatts médios (MWmed), a escala de tempo anual, no escopo sistema interligado nacional, todas as modalidades de operação no período de 01/01/2022 a 31/12/2022.

Gráfico 1 - Comparativo de geração de energia no Brasil no ano de 2022



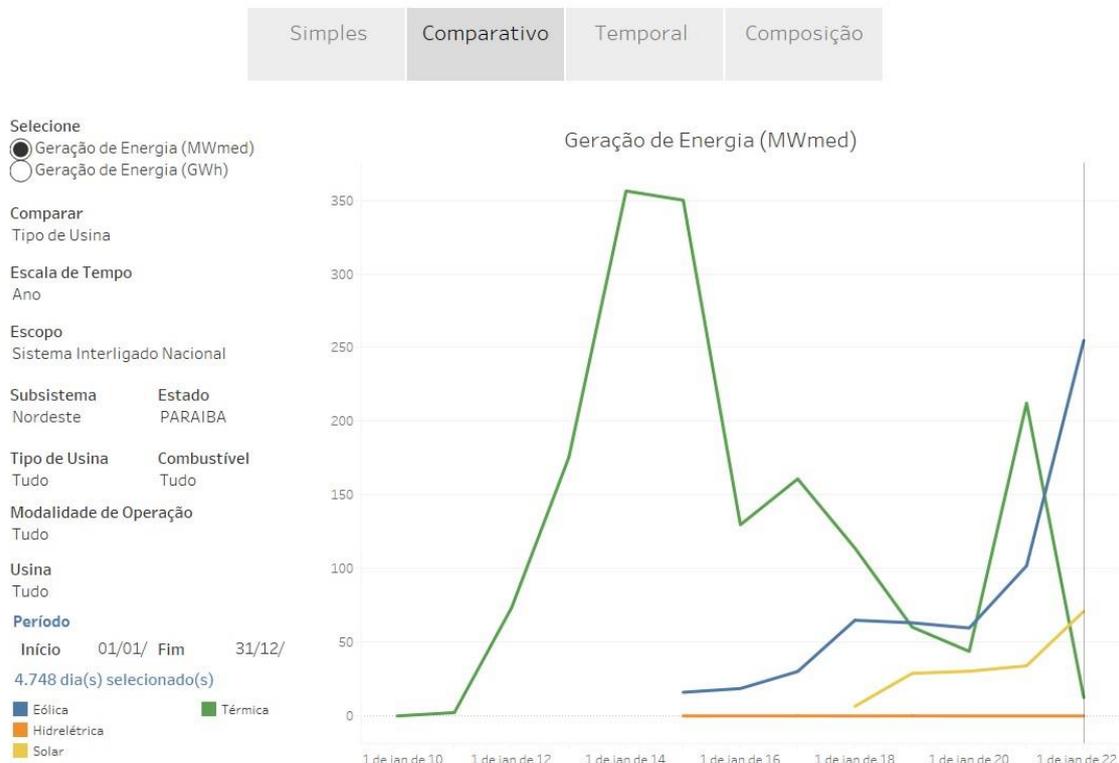
Fonte: ONS (2023)

Podemos observar que na geração de energia do subsistema a região sudeste/centro-oeste foi a que mais produziu seguidos da região nordeste, sul e norte.

Já analisando a geração de energia pelo tipo de usina, podemos observar que a geração hidroelétrica possui a maior parte cerca de 71,7% seguido da eólica que representou 13,2%, térmica com 10,7%, e nuclear e solar que juntas representaram um pouco mais de 4%

Com base nas informações apresentadas no gráfico 2, realizamos uma análise na matriz energética no estado da Paraíba dividindo em setores como eólica, hidrelétrica, solar e térmica. Para tal foi utilizado, site da ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico do governo, utilizado dados de 2010 a 2022.

Gráfico 2 - Gráfico comparativo da quantidade de energia gerada na Paraíba de cada fonte ao longo do tempo.



Fonte: ONS (2023)

Podemos perceber que antes de 2015 a geração de energia no Estado da Paraíba era predominantemente oriunda da energia térmica, após este período a energia eólica surge e desde então tem apresentado consecutivas altas na capacidade de geração sendo hoje a principal fonte gerado de energia no estado. A geração de energia solar sem seguindo os mesmos passos da energia eólica tendo uma pequena relevância a partir de 2015. Já a energia hidráulica em todo período analisa não teve nenhuma representatividade uma vez em que a Paraíba não possui recurso natural para essa geração.

Atualmente, é difícil determinar a capacidade instalada de geração de energia eólica no Estado da Paraíba visto que existe inúmeros projetos em andamento, e cada dia novos parques são implementados no sistema. Porém alguns resultados já são bem expressivos com o complexo Chafariz apresentado na figura 8, do grupo Neoenergia que conta com 15 parques eólicos, localizados no Sertão da Paraíba, que somam uma capacidade instalada de 571,2 MW, suficiente para produzir energia para abastecer 1,3 milhão de residências por ano (Neoenergia, 2023).

Figura 8 - Complexo Chafariz



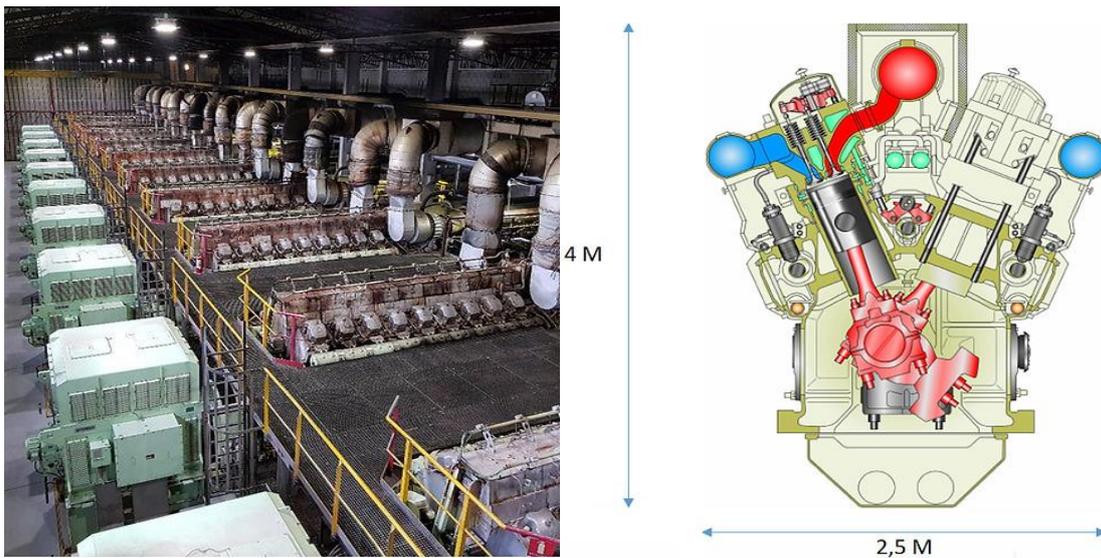
Fonte: Iberdrola (2023)

Dentre os vários projetos em andamento no Estado da Paraíba, temos o complexo eólico Pedra Lavada, da empresa Casa dos Ventos, localizado no município de mesmo nome. O complexo é composto por 372 aerogeradores distribuídos em 27 parques eólicos. São eles: Ventos de São Cleofas 01 a 21, com 14 aerogeradores cada, e Ventos de São Cleofas 22 a 27, com 13 aerogeradores cada, com potência total prevista de 1.562,4 MW (Casa dos ventos, 2023).

Atualmente, o Estado da Paraíba possui duas termoelétricas que podem ser acionadas a qualquer momento, garantindo assim confiabilidade no sistema de fornecimento de energia elétrica. No entanto, esta fonte geradora possui um alto custo, além de não ser oriunda de fontes renováveis, uma vez que ambas as unidades utilizam óleo combustível, OCB1 - óleo combustível de baixo teor de enxofre e baixa viscosidade e diesel (ANP,2023). A queima desses combustíveis fósseis contribui para a emissão de gases de efeito estufa e pode liberar poluentes locais, afetando a qualidade do ar. Além disso, vale ressaltar que a maioria das usinas termoelétricas requer grandes volumes de água para resfriamento, o que pode ter impactos negativos nos recursos hídricos locais (EPASA, 2023).

As duas usinas são idênticas e cada uma das usinas possuem 20 unidades geradoras composta por 19 Motores MAN/STX do tipo 18V32/40 com capacidade de gerar 8,76MW e 1 Motor MAN/STX do tipo 9L32/40 com capacidade de gerar 4,38MW com uma Potência Total: 170,752 MW. (EPASA, 2023). Como apresentado na figura 9.

Figura 9 - Usina termoeétrica EPASA



Fonte: EPASA (2023)

A energia fotovoltaica vem sendo amplamente difundida nas residências e instalações comerciais no Estado da Paraíba. Por ser uma fonte inesgotável de energia, não produz emissões poluentes e pode levar a economias significativas nas contas de energia. Além disso, permite a geração de eletricidade descentralizada, reduzindo a dependência de fontes de energia centralizadas. No entanto, a geração de energia solar é intermitente, dependendo da luz solar disponível. Isso requer armazenamento de energia ou backup de outras fontes para garantir o fornecimento contínuo. A instalação de painéis solares pode ser cara, embora os custos tenham diminuído significativamente ao longo do tempo. Em larga escala, requer áreas extensas de terra ou telhados, o que pode ser um desafio em áreas urbanas densamente povoadas.

Ultimamente é difícil determinar a capacidade instalada de fontes geradoras fotovoltaicas no Estado da Paraíba visto que a produção dela pode ser destinada ao Ambiente de Contratação Livre (ACL). Como por exemplo, o Complexo Solar Luzia apresentado na figura 10, da empresa Neoenergia que está situado no município de Santa Luzia, no sertão da Paraíba, e tem capacidade instalada de 149,3 MW, energia suficiente para abastecer mais de 100 mil residências (Neoenergia, 2023). Ou para o próprio consumo como por exemplo a Universidade Federal da Paraíba – UFPB que implementou um

sistema fotovoltaico em 2021, composto por 672 módulos (placas solares), com potência de 295kWp (quilowatt pico). E de acordo com a própria instituição em oito meses após a implementação o sistema gerou uma economia de R\$ 129.000,00 e ressaltou que a energia gerada durante esse período aproximadamente 290 MWh, corresponde à quantidade suficiente para abastecer, por um mês, aproximadamente 1.700 residências com consumo médio de 170 kWh por mês (UFPB, 2023).

Figura 10 - Complexo Solar Luzia



Fonte: NEOENERGIA (2023)

5. CONCLUSÃO

Apesar da geração de energia elétrica no Brasil em sua maioria ser de fontes hidráulicas, no Estado da Paraíba isso não ocorre, devido a topografia do estado não ser favorável para a criação de grandes reservatórios e barragens. Além disso, o estado possui variações climáticas sazonais, com períodos de secas e chuvas irregulares. Isso torna a geração de energia hidrelétrica menos previsível e dependente das condições climáticas. Além

disso, essa fonte de geração demanda altos investimentos e gera alguns impactos ambientais, como a inundação de ecossistemas naturais e o deslocamento de comunidades. Por isso, foi necessário investir em outras fontes de geração de energia, como a fotovoltaica, eólica e termoelétricas.

Foi realizada uma análise das principais fontes de energias renováveis presentes no Estado da Paraíba, pode-se concluir que a matriz elétrica é predominantemente composta por quatro fontes: Energia solar, gerada por meio de painéis fotovoltaicos que transformam luz solar em eletricidade; Energia hidráulica, originada da água que movimentam turbinas em usinas hidrelétricas, vinda da subestação da CHESF do estado da Bahia; Energia eólica, proveniente da força dos ventos que impulsionam aerogeradores; e Energia termoelétrica, que utiliza calor gerado pela queima de combustíveis fósseis ou outros processos térmicos para produzir eletricidade.

A energia eólica representa muito mais do que apenas a força dos ventos convertida em eletricidade. Ela é um catalisador do desenvolvimento econômico, proporcionando uma série de benefícios para comunidades e regiões que investem nessa fonte de energia limpa e renovável.

Um dos pontos notáveis é o impressionante retorno financeiro que a energia eólica oferece. Cada R\$ 1,00 investido em projetos eólicos reverbera na economia com um impacto de R\$ 2,9 no Produto Interno Bruto (PIB). Esse efeito multiplicador não só impulsiona a indústria de energias renováveis como também contribui significativamente para o crescimento econômico do país.

Além disso, a energia eólica coexiste de forma harmoniosa com a atividade agrícola e pecuária. Os proprietários de terras que optam pelo arrendamento de áreas para a instalação de turbinas eólicas têm a vantagem de continuar com suas plantações e criação de animais. Isso não só protege o uso da terra, mas também gera renda adicional para os proprietários e suas comunidades.

A influência positiva da energia eólica estende-se além do aspecto financeiro. A implantação de parques eólicos impacta positivamente na economia local, aumentando o PIB e elevando o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) municipal em cerca de 25%. Esses resultados evidenciam a

importância de se investir nessa fonte de energia para o progresso das regiões na Paraíba.

Além disso, a criação de empregos é um pilar importante da energia eólica. A cada megawatt (MW) instalado, aproximadamente 11 postos de trabalho são gerados. Essa mão de obra empregada na construção, manutenção e operação dos parques eólicos não só contribui para a estabilidade econômica das comunidades locais na Paraíba, mas também fortalece a força de trabalho do Estado como um todo.

Portanto, a energia eólica não é apenas uma solução ambientalmente amigável, mas também uma poderosa ferramenta para o crescimento econômico e a melhoria da qualidade de vida da sociedade paraibana. Seu impacto positivo no PIB, na agricultura, na renda, no IDH e no emprego torna essa fonte de energia uma escolha estratégica para um futuro mais sustentável e próspero no Estado da Paraíba.

REFERÊNCIAS

ATLAS EÓLICO DA PARAÍBA. 2023. Disponível em: <<https://mapaeolico.pb.gov.br/paraiba/apresentacao.html>>.

ANEEL - Agência nacional de energia elétrica. 2023. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>.

ANP – Agência Nacional de petróleo, gás e biocombustíveis. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-combustivel>>.

BNDS - Banco nacional do desenvolvimento. 2018. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/aerogeradores>>.

Casa dos Ventos. 2023. Disponível em: <<https://casadosventos.com.br/projetos>>.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. 2001. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>>.

CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco. 2021. Disponível em: <https://www.chesf.com.br/layouts/15/chesf_noticias_farm/noticia.aspx?idnoticia=765>

CRESESB - Centro de referência para energias solar e eólica Sergio de S. Brito. 2003. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico>.

CRUZ, Fernanda Tátia. ISIDORO, Marcelo Henrique. FERNANDES, Igor Santos e. 2020. **Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos**. Revista: Brazilian Journal of Development.

Eolic wind solar. 2023. Disponível em: <<http://www.eolica.com.br/>>.

EPASA – Centrais Elétricas da Paraíba S.A. 2023. Disponível em: <<https://www.epasa.online/geracao-de-energia>>.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>.

ePowerBay. 2023. Disponível em: < [Iberdrola. 2023. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-eolica-onshore/complexo-eolico-terrestre-chafariz>>](https://www.epowerbay.com/single-post/fabricantes-de-aerogeradores-os-maiores-em-operacao-no-brasil-2022#:~:text=Um%20pouco%20sobre%20os%20maiores,RN%2C%20CE%20e%20PI).></p></div><div data-bbox=)

Mapa Eólico da Paraíba. 2023. Disponível em: <<https://mapaeolico.pb.gov.br/mapas-interativos/mapa01.html?mapa=../assets/img/mapas/mapa5pt2>>.

Memoria da eletricidade. 2023. Disponível em: <<https://portal.memoriadaeletricidade.com.br/>>.

Neoenergia. 2023. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/energia-eolica/chafariz>>.

ONS - Operador Nacional de Sistema Elétrico. 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>.

PTI - Parque tecnológico de Itaipu. 2023. Disponível em:
<<https://www.pti.org.br/>>.

UFPB – Universidade Federal da Paraíba. 2023. Disponível em:
<https://www.ufpb.br/ufpb/contents/noticias/ufpb-economiza-r-129-mil-apos-instalacao-de-paineis-solares>

VESTAS – Wind turbine solutions and services. 2023. Disponível em:
<<https://www.vestas.com/>>.

Wobben wind power Enercon. 2023. Disponível em:
<<http://www.wobben.com.br/pagina-inicial/>>.