



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

VINÍCIUS DOS SANTOS FREIRE

**ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE DA GERAÇÃO EÓLICO-SOLAR DE
UMA USINA DE GERAÇÃO HÍBRIDA NO LITORAL CEARENSE**

FORTALEZA

2024

VINÍCIUS DOS SANTOS FREIRE

ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE DA GERAÇÃO EÓLICO-SOLAR DE UMA
USINA DE GERAÇÃO HÍBRIDA NO LITORAL CEARENSE

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

FORTALEZA

2024

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

F935a Freire, Vinícius dos Santos.
Análise da complementaridade da geração eólico-solar de uma usina de geração híbrida no litoral cearense /
Vinícius dos Santos Freire. – 2024.
97 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

1. Usina de geração híbrida. 2. Energia eólica. 3. Energia solar fotovoltaica. 4. Análise de complementaridade. 5. Regimes sazonais. I. Título.

CDD 621.3

VINÍCIUS DOS SANTOS FREIRE

ANÁLISE DA COMPLEMENTARIDADE DA GERAÇÃO EÓLICO-SOLAR DE UMA
USINA DE GERAÇÃO HÍBRIDA NO LITORAL CEARENSE

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

Aprovada em: 27/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Kassio Derek Nogueira Cavalcante.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Eletricista Vitor Manoel Silva Araújo.
Breeze Engenharia

A Deus.

Aos meus pais, Gilberto Freire da Costa e
Josineide dos Santos Silva.

Ao meu eterno amigo de 4 patas, Ralf.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado o dom da vida e que nos momentos mais desafiadores dessa trajetória acadêmica, e trajetória de vida, me manteve resiliente para superar quaisquer obstáculos. Grato por todos os momentos que pude sentir sua bondade e compaixão.

Aos meus pais, Gilberto e Josineide que desde criança trataram minha educação como algo inegociável, se hoje estou concluindo esse ciclo é pelo esforço desmedido de vocês para conseguir custear a melhor educação para mim. Obrigado pelo amor, pelo apoio e pela tranquilidade que vocês sempre me transmitiram, tudo que almejo é pensando em como posso lhes proporcionar uma vida mais confortável.

Á minha namorada, Emilly, que viveu comigo todas as dificuldades passadas nessa reta final e não me deixou esmorecer com tais situações, sempre me incentivando e me motivando. Seu amor e suas conversas duras contribuíram para que eu pudesse ser resiliente nesse fim de ciclo.

Aos meus amigos de turma que tive a honra de conhecer e conviver no Campus de Sobral, onde iniciei essa jornada no curso. Todos vocês tiveram importância gigantesca pra mim nessa etapa desafiadora da minha vida, seja nas conversas do dia a dia, seja o apoio de um com outro nos estudos, seja em um almoço no RU, seja num jantar no final de semana, seja nos momentos de lazer, cada minuto de convivência com vocês jamais será esquecido por mim. Chega a ser engraçado as coisas da vida, cheguei em Sobral me sentindo um fracassado e a cidade me deu a oportunidade de conhecer tantas pessoas incríveis e ganhar uma experiência de vida enriquecedora, que levarei um pouco comigo para aonde for.

Aos amigos que fiz no Campus do Pici, por me abraçarem na minha chegada ao campus e, alguns de vocês, se tornarem amigos para a vida toda. Muito obrigado pela parceria do dia a dia, pelas conversas diárias, pelos jogos assistidos na cantina do 707. Certamente as responsabilidades diárias ficaram mais leves com a presença de vocês.

Ao meu eterno amigo de 4 patas Ralf, que chegou à minha vida quando eu tinha 9 anos e deixou nosso lar aos meus 24 anos, por todo o companheirismo e amor ao longo de toda a vida. Quando saia você me esperava, quando chegava você esbanjava toda a alegria do mundo, quando criança você ficava ao meu lado o dia todo, quando passava o dia inteiro sentado na frente do computador você ficava ao meu lado por quanto tempo fosse. Você esteve ao meu lado em diversas fases da minha vida, infelizmente você não estará ao meu lado para me ver me tornar Engenheiro Eletricista, mas aonde quer que esteja lembrarei de todos os momentos felizes que você trouxe à nossa casa.

“É justo que muito custe o que muito vale.”
(Santa Teresa D’Ávila)

RESUMO

É evidente o crescimento exponencial de capacidade instalada proveniente de fontes de energia renovável na matriz energética brasileira nas últimas décadas, especialmente a fonte eólica e a fonte solar. Esse fato é justificado pelo grande potencial eólico e solar no território nacional, com ênfase na região nordeste que nos últimos anos tem recebido inúmeros investimentos em empreendimentos que visam aproveitar da abundância desses recursos para gerar energia limpa. No entanto, esse crescimento em massa de energias renováveis na matriz energética brasileira, com foco na solar e na eólica, ambas com comportamento intermitente, tende a torná-la mais vulnerável às variabilidades e imprevisibilidades de tempo e clima. Pensando nessa problemática, este trabalho visa analisar a topologia de Usinas de Geração Híbrida, combinando plantas de geração eólica e solar, para mitigar os impactos desse impasse a partir do comportamento complementar entre suas fontes. Dessa forma, foram utilizados como objeto de estudo uma usina eólica de 2,4MW e uma usina de geração solar fotovoltaica de 400,33kWp, localizadas em Beberibe-CE no litoral cearense, cuja ligação à rede elétrica BT é feita em paralelo no transformador de um dos aerogeradores do parque eólico, que por sua vez é também conectado à rede elétrica MT, podendo, então, considerar essa integração como uma Usina de Geração Híbrida eólico-solar. Nesse sentido, foi-se obtido acesso ao histórico de geração das duas plantas e esbarrou-se na dificuldade de se ter um histórico limitado de geração solar, de forma que o histórico de geração eólica contemporâneo ao mesmo período tem 6 meses sem registro de valores. Para solucionar esse problema foi desenvolvido um algoritmo de projeção histórica linearizada para estimar os valores faltantes, viabilizando a análise comparativa das gerações eólica e solar entre 2021 e 2024. As análises mostraram que, no primeiro semestre, a geração solar predomina, enquanto no segundo semestre, a geração eólica é superior. Ademais, a integração das plantas em uma usina híbrida mitigou a intermitência dos regimes sazonais de vento e sol no primeiro semestre e impulsionou as ótimas gerações do segundo semestre, resultando ainda em um ganho médio de 30% nas gerações anuais. Concluiu-se que a implementação de usinas híbridas eólico-solar deve ser incentivada no Brasil pois promove ganhos significativos de eficiência e produtividade além de contribuir para um Sistema Interligado Nacional e uma matriz energética mais estável, mais confiável e menos impactado pela intermitência das fontes.

Palavras-chave: Usina de geração híbrida; Energia eólica; Energia solar fotovoltaica; Análise de complementaridade; Regimes sazonais.

ABSTRACT

It is evident that there has been exponential growth in the installed capacity from renewable energy sources in Brazil's energy matrix over the past decades, especially from wind and solar power. This growth is justified by Brazil's significant wind and solar potential, particularly in the northeastern region, which in recent years has received numerous investments in projects aimed at harnessing the abundance of these resources to generate clean energy. However, this massive expansion of renewable energy in Brazil's energy matrix, with a focus on solar and wind, both of which have intermittent behavior, tends to make it more vulnerable to weather and climate variability and unpredictability. Addressing this issue, this study aims to analyze the topology of Hybrid Power Plants, combining wind and solar power plants, to mitigate the impacts of this challenge through the complementary behavior of these sources. As such, a 2.4 MW wind farm and a 400.33 kWp solar photovoltaic power plant, both located in Beberibe-CE on the Ceará coast, were used as the study objects. The plants are connected to the low voltage grid in parallel at the transformer of one of the wind turbines, which in turn is also connected to the medium voltage grid, thereby allowing this integration to be considered a Hybrid Wind-Solar Power Plant. In this context, access was obtained to the electricity generation history of both plants, but the analysis was hindered by the limited solar photovoltaic electricity production history and a six-month gap in the wind electricity generation data during the same period. To address this issue, a linearized historical projection algorithm was developed to estimate the missing values, enabling a comparative analysis of wind and solar electricity generation between 2021 and 2024. The analyses showed that solar generation predominates in the first half of the year, while wind generation is stronger in the second half. Additionally, the integration of the plants into a hybrid system mitigated the intermittency of seasonal wind and solar patterns in the first half and boosted the already strong electricity generation in the second half, resulting in an average annual electricity generation increase of 30%. It was concluded that the implementation of Hybrid wind-solar Power Plants in Brazil should be encouraged, as they promote significant gains in efficiency and productivity, in addition to contributing to a more stable and reliable National Interconnected System and energy matrix, less affected by the intermittency of renewable sources.

Keywords: Hybrid power plant; Wind energy; Solar photovoltaic energy; Complementarity analysis; Seasonal patterns.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Média anual de irradiação global horizontal no Brasil.....	24
Figura 2: Irradiância Global Horizontal do estado do Ceará.....	26
Figura 3: Ranking nova capacidade instalada de eólica onshore em 2022.....	28
Figura 4: Velocidade média anual dos ventos no Brasil.....	29
Figura 5: Potencial Eólico Brasileiro para ventos de 50 metros de altitude.....	30
Figura 6: Potencial eólico anual a 80m de altura do estado do Ceará.....	31
Figura 7: Ilustração do efeito fotovoltaico no semicondutor de silício dopado.....	33
Figura 8: Diferença entre módulo monocristalino e policristalino.....	34
Figura 9: Esquema de ligação em série e em paralelo de módulos fotovoltaicos.....	35
Figura 10: Diagrama de uma instalação com inversor offgrid.....	36
Figura 11: Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede.....	37
Figura 12: Comportamento da potência do módulo em função da temperatura.....	39
Figura 13: Variabilidade temporal da radiação solar em superfície.....	40
Figura 14: A inclinação dos módulos em função da localidade.....	41
Figura 15: Painel Fotovoltaico sob influência do sombreamento.....	42
Figura 16: Instalações eólicas onshore e offshore.....	43
Figura 17: Estruturas da turbina envolvidas na produção de energia eólica.....	43
Figura 18: Emissões de CO2 evitadas por mês em toneladas em 2023.....	48
Figura 19: Evolução da Capacidade Instalada (MW).....	49
Figura 20: Investimentos em novos projetos no setor Eólico (Em milhões de US\$).....	49
Figura 21: Modelo de rugosidade do território brasileiro.....	52

Figura 22: Esquema de um sistema híbrido Eólico-Solar.....	54
Figura 23: UFV flutuante sobre o reservatório da UHE Sobradinho.....	55
Figura 24: Regimes sazonais das energias eólica e hidráulicas.....	56
Figura 25: Complementaridade diária média dos recursos eólico e solar na região fronteira entre Piauí, Ceará e Pernambuco.....	57
Figura 26: Áreas de Ceará aptas à instalação de projetos de geração eólica e solar.....	58
Figura 27: O município de Beberibe.....	60
Figura 28: Mapa de velocidade média anual do vento a 80m no Ceará.....	61
Figura 29: Valores anemométricos a 80m na localização da Usina híbrida a ser tratada.....	61
Figura 30: Mapa de Irradiação global horizontal anual no Ceará.....	62
Figura 31: Valores solarimétricos na localização da Usina híbrida a ser tratada.....	62
Figura 32: Vista aérea do Parque eólico da Praia Mansa, em Fortaleza-CE.....	64
Figura 33: Desmontagem de aerogerador do Parque eólico da Praia Mansa.....	65
Figura 34: Parque eólico da Praia Mansa, agora em Beberibe-CE - 4 Aerogeradores em foco no novo local.....	66
Figura 35: Parque eólico da Praia Mansa, agora em Beberibe-CE – Aerogeradores ao lado da UFV no novo local.....	66
Figura 36: Montagem da estrutura de fixação de solo da UFV Beberibe.....	67
Figura 37: Instalação dos inversores e proteção CA na sala técnica da UFV Beberibe.....	68
Figura 38: Quadro de Proteção de Corrente Alternada da UFV Beberibe.....	69
Figura 39: UFV ao lado da Torre 3 da Central Eólica Beberibe.....	70
Figura 40: Módulos e sala técnica da UFV Beberibe vistas de cima.....	70
Figura 41: Vista de baixo da conexão do Datalogger com o inversor.....	71
Figura 42: Página da UFV Beberibe no portal iSolarCloud na Web.....	72
Figura 43: Histórico de geração da Central Eólica Beberibe.....	74

Figura 44: Histórico de velocidade do vento da Central Eólica Beberibe..... 74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1:	Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x Eólica de abr/2021-abr/2022.....	77
Gráfico 2:	Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x Eólica de abr/2022-abr/2023.....	77
Gráfico 3:	Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x Eólica (real + projeção estimada) de abr/2023-abr/2024.....	78
Gráfico 4:	Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x 1 Turbina eólica de abr/2021-abr/2022.....	79
Gráfico 5:	Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x 1 Turbina eólica de abr/2022-abr/2023.....	79
Gráfico 6:	Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x 1 Turbina eólica (real + projeção estimada) de abr/2023-abr/2024.....	80
Gráfico 7:	Ganho de geração da usina híbrida UFV + Eólica de abr/2021-abr/2022.....	82
Gráfico 8:	Ganho de geração da usina híbrida UFV + Eólica de abr/2022-abr/2023.....	83
Gráfico 9:	Ganho de geração da usina híbrida UFV + Eólica (real + projeção estimada) de abr/2023-abr/2024.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Potencial Solar do Ceará.....	27
Tabela 2:	Ranking dos maiores estados em potência eólica instalada.....	30
Tabela 3:	Potencial eólico onshore do Ceará.....	32
Tabela 4:	Inclinação recomendada do módulo em relação a latitude local.....	41
Tabela 5:	Potencial de geração híbrida solar e eólica do estado do Ceará.....	57
Tabela 6:	Geração mensal 2023-2024 da UFV Beberibe, após 1 ano de operação.....	73
Tabela 7:	Histórico de geração eólica 2021-2024 com adição dos valores estimados.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADECE	Desenvolvimento do Estado do Ceará
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético nacional
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente alternada
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CC	Corrente continua
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CE	Ceará
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
COELCE	Companhia de Eletricidade do Ceará
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DDP	Diferença de potencial elétrico
DFIG	Gerador de Indução Duplamente Alimentado
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GWEC	Global Wind Energy Council
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IGBTs	Transistores Bipolares de Porta Isolada
LT	Linhas de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Média Tensão
MPPTs	Maximum Power Point Tracker
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
PMSG	Gerador Síncrono de Imã Permanente
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
QPCA	Quadro de Proteção de Corrente Alternada

REN	Resolução Normativa
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCIG	Gerador de Indução Tipo Gaiola de Esquilo
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFV	Usina Solar Fotovoltaica
UGH	Usina de Geração Híbrida
UHE	Usina Hidrelétrica
WRSG	Gerador Síncrono de Rotor Bobinado
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
KV	Kilovolt
KW	Kilowatt
KWh	Kilowatt-hora
KWh/m ² /dia	Kilowatt-hora por metro quadrado por dia
KWp	Potência de pico em Kilowatt
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
TW	Terawatt
TWh	Terawatt-hora
V	Volt
Wh/m ² ,	Watt-hora por metro quadrado
Wp	Potência de pico em watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa e motivação.....	20
1.2	Objetivos.....	20
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	20
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	20
1.3	Metodologia.....	21
1.4	Estrutura do trabalho.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Potencial solar do Brasil.....	23
2.1.1	<i>Potencial solar do Ceará.....</i>	25
2.2	Potencial eólico do Brasil.....	27
2.2.1	<i>Potencial eólico do Ceará.....</i>	30
2.3	Como funciona a geração solar.....	32
2.3.1	<i>Módulos fotovoltaicos.....</i>	33
2.3.2	<i>Arranjos fotovoltaicos.....</i>	35
2.3.3	<i>Inversores.....</i>	35
2.4	Vantagens e desvantagens da energia solar.....	37
2.4.1	<i>Vantagens da energia solar.....</i>	37
2.4.2	<i>Desvantagens da energia solar.....</i>	38
2.5	Fatores que influenciam na geração de energia solar.....	39
2.5.1	<i>Temperatura.....</i>	39
2.5.2	<i>Taxa de irradiação solar.....</i>	39
2.5.3	<i>Inclinação dos módulos.....</i>	40
2.5.4	<i>Sombras e obstruções</i>	41
2.6	Como funciona a geração eólica.....	42
2.7	Vantagens e desvantagens da energia eólica.....	47
2.7.1	<i>Vantagens da energia eólica.....</i>	47
2.7.2	<i>Desvantagens da energia eólica.....</i>	50
2.8	Fatores que influenciam na geração de energia eólica.....	51
2.8.1	<i>Orientação das pás.....</i>	51
2.8.2	<i>Design das pás.....</i>	51
2.8.3	<i>Rugosidade.....</i>	52

2.8.4	<i>Temperatura e pressão</i>	52
2.8.5	<i>Efeito Esteira</i>	53
2.8.6	<i>Turbulência</i>	53
2.9	Geração Híbrida	53
2.9.1	<i>Potencial de geração híbrida eólico-solar do Ceará</i>	56
3	PROPOSIÇÃO DO TRABALHO	59
3.1	O município de Beberibe	59
3.2	A Usina Eólica	63
3.3	A Usina Solar Fotovoltaica	67
3.4	Aquisição de dados	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1	Estimativa de valores sem registro por algoritmo de projeção histórica linearizada	75
4.2	Análise e avaliação do comportamento complementar entre as fontes da usina híbrida	76
5	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXO A - FICHA DE DADOS INVERSOR SUNGROW SG110CX	92
	ANEXO B – CÓDIGO E RESULTADOS DA PROJEÇÃO HISTÓRICA ESTIMADA DOS VALORES DE GERAÇÃO EÓLICA NOV/2023-ABR/2024	94
	ANEXO C – POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 80M DE ALTURA	96
	ANEXO D - IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL SAZONAL	97

1 INTRODUÇÃO

No mundo atual, onde o debate sobre sustentabilidade e neutralização das emissões de gases de efeito estufa está cada vez mais em evidência, o fomento de fontes de energia renovável tornou-se fundamental para se ter um sistema elétrico cada vez mais descarbonizado. Portanto, com foco em encarar o desafio da estabilidade dos sistemas de geração de energia limpa, enfatizaremos duas fontes de energia renováveis variáveis, a fonte eólica e a fonte solar.

Nesse contexto, a energia eólica e energia solar têm se destacado significativamente nos últimos anos em termos de investimentos, pesquisas e ampliação da capacidade instalada mundial (Santos; *et al.*, 2020, p. 1). Sob esta óptica, em 2023, o Brasil conquistou a 6ª colocação do Ranking Mundial de Capacidade Instalada de Energia Solar, bem como finalizou o ano na 4ª colocação como o país que mais instala, fato que exemplifica a ampliação da capacidade energética do país (IRENA, 2024). Ademais, o Brasil foi também, no mesmo ano, o 6ª colocado mundial em capacidade instalada de energia eólica onshore e o 3º país que mais instalou eólicas (GWEC, 2024).

Consoante a este fato, de acordo com o último Balanço Energético Nacional (BEN), relatório anual fundamental para atividades de planejamento e acompanhamento do setor energético nacional, o Brasil expandiu sua capacidade instalada de energia elétrica em 8,4 GW no ano de 2023 (EPE, 2023), e 90,4% desse adicional, equivalente a 7,59 GW, são representados por usinas eólicas e solares.

Sob esta ótica, a nível de comparação, a Usina Hidrelétrica (UHE) de Belo Monte, quarta maior UHE do mundo em potência instalada, localizada estado do Pará, possui 11,23 GW de capacidade instalada. Ou seja, em 1 ano de desenvolvimento energético o Brasil aumentou quase uma UHE de Belo Monte, cuja construção durou 8 anos (SOUSA JÚNIOR; REID; LEITÃO, 2006), em capacidade instalada total, com energia limpa proveniente de Usinas Solar Fotovoltaica (UFVs) e usinas eólicas.

Outrossim, para além da comparação da produção bruta de energia, ainda que a usina hidrelétrica gere energia limpa, não é possível ignorar que a implementação de uma UHE envolve muitos danos socioambientais de grande impacto, não encontrados nas matrizes supracitadas, devido à necessidade de alagar hectares de área para formação das barragens, o que destrói tanto a vida da fauna e da vegetação natural, afetando negativamente o ecossistema local, quanto remove comunidades ribeirinhas de seus lugares de origem.

No entanto, essa inserção em massa de energias renováveis na matriz energética brasileira, com foco na solar e na eólica, ao passo que dependem de características de tempo e

clima, apresentam uma intermitência inerente. Essa problemática, causada por tais variações, afeta fortemente o fator de capacidade dessas plantas e, simultaneamente, a demanda de eletricidade, como em períodos muito frios ou em ondas de calor. Conseqüentemente, essa integração torna a matriz energética, cada vez mais, vulnerável a variações climáticas e temporais. Esse cenário, por sua vez, requer o desenvolvimento de estratégias para impedir instabilidades na geração de energia, com o objetivo de que a produção acompanhe a demanda sem muitas flutuações significativas.

Para mitigar esse problema, usinas de geração híbrida, que combinam duas ou mais fontes de produção de energia, são uma ótima solução para esse impasse, visto que elas apresentam diversas vantagens, sendo a principal delas a complementaridade das fontes.

Nessa perspectiva, Jerez; *et al.*, 2023 ponderou que:

[...] para enfrentar o desafio da estabilidade de um sistema de fornecimento de energia limpa, centramo-nos aqui em duas energias renováveis variáveis, a energia eólica e a energia solar fotovoltaica, já concretizadas e suprindo grandes porções de demanda em muitos países. Além disso, apresentam um certo grau de complementaridade espaço-temporal que poderia ser explorado para reduzir a variabilidade da produção combinada eólica e solar e mitigar as chamadas secas energéticas (Jerez; *et al.*, 2023, p. 1).

Enfatizando as fontes solar e eólica, as diferenças substanciais entre o máximo e mínimo de geração durante o dia e entre os dias, em função da energia disponível pelo sol e vento, respectivamente, em determinadas condições de tempo, clima e localidade, podem ser aproveitadas de forma sinérgica para se vencer o desafio de se ter sistemas estáveis de geração de energia limpa, que sofram cada vez menos com a intermitência e que, cada vez mais, contribuam para um Sistema Interligado Nacional (SIN) com melhores capacidades de acompanhar as curvas de demanda do país e que seja, cada vez menos impactado com a diminuição dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas em períodos sazonais de maior escassez hídrica.

Por fim, esse documento visa entender e caracterizar o comportamento desses dois recursos, sua complementaridade e seu equilíbrio ideal a partir de uma usina de geração híbrida eólico-solar localizada no litoral do Ceará, a fim de explorar a sinergia das fontes, por meio dessa complementaridade, visando maximizar a eficiência e a estabilidade da geração de energia elétrica oriunda de fontes renováveis intermitentes.

1.1 Justificativa e motivação

A complementaridade da geração eólico-solar em usinas híbridas apresenta diversas justificativas e motivações importantes para a transição energética, incluindo a otimização da utilização de recursos, a melhoria da eficiência energética, a redução de impactos ambientais e a viabilidade técnica e econômica. Apesar dos desafios técnicos, a adoção dessa abordagem integrada abre oportunidades para avanços em pesquisa e inovação, com o apoio de políticas públicas e incentivos governamentais adequados.

Deste modo, torna-se importante analisar a complementaridade da geração eólico-solar de uma usina de geração híbrida, pois esse conjunto exerce influência global, tendo em vista o crescimento exponencial das fontes supracitadas nas matrizes energéticas e suas consequências no sistema elétrico dos países.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho propõe-se a analisar a complementaridade entre a geração eólica e a geração solar em uma usina de geração híbrida localizada no litoral do Ceará, avaliando seu desempenho e potencial para se obter sistemas estáveis de geração de energias renováveis variáveis que sofram cada vez menos com a intermitência de suas fontes e contribuam com a confiabilidade e qualidade da energia que escoam pro Sistema Interligado Nacional (SIN), diminuindo assim a vulnerabilidade causada a matriz energética brasileira devido ao crescimento exponencial de sua porção de fontes renováveis intermitentes na última década e, certamente, nas décadas futuras.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

✓ Descrever e caracterizar o recurso eólico e o recurso solar na região da Usina de Geração Híbrida;

✓ Descrever e caracterizar os aspectos técnicos dos componentes da Usina de Geração Híbrida

- ✓ Apresentar os meios utilizados para a obtenção dos históricos de geração de energia da UFV e da Eólica, e a solução para estimar seus valores sem registro;
- ✓ Analisar e avaliar o comportamento complementar entre as curvas de geração eólica e de geração solar ao longo dos períodos determinados;
- ✓ Avaliar o desempenho da usina híbrida comparando os reendimentos individuais da geração eólica ao longo dos períodos determinados.

1.3 Metodologia

O presente estudo se classifica como exploratório, pois compreende a revisão dos conceitos e das teorias associadas ao tema em questão, presentes na literatura especializada do campo científico relacionado.

Nesse contexto, de acordo com Gil (1999):

As pesquisas exploratórias têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista, a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores. [...] envolvem levantamento bibliográfico e documental, entrevistas não padronizadas e estudos de caso (GIL, 1999, p. 43).

Por sua vez, a pesquisa bibliográfica, para Fonseca (2002), é exercida:

[...] a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem porém pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta (FONSECA, 2002, p. 32).

Diante do exposto, com o intuito de embasar a pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados ao tema abordado, seguida da leitura e do registro das teorias, dos conceitos e das metodologias propostas pelos teóricos estudados. Os conceitos-chave provenientes dessa leitura foram aplicados diretamente às perguntas formuladas pelos objetivos do estudo e ordenados conforme a sua utilização nos capítulos específicos e relativas seções.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho de conclusão de curso constituir-se-á por cinco capítulos, sendo o primeiro deles a Introdução, dando um embasamento geral do cenário das energias renováveis de fonte eólica e solar no Brasil e suas possibilidades enquanto combinadas como uma usina de geração híbrida.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica das nuances que envolvem o trabalho, como cenários de potencial de recursos renováveis e fundamentos técnicos e teóricos acerca da geração eólica e da geração solar.

No terceiro capítulo, é feita a proposição do trabalho, apresentando dados de localidade e informações técnicas da planta eólica e solar, além da forma que se adquiriu os dados de geração de cada uma para poder realizar as análises comparativas de comportamento complementar entre as curvas de geração das plantas.

No quarto capítulo, se demonstra como foram realizadas as análises comparativas e se discute os seus resultados.

No quinto capítulo, se apresenta o desfecho para o assunto abordado nos demais capítulos, realizando a constatação de os resultados apresentados pelas análises satisfizeram os objetivos do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Potencial solar do Brasil

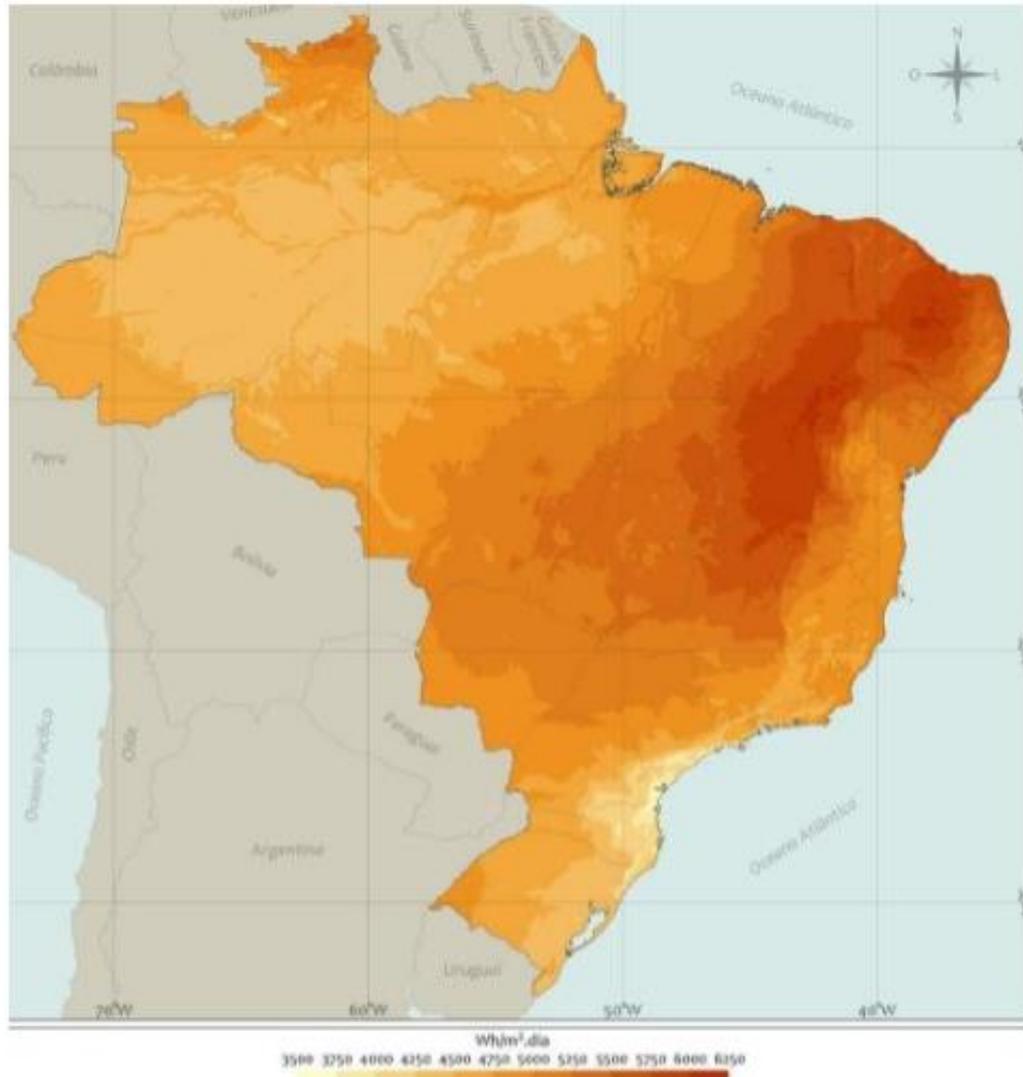
O Brasil é considerado um dos mercados promissores de energia solar da América Latina, beneficiado pelas condições climáticas favoráveis para geração solar, com alto nível de irradiação solar em grande parte do seu território, especialmente nas suas regiões nordeste e centro-oeste, bem como triângulo mineiro/norte de Minas Gerais (Dias, 2023, p. 1).

A fonte solar teve acréscimo de 3 Gigawatts à matriz energética brasileira, entre janeiro e setembro de 2023, configurando o maior incremento da capacidade de geração solar centralizada da história no Brasil, com 18 mil usinas solares instaladas em território nacional, capazes de produzir uma potência de 10,3 Gigawatts (Brasil, 2023). Em 2022, por exemplo, o acréscimo do ano todo foi de 2,5 Gigawatts, inferior aos 3 GW já instalados entre janeiro e setembro de 2023.

Outrossim, é pertinente destacar a particularidade do Brasil enquanto matriz energética. Nesse sentido, no país, há o excesso de oferta de energia renovável aliada a um lento crescimento de demanda, que por sua vez é incapaz de absorver o grande potencial de investimento que o país é capaz de atrair. Sob essa perspectiva, motivado pela busca global de investimentos em tecnologias renováveis de produção de energia como a energia solar, eólica onshore e offshore, super baterias para armazenamento e produção de hidrogênio verde, pode-se vislumbrar um cenário de forte expansão da demanda por energia elétrica no Brasil para os próximos anos, oferta que será atendida em grande escala pela abundância de recursos renováveis do país. (ABEEólica, 2022 p. 16).

Holanda (2024, p. 23), define que de acordo com o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito - CRESESB (2014, p. 42), entende-se irradiação solar como energia incidente por unidade de superfície de um dado plano. Vinculando, portanto, esse termo à quantidade de energia disponível [...] e que é possível estimar que a energia fornecida pelo Sol à Terra, seja de, aproximadamente, $1,5 \times 10^{18}$ kWh. Correspondendo, em 2006, à 10000 vezes o consumo mundial de energia. Dito isso, na Figura 1 está ilustrada a média anual de irradiação global horizontal do Brasil.

Figura 1: Média anual de irradiação global horizontal no Brasil



Fonte: (BRASIL, 2017).

Em concordância com o ilustrado na Figura 1, é fato que a Região Nordeste apresenta as maiores taxas de incidência radiação solar horizontal diária, medido em $\text{Wh/m}^2\text{dia}$. Nesse sentido, partindo da premissa de que o Sol fornece à Terra aproximadamente $2,55 \times 10^{15}$ kWh de irradiação solar média diária (NASA, 2023), e o consumo global de energia é de aproximadamente 456,5 terawatts-hora (TWh) por dia (Agência Internacional de Energia, 2023), a energia radiante disponível é aproximadamente 5.590 vezes maior do que a demanda global diária de energia em 2023. Assim, partindo desse dado, é possível compreender a força da região em questão como resposta frente ao desafio de descarbonização da matriz energética brasileira por meio da energia solar.

Outrossim, regiões mais frias, como áreas de serra, ou próximas ao mar são vistas também como bastante vantajosas para a implementação de uma usina de energia solar, devido à influência da temperatura nos módulos fotovoltaicos, que é inversamente proporcional à geração (Holanda, 2024, p. 24).

Por fim, para Rocha; Pompeu (2024, p. 194) é inegável o avanço do Brasil nesse cenário mundial. Em território nacional, os Estados do Nordeste têm contribuição impar para esse posicionamento global, uma vez que eles se sobressaem pelas suas características naturais favoráveis de localização geográfica, bem como pela combinação de fatores da eminente incidência solar, no tocante ao potencial solar e à constância e estabilidade anemométrica, na medição da captação de velocidade e intensidade dos ventos.

2.1.1 Potencial solar do Ceará

Após o entendimento do potencial produtivo do Nordeste sob a ótica da energia solar, é crucial ressaltar a relevância do estado do Ceará nesse contexto. Assim, acerca do tema, Pereira Jr. (2021) descreve que:

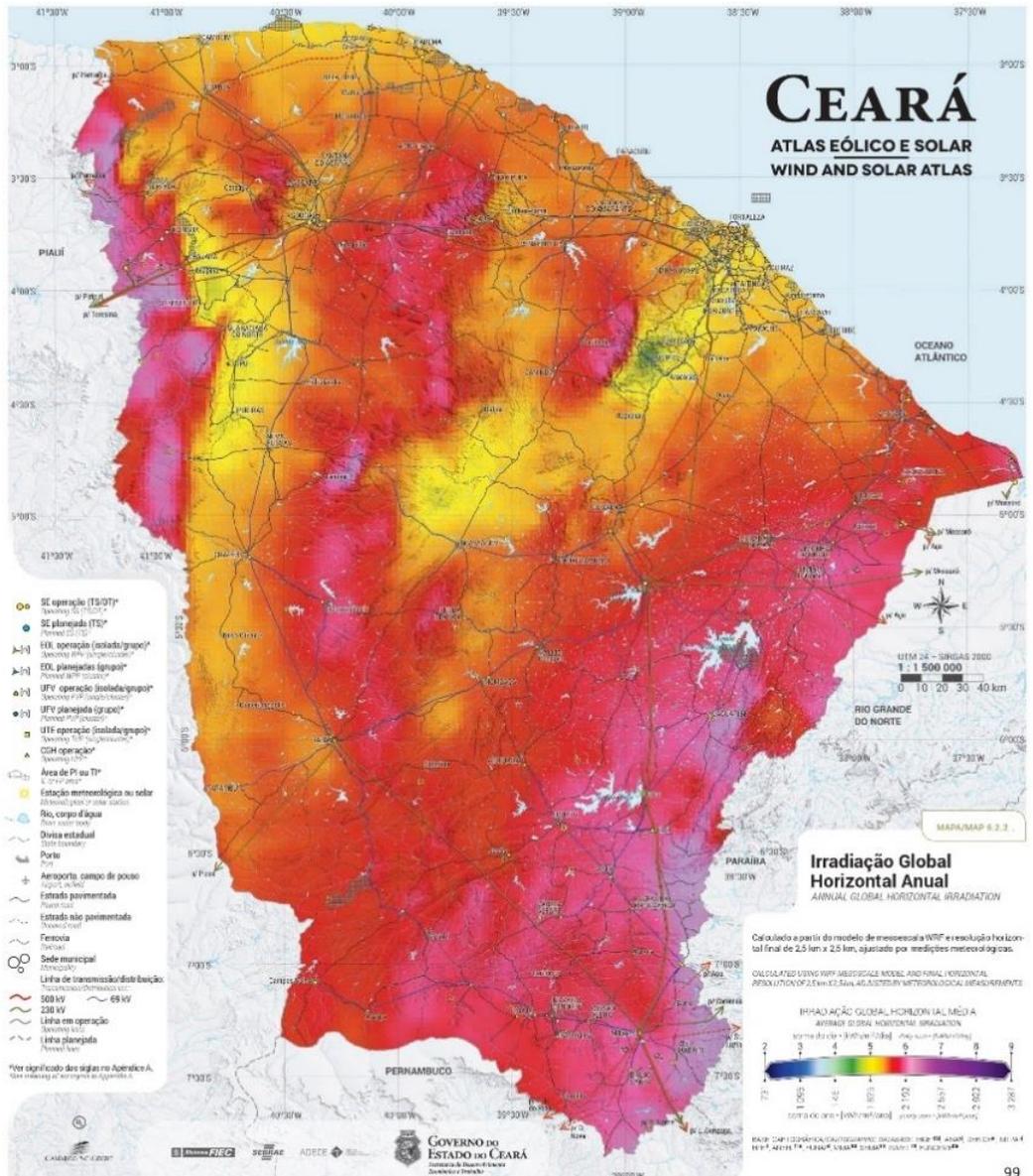
[...] a principal razão para o desenvolvimento de fontes adicionais de energia é o forte aumento da demanda que o mundo vai enfrentar nos próximos anos, em 2020, segundo a ANEEL, o Ceará ultrapassou a marca de 10 mil sistemas de energia solar instalados em residências, comércios, indústrias, propriedades rurais e prédios públicos [...] apenas nos dois primeiros meses de 2021, o Estado recebeu mais 622 novas conexões de sistemas solares. Com esse incremento, o Ceará se consolida como maior potência do Nordeste. O município de Fortaleza é o único com mais de 1 milhão de habitantes localizado no chamado cinturão solar do Brasil, o que facilita a instalação de geração distribuída de energia.

Sob a premissa em voga, conforme o relatório ANEEL/IBAMA (2023) a capacidade já instalada de energia solar é de 1.559 MW, sendo ela distribuída em 35 empreendimentos ao longo do estado. Ademais, outros 419 parques solares estão em construção e, juntos, em breve, vão gerar 16.738,3MW de potência elétrica (Ceará, 2024).

Nessa perspectiva, avalia-se, segundo metodologia aplicada no Atlas Eólico e Solar, que o potencial solar e eólico do Ceará é de 1.363,2TWh/ano. Seguindo essa lógica, para a compreensão da magnitude desse dado, é necessário entender que, uma vez integralmente aproveitado, tal potencial seria equivalente a cerca de 40% da oferta interna bruta nacional de

energia em 2018, equivalente a 3.354,1 TWh (Ceará, 2019, p. 122), evidenciando o potencial gerador do estado através das fontes eólica e solar. Nesse sentido, observa-se o potencial solar do Estado na Figura 2:

Figura 2: Irradiância Global Horizontal do estado do Ceará



Fonte: (CEARÁ, 2019, p. 99).

A partir da Figura 2, é possível analisar a irradiação incidente sobre o estado do Ceará. Sob esta óptica, será considerada a Irradiância Global Horizontal como referência, para que haja melhor aproveitamento fotovoltaico, visto que ela quantifica a radiação que incide em uma superfície planta horizontal (TOLMASQUIN, 2012).

Assim, o nível anual de Irradiância Global Horizontal sob o estado varia entre 05 e 07 kWh/m²/dia, em geral ótima em todo o território, sendo as regiões do vale do Jaguaribe ao sul do Estado as que apresentam os maiores e mais regulares índices, devido a sua posição geográfica no globo, fato ilustrado pela coloração mais escura desses setores na Figura 2.

Nesse contexto, o Ceará é um “paraíso” para investimentos na geração solar, com ótimos níveis de irradiação global horizontal constantes o ano todo. Exemplificando esse título atribuído ao estado, a Tabela 1, a seguir, apresenta uma estimativa quanto ao potencial solar do Ceará, abrangendo a relação entre a capacidade instalável e a capacidade de geração de energia anual dessas áreas, tanto na sua área urbana quanto na sua área não urbana.

Tabela 1: Potencial Solar do Ceará

	Capacidade Instalável Solar (GW)	Geração de energia Anual solar (TWh/ano)
Urbano	1,46	2,16
Total Solar Não urbano	643	999

Fonte: (CEARÁ, 2019, p. 122) adaptado pelo autor do trabalho.

2.2 Potencial eólico do Brasil

No que tange o setor eólico, é evidente a sua evolução no país ao longo dos últimos anos. Nessa lógica, em 2014, segundo dados do Governo Federal, o Brasil ultrapassou a Alemanha no que se refere à expansão da energia eólica, atingindo o segundo lugar mundial, atrás apenas da China, que, por sua vez, é o país que mais investe em fontes energéticas no mundo em razão de sua alta demanda (Oliveira; Silva, 2024, p. 2).

Nesse cenário promissor, em 2022, o Brasil manteve sua posição no Ranking Mundial de capacidade eólica acumulada elaborado pelo GWEC (Global Wind Energy Council). Já no ranking que contabiliza especificamente a nova capacidade instalada no ano, ilustrado na Figura 3, o país aparece em terceiro lugar pelo terceiro ano consecutivo (ABEEólica, 2022 p. 14).

Figura 3: Ranking nova capacidade instalada de eólica onshore em 2022



Fonte: (ABEEólica, 2022 p. 14), adaptado pelo autor do trabalho.

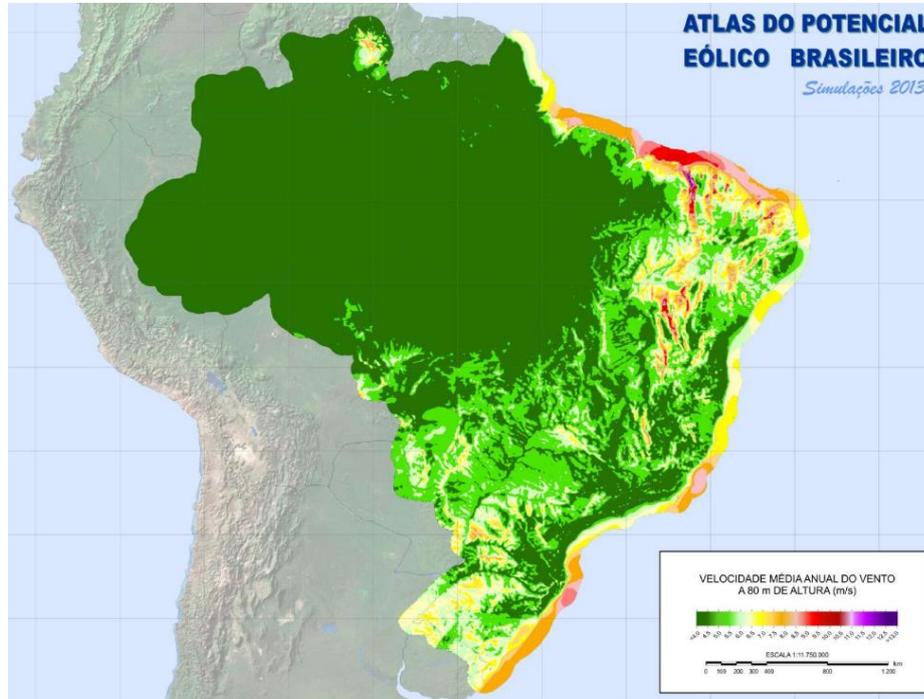
Ainda sobre o potencial brasileiro, é possível compreender a sua regionalização a partir da análise do Mapa de Velocidade ilustrado na Figura 04, com foco no Nordeste e no Sul do país. A velocidade dos ventos é um dos fatores determinantes para a instalação de um complexo de energia eólico, tendo em vista que a sua cinética rotaciona as pás e essa energia mecânica é convertida, posteriormente, em energia elétrica, sendo ambas, portanto, diretamente proporcionais. Assim, as regiões supracitadas detêm o maior potencial de eficiência no território nacional.

Nesse cenário, é pertinente destacar que o Nordeste sofre influência do Efeito da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Desse modo, visto que essa região é caracterizada pela baixa pressão, devido ao encontro dos ventos alísios, os ventos tendem a ser mais fortes. Essa característica ocorre, sobretudo, no litoral (Análise da variabilidade e similaridade da velocidade do vento no Nordeste do Brasil, 2018).

Já no tocante ao Sul do país, ela é caracterizada pelas frentes frias que advindas do sul do globo, o que causa uma aceleração dos ventos. Nesse sentido, entendendo que as massas de ar vindas do sul do globo estão em temperaturas menores do que as presentes no sul do Brasil, quando elas se encontram, há uma diferença de pressão. Desse modo, quanto maior for essa disparidade, maior será a velocidade dos ventos, sempre se deslocando da área de maior pressão (e menor temperatura), para a área de menor pressão (e maior temperatura), ou seja, do

sul do globo para a Região Sul os ventos ganham velocidade, o que é benéfico para a geração de energia eólica (REASE, 2024).

Figura 4: Velocidade média anual dos ventos no Brasil

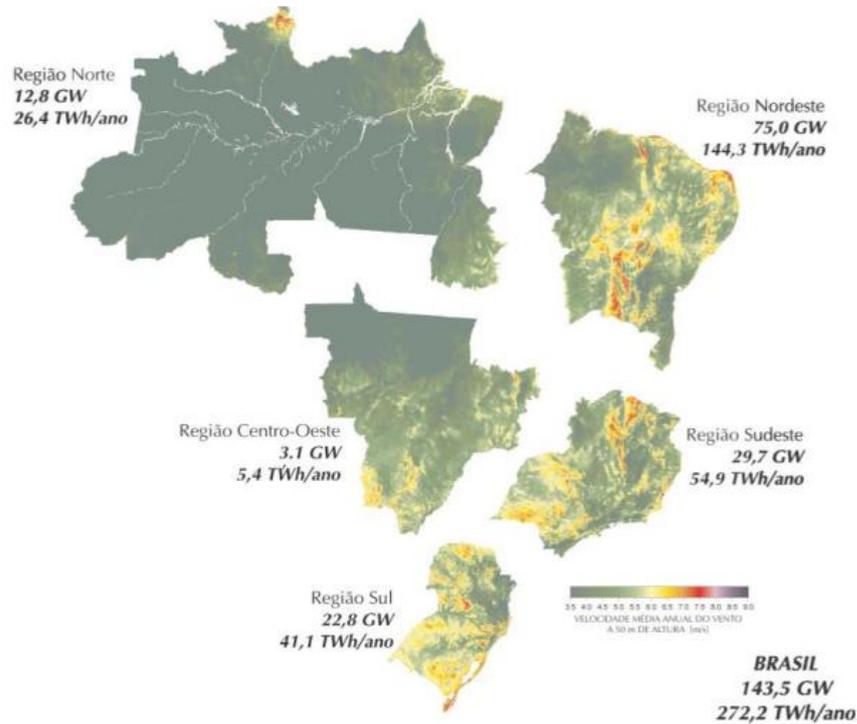


Fonte: (ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO, p.20, 2013).

Já anteriormente citada como referência de potencial no que tange a produção de energia solar, o Nordeste brasileiro é também, portanto, destaque no potencial eólico. Nesse sentido, com 75 GW, a região sozinha detém metade da capacidade de todo o país, como ilustrado na Figura 5. Não por acaso, a maioria das usinas existentes encontra-se nessa área do território nacional (Oliveira; Silva, 2024, p. 2).

Nessa ótica, a Tabela 2 exemplifica esse fato por meio de um ranking com os 5 maiores estados em potência eólica instalada no Brasil, sendo todos eles da Região Nordeste, em que o Ceará se destaca como o segundo maior em capacidade instalada em operação (ANEEL, 2023).

Figura 5: Potencial Eólico Brasileiro para ventos de 50 metros de altitude



Fonte: Extraído de (Amarante et al 2001, p. 44).

Tabela 2: Ranking dos maiores estados em potência eólica instalada

Estado	Empreendimentos em operação (kW)	Empreendimentos em construção (kW)	Construção não iniciada (kW)
Rio Grande do Norte	4.000	1.200	1.000
Ceará	2.000	600	800
Bahia	1.800	500	700
Pernambuco	900	300	400
Paraíba	600	200	300

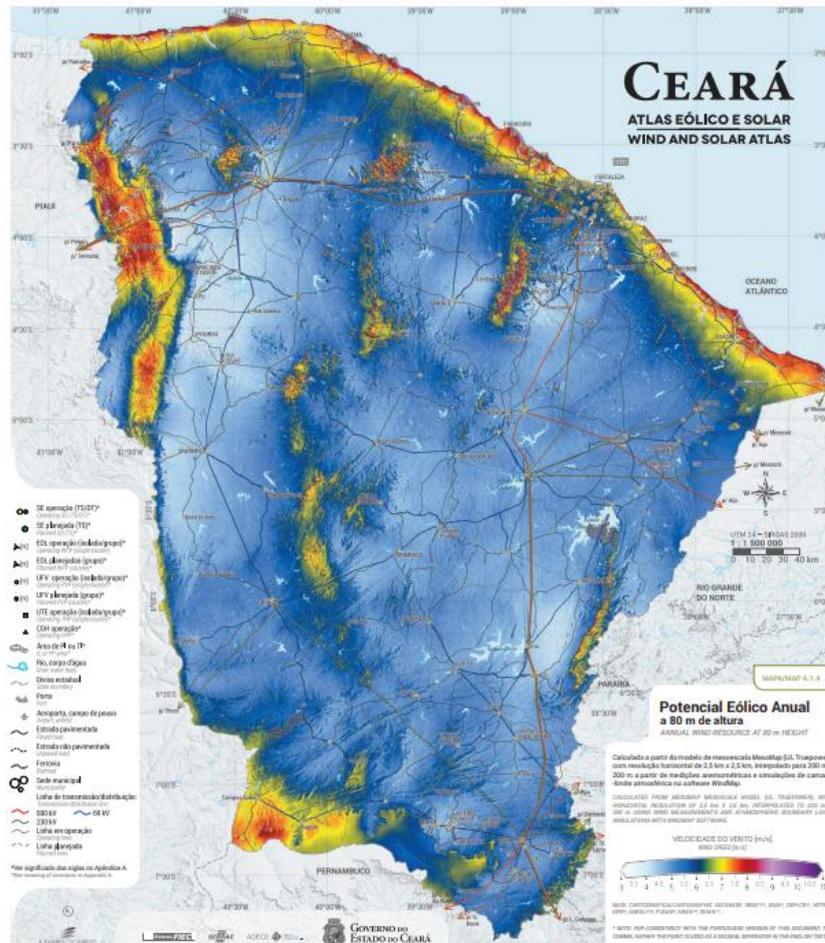
Fonte: (BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO; ANEEL, 2023), adaptado pelo autor.

2.2.1 Potencial eólico do Ceará

Quanto ao potencial eólico do Ceará, os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), mostram que o Estado possui 100 parques eólicos que totalizam 2.577 MW de capacidade e outros 72 empreendimentos, em construção ou obras não iniciadas, com capacidade contratada de 2.876MW. Há ainda, 26 empreendimentos de eólica offshore esperando licenciamento do Ibama que vão contribuir com 64,9 GW de capacidade instalada dentro oceano (Ceará, 2024).

Na Figura 6 está ilustrado o “Potencial eólico anual a 80m de altura”, no qual é possível destacar a predominância de maiores índices tanto no litoral e quanto nas regiões de serra no oeste, centro e sul do estado. Tais regiões chamam atenção por conta das velocidades médias do vento, que atingem marcas surpreendentes entre 7 e 11 m/s (Ceará, 2019, p. 85).

Figura 6: Potencial eólico anual a 80m de altura do estado do Ceará



Fonte: (CEARÁ, 2019, p. 85).

Sob este viés, acerca da região litorânea cearense, o potencial eólico estimado é de 13,5 GW. Todavia, ainda que detenha alto potencial, fatores como restrições ambientais, devido às áreas de preservação presentes na região, bem como as limitações de ordem topográfica reduzem a viabilidade plena do aproveitamento eólico. Sob essa óptica, cerca de 40% da área em voga pode ser utilizada para o desenvolvimento de projetos eólicos (ANEEL, 2023).

Por outro lado, o interior do Ceará, por sua vez, tem o seu potencial eólico concentrado em dois principais espaços: Serra da Ibiapaba e a Chapada do Araripe. Essas regiões têm uma topografia favorável à geração de energia eólica, devido a altitude que garante

baixa rugosidade somada a áreas com pouca declividade, fato que estimula a diversificação de fontes de energia no Estado (EPE, 2023).

Ainda sobre a temática em voga, a Tabela 3 fornece uma estimativa acerca do potencial eólico onshore, ou “em terra”, do estado do Ceará.

Tabela 3: Potencial eólico onshore do Ceará

	Capacidade instalável (GW)	Geração de energia anual eólica onshore (TWh/ano)
Total Eólico (Velocidade a 150m de altura > 7m/s)	94	362

Fonte: (CEARÁ, 2019, p. 122) adaptado pelo autor do trabalho.

A tabela acima demonstra que o Ceará se destaca pelo seu significativo potencial eólico onshore, sobretudo por características anteriormente citadas, sendo elas as condições climáticas e morfológicas do relevo da região. Esses indicadores, somados à velocidade dos ventos analisada na Figura 6, torna o estado um protagonista no potencial de implementação e no aproveitamento da fonte eólica para produção de energia renovável.

Assim, tal fato contribui não apenas para o crescimento isolado do setor eólico, mas também para a diversificação da matriz energética nacional, promovendo, por fim, a sustentabilidade ambiental.

2.3 Como funciona a geração solar

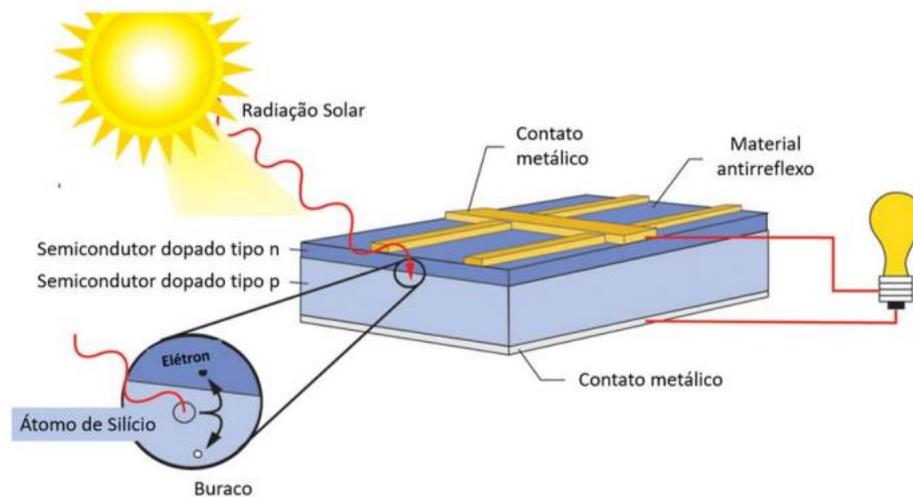
A produção de energia solar tem por base a captação da irradiação de luz do sol para a produção de energia elétrica limpa, nesse caso, classificada como fotovoltaica. Tal conversão se dá por meio de um sistema complexo, composto, sobretudo, por três tecnologias principais. São eles: a célula fotovoltaica, o módulo fotovoltaico e o inversor.

A células fotovoltaicas são dispositivos feitos de semicondutores, responsáveis pela conversão da irradiação solar em energia elétrica. Sua construção, baseada na constatação do físico Alexandre Edmond Becquerel, no início do século XIX, em que ao incidir com radiação luminosa um material semicondutor, elétrons tendem a se saltar de sua camada de valência para uma camada mais externa, chamada de camada de condução. Nesse contexto, essas células são

constituídas, normalmente, a partir do silício dopado com outros elementos, o que cria as camadas “p” e “n” que são o mesmo semicondutor de silício, mas dopados com diferentes elementos.

Expondo à irradiação solar, os elétrons absorvem dos fótons energia suficiente para deslocarem-se da banda de valência para a banda de condução, criando lacunas nas duas camadas, dando origem a pares de elétron-lacuna. Esses pares elétron-lacuna, quando próximos à junção p-n, são separados por um campo elétrico, criado pela diferença de potencial elétrico (DDP) entre as camadas. Os elétrons, por sua vez, são empurrados para a camada “n”, como um fluxo de elétrons, que é coletado pelos contatos metálicos da célula fotovoltaica gerando tensão contínua e corrente elétrica contínua nos terminais. (Green et al., 2017). Esse processo é ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Ilustração do efeito fotovoltaico no semicondutor de silício dopado



Fonte: (OAK, 2021).

2.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são equipamentos cuja função é maximizar o princípio do efeito fotovoltaico e viabilizar a geração de energia solar. Eles são formados por dezenas de células fotovoltaicas que, por meio do princípio explicado no tópico anterior, têm seus contatos metálicos ligados geralmente em série, mas também em paralelo, com outras células fotovoltaicas, com o objetivo de maximizar a tensão e a corrente elétrica à níveis significativos nos terminais de saída dos módulos.

Nesse contexto, convencionalmente, existem duas composições que formam os módulos fotovoltaicos. Os módulos de silício monocristalino e os módulos de silício policristalino, cuja diferença se dá somente no método de manipulação do silício na confecção das células fotovoltaicas. Enquanto as células policristalinas são produzidas a partir de vários pequenos cristais de silício, que são fundidos dando origem a grandes blocos, que, por sua vez, dão origem e dão origem, as células monocristalinas são formadas a partir de um único bloco cristalino, apresentando maior pureza, melhor condutividade elétrica e, conseqüentemente, maior eficiência, tendo em vista que a estrutura policristalina é formada por vários cristais irregulares, o que torna mais dificultosa a passagem de corrente elétrica.

A seguir, é possível observar essa diferença estrutural dos materiais na Figura 8.

Figura 8: Diferença entre módulo monocristalino e policristalino



Fonte: (CANAL SOLAR, 2019).

Essa energia de corrente contínua (CC) passa pelo inversor solar, transformando-se em corrente alternada (CA). Ao fim desse processo, a energia gerada através da conversão da irradiação solar em energia elétrica, pode finalmente ser injetada na Rede Elétrica da concessionária, no caso de um inversor de tecnologia On Grid, ou pode ser armazenado em algum sistema de armazenamento, como baterias, para uso posterior, no caso um inversor de tecnologia Off Grid.

Por fim, para além das células em questão, os módulos fotovoltaicos são compostos também por materiais que focam na sua preservação física e no seu aproveitamento energético. Assim, eles contêm camadas de vidro, como também uma camada contra danos mecânicos, camada de proteção contra entrada de umidade e outros agentes externos, também outra camada com o fito de elevar a quantidade de luz disponível para as células fotovoltaicas, como uma camada antirreflexo (Canal Solar, 2021).

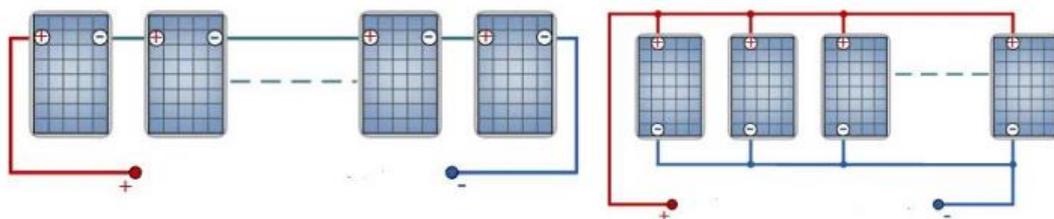
2.3.2 Arranjos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, à fim de se obter o nível de potência dimensionado para um projeto, são ligados entre si, seja em série ou em paralelo, com o fito de maximizar a captura da irradiação solar e a eficiência do sistema. Dessa forma, os arranjos fotovoltaicos é como são chamadas as ligações de conjuntos de módulos, como se pode ver na Figura 9.

Uma única célula fotovoltaica pode resultar em tensões de 0,6V e chegar até 3W de potência. Portanto, ligações entre elas são feitas em série e paralelo, a fim de se obter maiores níveis de potência, fazendo com que, até certos níveis, as células tenham comportamento de uma fonte de corrente. (TOLMASQUIN, 2012). Atualmente, módulos convencionais que estão no mercado chegam a potências de 670W e apresentam tensões de saída de até 50V. Por outro lado, os inversores convencionais monofásicos suportam em suas entradas de arranjos, chamadas de Maximum Power Point Tracker (MPPTs), até 600V, ao passo que os inversores convencionais trifásicos suportam em suas entradas até 1100V.

Pode-se pensar nos arranjos fotovoltaicos como numa associação de componentes, ensinado em Circuitos Elétricos, em que numa ligação em paralelo, as correntes elétricas dos módulos são somadas, mantendo-se o nível de tensão entre todas elas. Já na ligação em série, por sua vez, funciona na lógica reversa, a corrente dos módulos é mantida a mesma para todos os módulos fotovoltaicos, enquanto as tensões de cada módulo são somadas.

Figura 9: Esquema de ligação em série e em paralelo de módulos fotovoltaicos



Fonte: (ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS, 2020).

2.3.3 Inversores

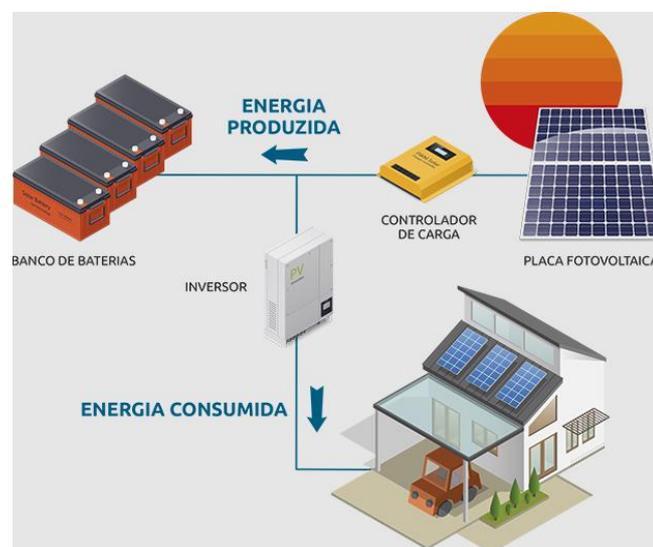
Para um sistema fotovoltaico, o inversor pode ser considerado como o “coração”, tendo em vista que quase a totalidade dos equipamentos elétricos hoje tem alimentação em corrente alternada, forma convencional de distribuição de energia pelas concessionárias no

Brasil, e justamente ele tem esse papel importantíssimo da conversão da energia em corrente contínua, proveniente dos módulos fotovoltaicos, em corrente alternada.

Essa sua funcionalidade de conversão CC-CA se dá pela atuação de chaves semicondutoras, geralmente, no caso do inversor solar, de Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBTs) que, na topologia convencional de ponte completa, está presente com 4 unidades e, ordenadamente, modulam sua comutação a fim de que a tensão e corrente contínua que se ligam ao barramento comum (módulo fotovoltaico), tenham saída alternada e ajustada na frequência e tensão da rede elétrica da concessionária local.

Atualmente, no mercado, duas tecnologias de inversores são as mais comuns, os inversores ongrid e os inversores offgrid. Os inversores offgrid é a aplicação em que não há injeção de energia para a rede, ela é produzida nos módulos e armazenada em corrente contínua em baterias, e nos momentos programados, o inversor, ligado às baterias, converte em corrente alternada e disponibiliza energia aos equipamentos conectados à sua saída, como ilustra a Figura 10. É uma aplicação usada em locais remotos, em que a rede elétrica mais próxima está há quilômetros de distância.

Figura 10: Diagrama de uma instalação com inversor offgrid

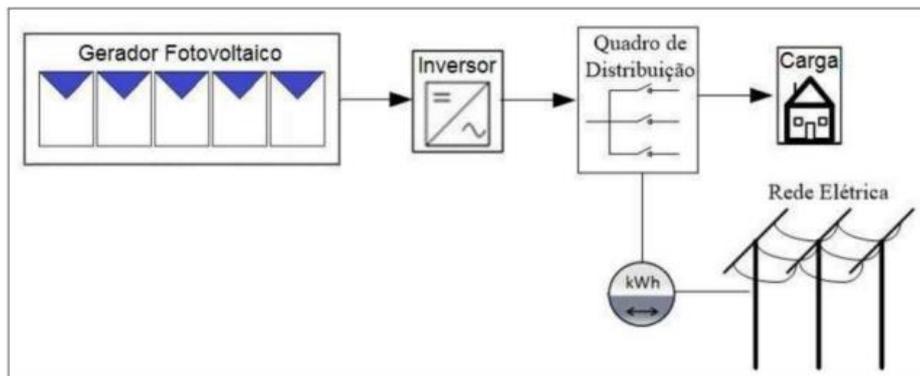


Fonte: (BMC ENERGIA, 2017).

Por sua vez, os inversores ongrid são uma aplicação com foco na injeção de energia para a rede elétrica, em que a energia em CC proveniente dos módulos fotovoltaicos é transformada em corrente alternada, essa energia em corrente alternada, por sua vez, é ligada em paralelo com as demais cargas no Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), que já passam a

consumir a energia gerada pelo sistema fotovoltaico, e a energia gerada excedente é injetada na rede elétrica por intermédio de um medidor bidirecional, responsável por contabilizar o consumo e a energia injetada. Esse processo é ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014) adaptado.

Ademais, o inversor também tem a ver com a segurança do sistema fotovoltaico. Partindo do entendimento de que esse equipamento realiza a conversão da energia gerada fazendo interface com os parâmetros da rede elétrica local, ele também atua no controle e proteção contra problemáticas como sobretensão, subtensão, sobrefrequência, subfrequência e fugas de corrente, além de surtos de energia nas suas entradas.

2.4 Vantagens e desvantagens da energia solar

Quando falamos da produção de energia solar, estamos referenciando um sistema complexo com vantagens e desvantagens de âmbito social, econômico e ambiental, e é sobre eles que os próximos tópicos irão discorrer.

2.4.1 Vantagens da energia solar

- **Sustentabilidade ambiental:** a energia solar não apenas é uma fonte de energia limpa, livre da emissão dos gases poluentes que agravam o efeito estufa, como a sua própria instalação é menos onerosa para o meio ambiente em comparação com outras fontes de geração de energia limpa, como as hidrelétricas.

- **Fonte renovável:** a fonte energética da energia solar é a irradiação solar, um recurso que, por sua vez, não é finito. Assim, sua inesgotabilidade é positiva do ponto de vista da exploração mercadológica, estando, a fonte, sempre disponível para ser usada.
- **Baixa manutenção:** no que tange a sua manutenção, esse sistema tem performance média de 25 anos sem a necessidade da troca de equipamentos, assim asseguram os fabricantes. Assim, ele não é oneroso, sendo a limpeza dos painéis a atividade principal de manutenção, devendo ser realizada a cada 6 meses, dependendo da localidade e sua característica de deposição de sujeira.
- **Alto retorno sobre o investimento:** Ocorre uma redução drástica na conta de energia, com custos que caem em média 90% do valor original, fazendo com que o investimento se pague, geralmente, em até 3 a 5 anos após início da operação do sistema.

2.4.2 Desvantagens da energia solar

- **Dependência das Condições Climáticas:** Entendendo que a fonte dessa produção energética é a irradiação solar, a eficiência do sistema pode ser prejudicada por condições climáticas adversas, como dias nublados, chuvosos, ou até mesmo a formação de sombra. Fazendo-se necessário a implementação de sistemas de armazenamento de energia, para contornar essa intermitência intrínseca.
- **Espaço Necessário para Instalação:** Tendo em vista que a densidade da geração de energia solar é baixa, pouco espaço e/ou telhados inadequados podem impossibilitar a instalação de painéis solares e, conseqüentemente, a produção solar fotovoltaica. Assim, essa modalidade produtiva exige um espaço considerável.
- **Perda de potencial:** Como supracitado, são usadas placas antirreflexo em alguns módulos para evitar a perda de potencial por não aproveitamento pleno da irradiação solar. Todavia, as perdas por reflexão da luz e por calor, ainda são muito significativas e inevitáveis. Em média, módulos monocristalinos tem eficiência de 15% a 22% nessa conversão, em relação a sua capacidade, ao passo que os policristalinos apresentam eficiência de 14% a 20% nessa conversão.

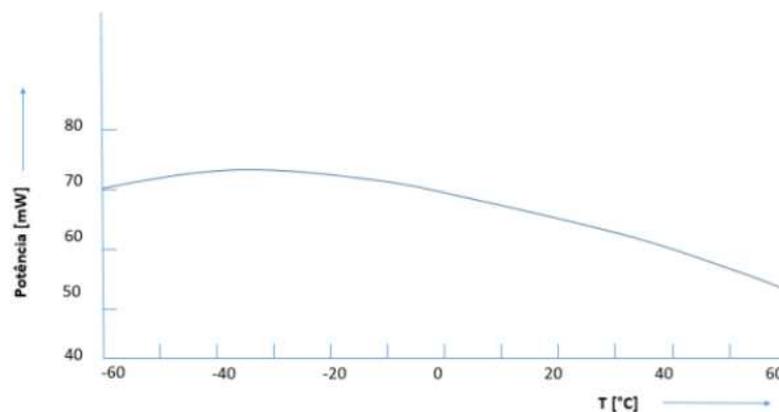
- **Alto Custo Inicial:** Ainda que seja muito vantajosa, como supracitado no tópico anterior, a energia solar ainda tem uma barreira de entrada muito grande em razão do seu alto custo inicial. Assim, tanto a percepção de ganho monetário só vem com o longo prazo, quanto o capital necessário para a aquisição dessa matriz são uma problemática para a sua popularização.

2.5 Fatores que influenciam na geração de energia solar

2.5.1 Temperatura

A eficiência dos painéis solares é inversamente proporcional ao aumento da temperatura. Nessa lógica, quanto mais quente, precisamente acima de sua temperatura ideal, por volta de 25° graus celsius, mais improdutivo aquele sistema será, como exemplificado na Figura 12. Isso acontece porque as altas temperaturas ocasionam alterações no material semicondutor das células, o que provoca a diminuição da tensão elétrica mantendo-se a corrente nos mesmos níveis, causando uma diminuição da potência gerada.

Figura 12: Comportamento da potência do módulo em função da temperatura



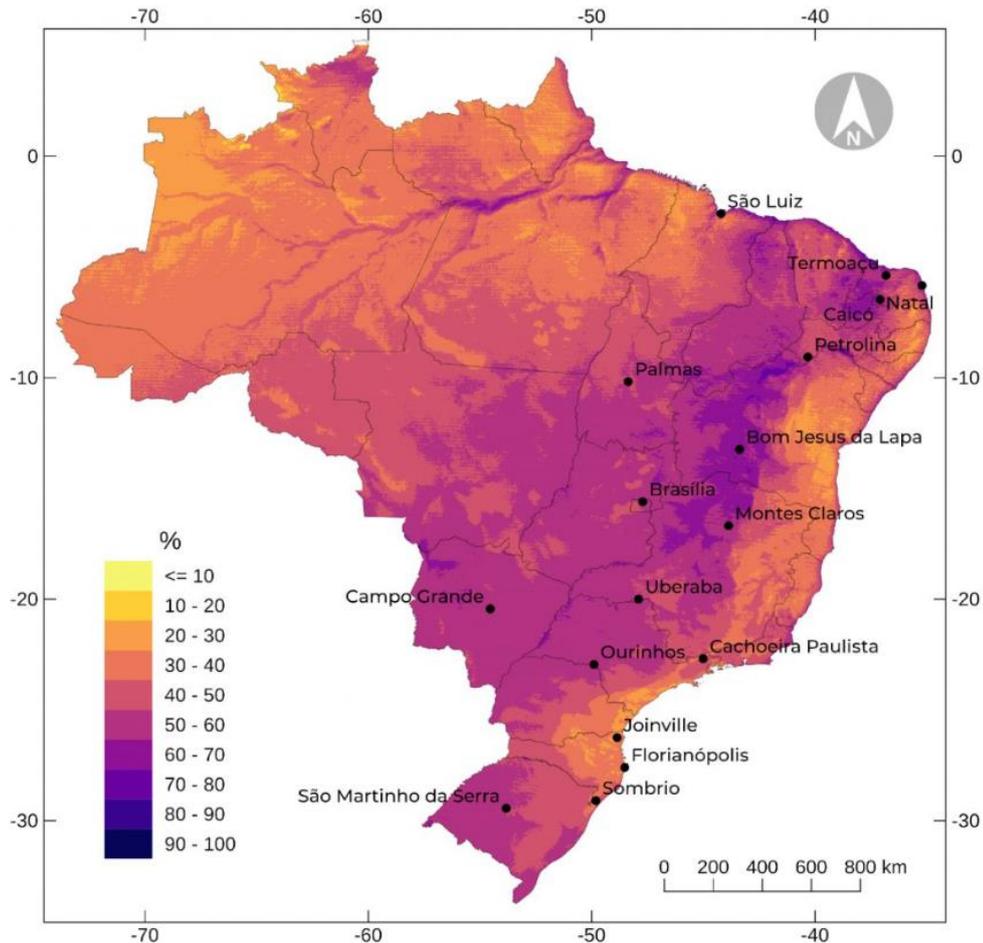
Fonte: (LOCKS, GIOVANA; 2019).

2.5.2 Taxa de irradiação solar

Partindo da premissa anteriormente exposta de como ocorre a produção da energia solar, é fato que a quantidade de energia solar que incide sobre os módulos afeta a quantidade de eletricidade gerada. É notório que um sistema de energia solar depende de mais de um fator para determinar a sua produção, todavia, isolando a variável da irradiação solar, pode-se afirmar

que relação é diretamente proporcional, assim, quanto maior a incidência de irradiação global, medida em Wh/m^2 , numa determinada localidade, maior a sua conversão em eletricidade, portanto, mais energia é produzida. Na Figura 13, é possível observar essa premissa exemplificada sob o território brasileiro:

Figura 13: Variabilidade temporal da radiação solar em superfície



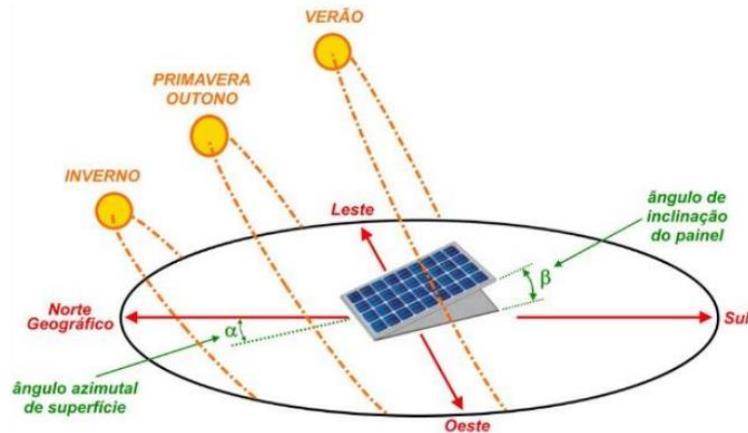
Fonte: (CENTRO DE CIDADE CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 2023).

2.5.3 Inclinação dos módulos

Entendendo que os módulos concretizam o efeito fotovoltaico, é fato que a maneira como o módulo está posicionado em relação à sua localidade influencia a produção de energia eólica, como visto na Figura 14. Nesse sentido, para o aproveitamento máximo da energia solar, a posição das células deve ser tal, de forma que a incidência dos raios solares incida o mais perpendicular possível, fato ilustrado na Tabela 4, que relaciona a inclinação do painel com a latitude geográfica do local. Dentro desse tópico, o Nordeste se destaca por estar próximo à

Linha do Equador, na zona de irradiação solar perpendicular do globo terrestre – com pouca alteração, o que torna o aproveitamento da incidência da radiação solar direta o melhor possível.

Figura 14: A inclinação dos módulos em função da localidade



Fonte: (CURSO SOLAR USP; 2021).

Tabela 4: Inclinação recomendada do módulo em relação a latitude local

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha=10^\circ$
11° a 20°	$\alpha= \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha= \text{latitude} +5^\circ$
31° a 40°	$\alpha= \text{latitude} +10^\circ$
41° ou mais	$\alpha= \text{latitude} +15^\circ$

Fonte: (VILLALVA, 2012).

2.5.4 Sombras e obstruções

Como anteriormente exposto nas desvantagens do tópico 2.4.2, qualquer fator que atrapalhe, bloqueie ou reduza a incidência de luz do sol sob o módulo fotovoltaico, corrompe a sua eficiência, visto que reduz a área útil produtiva do módulo, ou seja, as células que, por algum motivo, tiverem exposição à radiação solar obstruída devem ficar improdutivas e, nos casos dos arranjos de células ligadas em série, uma célula obstruída pode causar a improdutividade de todo um bloco de células, o que prejudica significativamente a produção de energia dos módulos e, conseqüentemente, da planta como um todo. A situação de sombreamento do módulo pode ser vista na Figura 15.

Figura 15: Painel Fotovoltaico sob influência do sombreamento



Fonte: (GOOGLE IMAGENS, s. d.).

2.6 Como funciona a geração eólica

O setor eólico nada mais é do que uma alternativa às matrizes convencionais, sendo uma forma mais sustentável de gerar energia (LIMA; SANTOS; MOIZINHO, 2018).

Sob essa ótica, produzir energia eólica consiste em transformar energia cinética em energia elétrica. Nesse sentido, o vento, matéria prima dessa forma de geração, com a velocidade do deslocamento das massas de ar ataca as pás das turbinas eólicas aplicando, assim, uma força suficiente para fazê-las rotacionar sob um eixo, produzindo a energia mecânica. Por isso, a velocidade dos ventos é imprescindível para a eficiência dessa modalidade de produção energética.

Os parques eólicos podem ser de duas modalidades: onshore e offshore, ilustradas na Figura 16, sendo a primeira a mais comum. Nesse viés, os parques onshore são instalados em terra e demandam áreas extensas, isoladas e o mais livre de obstáculos possível para a sua instalação, já os parques eólicos offshore são os parques instalados em alto mar, local onde tem rugosidade muito baixa e costumam ter ventos mais fortes, por conta disso possuem pás maiores, visto que o meio permite por não ter espaço tão limitado, mas em contrapartida os custos de instalação são mais altos. Em 2023, o Brasil finalizou o ano em sexto lugar no Ranking de Capacidade Total Instalada Onshore e em terceiro lugar no Ranking de Nova Capacidade Instalada de Eólica em Onshore (ABEEólica, 2023).

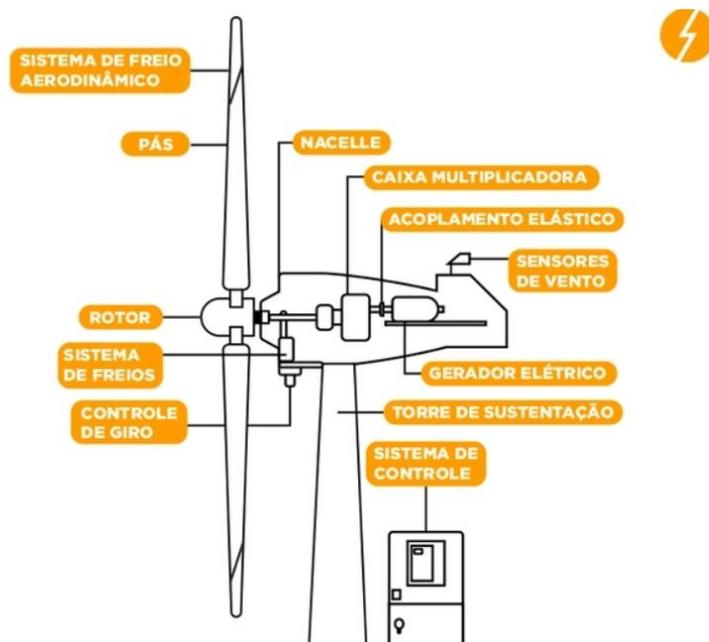
Figura 16: Instalações eólicas onshore e offshore



Fonte: (PORTAL SOLAR, s. d.).

No que tange a produção de energia eólica, a dinâmica de geração funciona sob o princípio da indução eletromagnética. Essa indução ocorre quando uma bobina de material condutor é imersa em um campo magnético variável, ou quando a bobina se move variando a área útil de sua secção reta que recebe incidência de campo magnético, causando variação do fluxo de campo, situações que resultam na indução de tensão elétrica nos terminais dessa bobina, corroborada pela Lei de Faraday. A primeira abordagem é a forma mais comum de produção de energia. Esse processo pode ser observado nas etapas abaixo, bem como os componentes envolvidos podem ser observadas na Figura 17.

Figura 17: Estruturas da turbina envolvidas na produção de energia eólica



Fonte: (PORTAL SOLAR, s. d.).

Etapa 01: Captura do vento

- Pás da Turbina: As diferenças de pressão que fazem o vento ganhar velocidade, deslocando assim massas de ar e atacando as lâminas (ou pás) da turbina, que por sua vez são as responsáveis pela captura inicial dessa energia cinética transformando-a em rotação.

Etapa 02: Regulação da velocidade

- Caixa de Câmbio (se aplicável): Presente em algumas turbinas, essa tecnologia prevê uma caixa de engrenagens ou Gearbox acoplada ao eixo do rotor do gerador, normalmente entre a turbina e o rotor, que aumenta velocidade de rotação do rotor, que nem sempre vai ser a velocidade necessária para a operação devida vide a velocidade rotativa das pás que pode sofrer com a característica intermitente e variável da velocidade dos ventos. O Gearbox, portanto, garante que o rotor atenda à velocidade rotativa exigida pelo gerador para geração de energia na frequência da rede elétrica local.

Etapa 03: Transmissão da rotação

- Rotor: As pás supracitadas entram em movimento com a cinética dos fluxos das massas de ar, convertendo essa energia cinética em energia mecânica rotacional, e por estarem conectadas ao eixo do rotor, transmitem a ele essa rotação. O rotor geralmente contém bobinas alimentadas por uma fonte CC, que formam um campo magnético. Esse processo de rotação do rotor cria um fluxo magnético rotativo dentro do estator do gerador.

Etapa 04: A energia elétrica

- Gerador: Dentro do estator do gerador há 3 enrolamentos, equidistantes entre si a um ângulo de 120° , que envolvem o rotor e que, sob influência do fluxo magnético rotativo gerado pela rotação do rotor e suas bobinas, tem uma força eletromotriz induzida em seus terminais, cujos elétrons do condutor sofrendo a perturbação do fluxo magnético rotativo são forçados a alternarem o sentido de seu fluxo sem cessar, o que conclui o processo de conversão eletromecânica de energia, com a geração trifásica de eletricidade em corrente alternada, que pode ainda passar por alguma etapa de controle e conversão eletrônica à fim de ajustar essa eletricidade aos parâmetros de tensão e frequência da rede elétrica.

Etapa 05: Transmissão da Energia

- Transformador: Nesse processo de conversão eletromecânica de energia, o produto do gerador é uma energia em corrente alternada classificada como Baixa Tensão, que pode ainda passar por alguma etapa de controle e conversão eletrônica à fim de ajustar essa eletricidade aos parâmetros de tensão e frequência da rede elétrica, tendo em vista que alguns geradores operam com velocidade variável. Essa saída então, geralmente trifásica 440V ou 380V, passa por um transformador elevador ou step-up à fim de elevar a tensão e escoar essa energia pelas Linhas de Transmissão (LT's) de Alta tensão de 69kV ou 500kV.

Dessa forma, a quantidade de energia gerada irá depender da intensidade e constância dos ventos, do tamanho da turbina eólica e da área coberta pela rotação das suas hélices (pás).

Outrossim, partindo da importância do gerador dentro dessa cadeia produtiva, é pertinente aprofundar-se nessa estrutura. Exemplificando essa relevância, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL classifica as turbinas com base no gerador. Assim temos, consoante ao exposto pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica, que:

- Turbinas pequenas: potencial nominal menor que 500 kW
- Turbinas médias: potência nominal entre 500 kW e 1 MW
- Turbinas grandes: potência nominal superior a 1 MW

Nessa lógica, os parques eólicos se valem de geradores de velocidade fixa ou variável. Desse modo, acerca do tema, Taveiros (2014) divide os geradores em:

1. Gerador de Indução Tipo Gaiola de Esquilo (SCIG)

- Descrição:

Sendo um dos modelos mais usados, por seu design robusto e à sua simplicidade, sobretudo em sistemas de transmissão direta, esse gerador também é conhecido como Gerador de Indução de Rotor Gaiola de Esquilo.

- Particularidades:

O SCIG compõe, sobretudo, turbinas de média e pequena potência (COSTA, 2010). Desse modo, ele opera em sincronia com a frequência da rede, tendo em vista que a sua velocidade

(fixa) de rotação de turbina é condicionada por ela e pelo número de polos, não tendo controle de velocidade. Dada essa característica, a sua desvantagem são as flutuações elétricas, causadas pelas flutuações mecânicas da variação de velocidade dos ventos, que podem ser transferidas sistema elétrico, causando variações na saída elétrica e afetando a qualidade da energia fornecida.

2. Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG)

- Descrição:

Esse modelo caracteriza-se como um tipo de gerador de indução popular, por possuir dois circuitos de alimentação ele leva o nome de "doubly fed" ou duplamente alimentado. Os circuitos ficam um no estator e outro no rotor.

- Particularidades:

O Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG) é projetado para maximizar a eficiência ao operar em uma ampla faixa de velocidades do vento. Para isso, ele ajusta a produção de energia através de um conversor de potência no rotor, que regula a corrente do rotor e controla a potência ativa e reativa, otimizando o desempenho em diferentes condições de vento. Os enrolamentos do estator, por sua vez, estão diretamente conectados à rede elétrica e, por intermédio de um conversor de potência, tem uma interação regulada, ajustando tensão e frequência. Ambos os conversores de potência formam o sistema back-to-back, ambos conectados por um barramento de corrente contínua.

3. Gerador Síncrono de Ímã Permanente (PMSG)

- Descrição:

O Gerador Síncrono de Ímã Permanente (PMSG) caracteriza-se pelo uso de ímãs permanentes para criar seu campo magnético. Isso elimina a necessidade de corrente externa para excitar o rotor, pois o campo magnético é gerado diretamente pelos ímãs fixos no rotor.

- Particularidades:

Essa configuração opera de forma eficiente mesmo em baixas velocidades do vento, visto que os ímãs permanentes proporcionam um campo magnético constante, independentemente da velocidade do rotor. Assim, seu rotor dispensa conversores que atuam nessa regulação velocidade do rotor x campo magnético, reduzindo perdas de energia associadas a esse processo e contribuindo para a eficiência do sistema. No entanto, o PMSG ainda requer conversores,

como inversores, para adaptar a tensão gerada à rede elétrica e controlar a potência ativa e reativa. Semelhante aos DFIGs, o PMSG pode permitir controle desacoplado das potências ativa e reativa. Além disso, o seu desempenho pode ser mais desafiador em alta potência e alto torque, pois para baixas velocidades de rotação exigem um grande diâmetro para acomodar a quantidade de polos necessária para compensá-la, resultando em maior massa e peso (COSTA,2010).

Desse modo, os geradores mais utilizados são os modelos DFIG e PMSG, tendo em vista que o SCIG não regula sua velocidade, apresentando flutuações elétricas, fato que dá aos dois primeiro um diferencial competitivo no mercado.

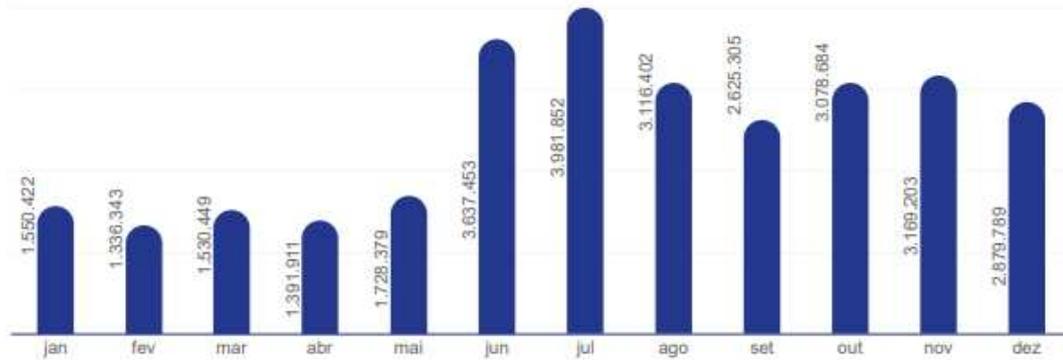
2.7 Vantagens e desvantagens da energia eólica

Produzir energia eólica, ou seja, utilizar a velocidade do vento para transformar trabalho em energia elétrica é um processo complexo em toda a sua cadeia, do planejamento de implementação à geração final, e a fonte eólica, como qualquer outra fonte de energia, também tem problemáticas que precisam ser ponderados. Todavia, mesmo quando comparada com outras fontes energéticas limpas, a produção eólica detém uma lista extensa de benefícios para o meio-ambiente e, conseqüentemente, para a sociedade que superam os seus próprios impasses.

2.7.1 Vantagens da energia eólica

- **Diminuição da emissão de poluentes:** Tal qual a energia solar, a produção de energia eólica não se vale da queima de combustíveis fósseis, os quais geram o aumento da temperatura média global, fato este que reduz a emissão de gases poluentes, como o gás carbônico. Exemplificando esse impacto tem-se a Figura 18, por meio da qual é possível observar que a somatória de poluentes evitados no ano de 2023 chega 30,03 milhões de toneladas de CO₂, um valor que corresponde à poluição gerada, no período de um ano, por cerca de 70,5 milhões de automóveis de passeio.

Figura 18: Emissões de CO2 evitadas por mês em toneladas em 2023



Fonte: (ABEEOLICA, 2023).

- Preservação do meio ambiente:** Diferente de outras matrizes de energia limpa, a instalação de parques eólicos é minimamente invasiva para o meio ambiente. Ocupando pouco espaço em terra, os parques eólicos permitem a convivência com o cultivo de plantas ou com a criação de animais. Sob esta perspectiva, o boletim anual da ABEEOLICA defende que:

Considerando o espaço destinado para um parque eólico, as turbinas ocupam cerca de 8% da área, podendo esse valor ser ainda menor, chegando a cerca de 6% (ABEEOLICA BOLETIM ANUAL 2023).

- Geração de emprego e renda:** Em concordância com as análises do pesquisador e economista Braúlio Borges, a produção de energia eólica:

Entre 2011 e 2020 as eólicas movimentaram R\$ 321 bilhões na economia, R\$ 110,5 bilhões de investimentos diretos na construção de parques eólicos e R\$ 210,5 bilhões como efeitos indiretos. De 2011 a 2020 a construção dos parques eólicos criou quase 196 mil postos de trabalho ou 10,7 empregos por MW instalado (ABEEOLICA BOLETIM ANUAL 2023).

- Diversificação da matriz energética:** Tendo em vista todas as vantagens supracitadas, bem como o potencial brasileiro no que tange a produção da fonte em voga, abordado no tópico 2.2, é fato que a energia eólica tem capacidade para suprir a demanda nacional. Tal potencial é observado na Figura 19, a qual ilustra a Evolução da Capacidade Instalada (MW) no Brasil.

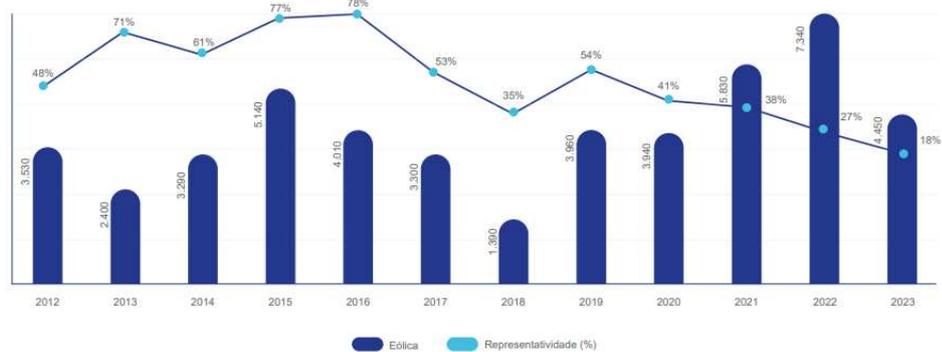
Figura 19: Evolução da Capacidade Instalada (MW)



Fonte: (ABEEOLICA, 2023).

- Renovabilidade:** A energia eólica, oriunda do movimento atmosférico causado pelo aquecimento desigual da superfície terrestre pelo sol, é considerada uma fonte renovável, visto que seu processo de formação é natural e inesgotável.
- Desenvolvimento industrial:** Os parques eólicos movimentam a economia não só no sentido de geração de energia, mas também no sentido de investimento nesse setor que está em ascensão. Nesse sentido, apenas durante o ano de 2023 foram US\$ 4,4 bilhões (R\$ 22,17 bilhões) injetados na indústria da produção energética eólica, representando 18% de todo o investimento geral feito em energias renováveis durante o mesmo período, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20: Investimentos em novos projetos no setor Eólico (Em milhões de US\$)



Fonte: (ABEEOLICA, 2023).

2.7.2 Desvantagens da energia eólica

- **Intermitência:** A produção de energia eólica é afetada pela variabilidade dos ventos, que são influenciados por fatores como pressão atmosférica, temperatura, estação do ano e localização geográfica. Essa variabilidade pode resultar em períodos de baixa produção ou até mesmo interrupção, devido à natureza imprevisível e intermitente dos ventos.
- **Prejuízo ao meio biótico:** Dada a altura dos aerogeradores, é comum a colisão com aves na região da instalação, afetando o curso migratório desses animais.
- **Danos ao meio ambiente:** Ainda que a energia eólica tenha interferência mínima, como elencado no tópico das vantagens, pode ocorrer o desmatamento de áreas estratégicas e o comprometimento de sítios arqueológicos em função do aproveitamento da velocidade do vento naquela região. Ademais, no que tange as regiões de dunas, área muito visada para implementação de parques eólicos, os impactos vão desde o comprometimento da sua integridade física, por meio da terraplanagem, compactação e fragmentação, até o aterramento de lagoas interdunares, afetando comunidades locais.
- **Interferência socioeconômica:** É incorreto acreditar que não há uma relação clara entre o desenvolvimento social e a produção de energia de uma região. Nessa perspectiva, ainda que a geração de energia eólica seja crucial para a oferta de serviços essenciais em comunidades ermas, a localização de parques em áreas de preservação, como de comunidades de povos originários tem que ser evitado para não repetir os erros das usinas hidrelétricas (Fearnside, 2013).
- **Velocidade Máxima:** Ainda sobre o ponto da velocidade do vento, para além do ponto da intermitência, supracitado, há também a problemática da máxima de velocidade. Nesse sentido, há uma velocidade limite do vento que a turbina é capaz de converter e, quando essa capacidade de suporte é ultrapassada, ocorrem danos no eixo de rotação e a produção diminui.

- **Interferência Eletromagnética:** O funcionamento dos parques eólicos pode causar interferência no campo eletromagnético ao seu redor impactando a qualidade dos sinais eletromagnéticos, sobretudo quando próximos a áreas residenciais, afetando o funcionamento de aparelhos como rádio e televisão. São 03 os elementos do gerador que podem gerar a interferência em questão, sendo eles: a rotação das pás, o gerador e a torre (Ricosti, 2011).

2.8 Fatores que influenciam na geração de energia eólica

Para Barros (2020) a energia eólica é a energia produzida através do vento, por isto os fatores que influenciam na produção de energia eólica são predominantemente meteorológicos. Sob esta ótica, fatores de macro e microescala são responsáveis pela formação dos ventos predominantes, assim como os fatores de topografia e microescala têm influência na geração dos ventos locais.

2.8.1 Orientação das pás

As turbinas eólicas podem ser projetadas com seu rotor em um eixo vertical ou horizontal. As lâminas de eixo vertical podem captar ventos vindos de qualquer direção, todavia, esse processo apresenta menos eficiência quando comparado com a rotação de eixo horizontal. Esse último, por sua vez, permite que as lâminas capturem toda a força do vento, por ser capaz de rastrear a sua direção (Controle de Pitch) e se manter perpendicular a ele, tecnologia que justifica a sua eficiência.

2.8.2 Design das pás

Os modelos mais antigos de lâminas são planos, o que diminui a sua capacidade de gerar energia. Atualmente as pás contam com curvaturas específicas e formato mais aerodinâmico, para que, durante o movimento, acima da Lâmina seja criada uma zona de baixa pressão, o que acelera o fluxo de ar sobre a lâmina e aumenta a eficiência na conversão da energia eólica

2.8.3 Rugosidade

Quando falamos de rugosidade, estamos abordando o nível de influência dos obstáculos na velocidade dos ventos de uma localidade. Nesse sentido, em áreas de baixa altitude a rugosidade tende a ser maior, seja pela urbanização, seja pelo relevo ou pela vegetação, que representam uma barreira física para o livre deslocamento massas de ar. Nessa lógica, quanto maior a rugosidade da região, menores são as velocidades médias do vento e a eficiência das turbinas, sendo fatores inversamente proporcionais. Na Figura 21, pode-se ver o mapa de rugosidade do Brasil.

Figura 21: Modelo de rugosidade do território brasileiro



Fonte: (ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO, p.20, 2013).

2.8.4 Temperatura e pressão

Como citado no início do presente tópico, sobretudo os fatores meteorológicos afetam o potencial eólico. Nessa perspectiva, entendendo a dinâmica supracitada entre a temperatura e a pressão (inversamente proporcionais), e entre a pressão e o vento (as massas de ar se deslocam para zonas de baixa pressão), a oscilação natural desses dois indicadores impactam diretamente na quantidade de energia produzida a depender do clima e do relevo onde estão situados os aerogeradores.

2.8.5 Efeito Esteira

Essa problemática disserta sobre o impacto da turbina no seu entorno. Nesse sentido, também chamado de efeito de rastro, a turbina acaba alterando o fluxo do vento que está passando por ela, conseqüentemente comprometendo o potencial produtivo do parque como um todo. Assim, após passar por uma turbina, o vento sai dela mais lento e chega no próximo aerogerador, normalmente posicionado a jusante, com menos velocidade, gerando menos energia.

2.8.6 Turbulência

Quanto à interação entre o vento e as turbinas eólicas, as variações na velocidade do primeiro são uma problemática. Essas variações, quando mais duradouras, configuram uma turbulência. Quando o vento é turbulento, com uma variação de velocidade que se prolonga, a capacidade das turbinas de gerar energia de forma eficiente é afetada, dadas as oscilações na força do vento que atingem as lâminas. Nesse sentido, o fenômeno da turbulência acelerará o desgaste e a necessidade de manutenção das turbinas.

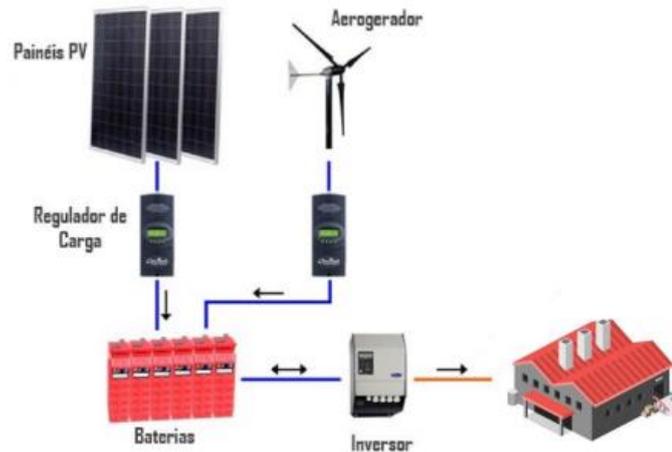
2.9 Geração Híbrida

A geração híbrida, cuja regulação no Brasil é recente (ANEEL REN 954/2021), tem se destacado como solução promissora no setor energético, combinando fontes renováveis limpas renováveis como eólica, solar e hidráulica para maximizar a eficiência de geração e a estabilidade na oferta de energia. Essa integração busca otimizar os recursos disponíveis, com suas características muitas vezes complementares, minimizando os efeitos da intermitência natural de cada fonte individualmente, e representa um passo significativo rumo à sustentabilidade no setor elétrico.

Acerca do tema, Matos (2019, p.18) relata que diversos sistemas híbridos têm sido instalados mundialmente nas últimas décadas, especialmente para fornecer energia a comunidades isoladas, sistemas de bombeamento e dessalinização. Essas aplicações, geralmente não conectadas à rede elétrica, utilizam topologias como Diesel-Eólico, Diesel-FV e Eólico-FV, este ilustrado na Figura 22, e são frequentemente combinadas a sistemas de

armazenamento, como baterias, para aproveitar a energia excedente e utilizá-la em momentos de baixa disponibilidade das fontes intermitentes, por exemplo.

Figura 22: Esquema de um sistema híbrido Eólico-Solar



Fonte: (TECNOVERITAS, 2019).

No entanto, serão enfatizadas as topologias convencionais de geração híbrida cuja produção é escoada ao SIN, como a geração eólico-solar, eólico-hidráulica e solar-hidráulica. Nesse quesito a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) é um exemplo a ser seguido, pois conta com Usinas Hidrelétricas (UHEs) importantíssimas para a matriz energética brasileira, e em algumas delas fazem aplicações híbridas, como é o caso da UHE Sobradinho, que em seu reservatório conta com uma UFV Flutuante de 2.5MWp de capacidade, prática que otimiza o uso dos recursos hídricos e de irradiação solar, em abundância na região. Essa integração permite aproveitar as mesmas subestações e linhas de transmissão que escoam e energia produzida pela UHE, contribuindo pra um sistema global muito mais eficiente e aumentando a oferta de energia ao SIN. A Figura 23 mostra a UFV Flutuante em questão.

Figura 23: UFV flutuante sobre o reservatório da UHE Sobradinho

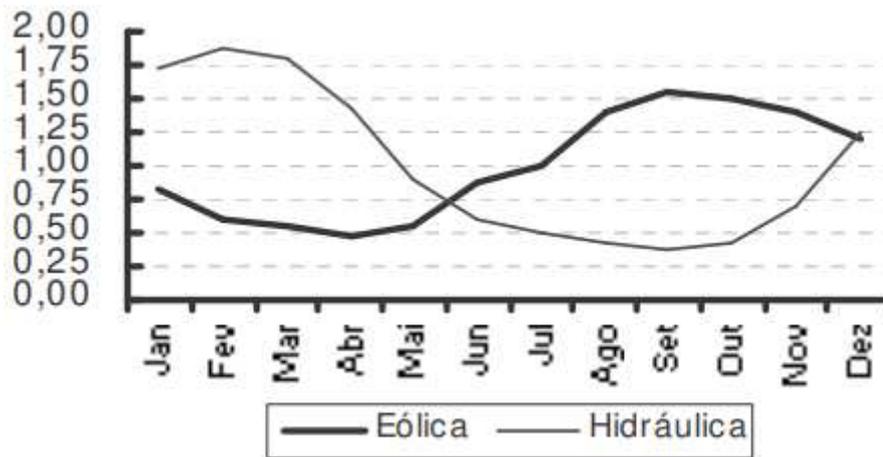


Fonte: (CODEVASF, 2019).

Outrossim a CHESF também detém diversos parques eólicos, sendo os Parques eólicos Casa Nova II e III situados em Casa Nova-BA, a cerca de 50km de distância de Sobradinho-BA. Eles totalizam 61,1 MW de capacidade instalada (CHESF, 2017) e, embora não compartilhem a mesma subestação elevadora, as linhas de transmissão da UHE Sobradinho e dos parques são interligadas, conjuntura que propicia a otimização do aproveitamento dos recursos eólico e hídricos e contribui equilibrando a oferta de energia ao SIN.

Nas últimas décadas, a literatura tem destacado a topologia híbrida de UHEs e eólicas, visando otimizar a complementaridade sazonal entre regimes de vento e chuva. Em períodos de pouca chuva, os regimes de vento são mais intensos, promovendo a geração eólica como fonte complementar para equilibrar a oferta de energia ao sistema elétrico brasileiro, nos períodos de escassez hídrica nos reservatórios das UHEs. Segundo gráfico trazido por SHULTZ et al. (2005), ilustrado na Figura 24, essa integração melhora o uso dos reservatórios hídricos, fonte predominante na matriz energética, e contribui para maior estabilidade sazonal no SIN, reduzindo a vulnerabilidade à intermitência das fontes renováveis.

Figura 24: Regimes sazonais das energias eólica e hidráulicas



Fonte: (SCHULTZ et al, 2005, p.17).

No entanto, essa mesma contribuição para o Sistema Interligado Nacional pode ser obtida pela topologia híbrida eólico-solar, a partir da otimização do aproveitamento dos seus recursos, especialmente em regiões de alta incidência solar e de altas velocidades médias dos ventos, o que não é mencionado por SCHULTZ et al (2005) e não é mencionado pela maioria das literaturas que abordam o assunto. Portanto, o foco do trabalho é explorar essa sinergia e sua capacidade de promover um sistema global de geração mais eficiente que dê suporte ao SIN equilibrando e diversificando a matriz energética brasileira, ao passo que a torna menos vulnerável à escassez hídrica nos reservatórios de hidrelétricas.

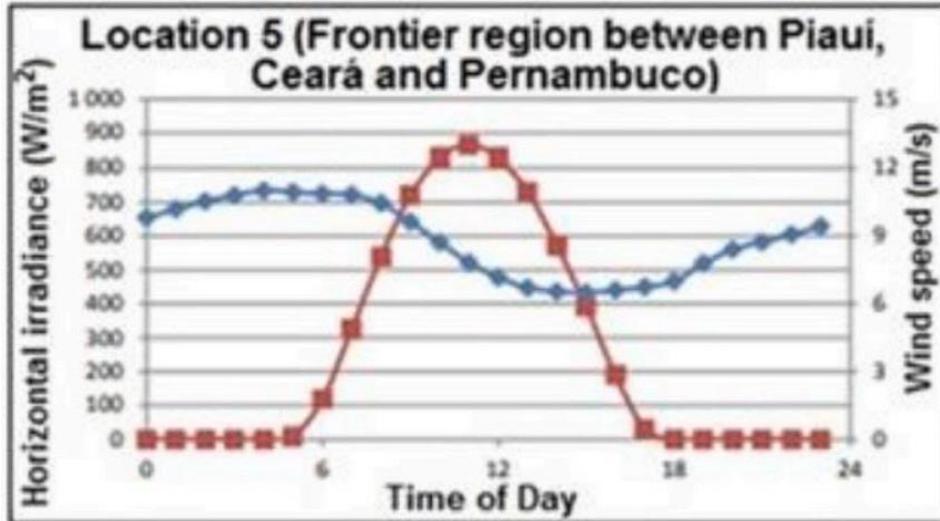
2.9.1 Potencial de geração híbrida eólico-solar do Ceará

Com base no potencial eólico e solar do Brasil, discutido nos tópicos 2.1 e 2.2, bem como nas análises específicas do estado do Ceará nos subtópicos 2.1.1 e 2.2.1, é evidente que o Ceará se sobressai na geração híbrida de energia. Um dos fatores mais críticos para o sucesso da geração híbrida é a complementaridade das fontes, pois não faz sentido instalar um sistema híbrido em locais onde a sazonalidade, seja diária, seja mensal, seja ao decorrer do ano, não promove uma sinergia entre as fontes. Isso comprometeria a eficiência, que é a essência dos arranjos híbridos.

Nesse contexto, o Ceará se destaca como uma região altamente eficiente e produtiva, devido às suas características geográficas e climáticas que favorecem contínuos regimes de vento e de irradiação solar durante maior parte do ano. A Figura 25 e a Tabela 5

ilustram esse fato positivo, destacando o comportamento complementar entre as fontes eólica e solar durante as 24h de um dia, o que reforça a viabilidade da geração híbrida no estado.

Figura 25: Complementaridade diária média dos recursos eólico e solar na região fronteira entre Piauí, Ceará e Pernambuco



Fonte: (SANTOSA, et al, 2020).

Tabela 5: Potencial de geração híbrida solar e eólica do estado do Ceará

Potencial híbrido Solar e eólico (Vel. a 150m de altura > 7,0m/s)	Capacidade Instalável (GW)	Área apta (km ²)	Percentual da área do estado (%)	Geração de energia Anual (TWh/ano)
	137	10.987	7,4	315

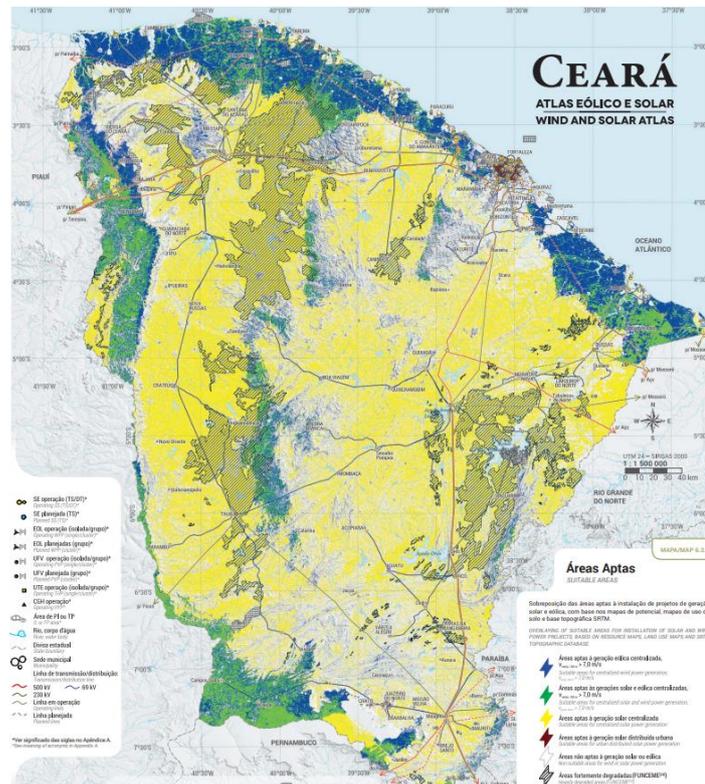
Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR DO CEARÁ, 2019, p. 122, adaptado pelo autor do trabalho).

Outrossim, é possível analisar na Tabela 5 que a capacidade instalável de usina híbrida solar e eólica é de 137 GW, numa área apta para tais aplicações de 10.987 km², correspondente a 7,4% da área territorial do estado. Ademais, possui um potencial de geração de energia anual de 315 TWh/ano, caso toda essa capacidade seja aproveitada, valor surpreendente que representa, a nível de comparação, 50% da Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) do país no ano de 2018, correspondente a 636,4 TWh segundo o Ministério de Minas e Energia (2019).

Por fim, a Figura 26 ilustra esses dados do Atlas eólico e solar do Ceará 2019, que apresenta as áreas do Ceará aptas para a implementação de empreendimentos de geração eólica

e solar, dando ênfase as áreas na cor verde que, de acordo com a legenda da imagem, indica as áreas propícias para a instalação das duas tecnologias, informações ricas que podem ser aproveitadas para estudos de implementação de usinas de geração híbrida eólico-solar.

Figura 26: Áreas do Ceará aptas à instalação de projetos de geração eólica e solar



Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR DO CEARÁ 2019, p. 119).

3 PROPOSIÇÃO DO TRABALHO

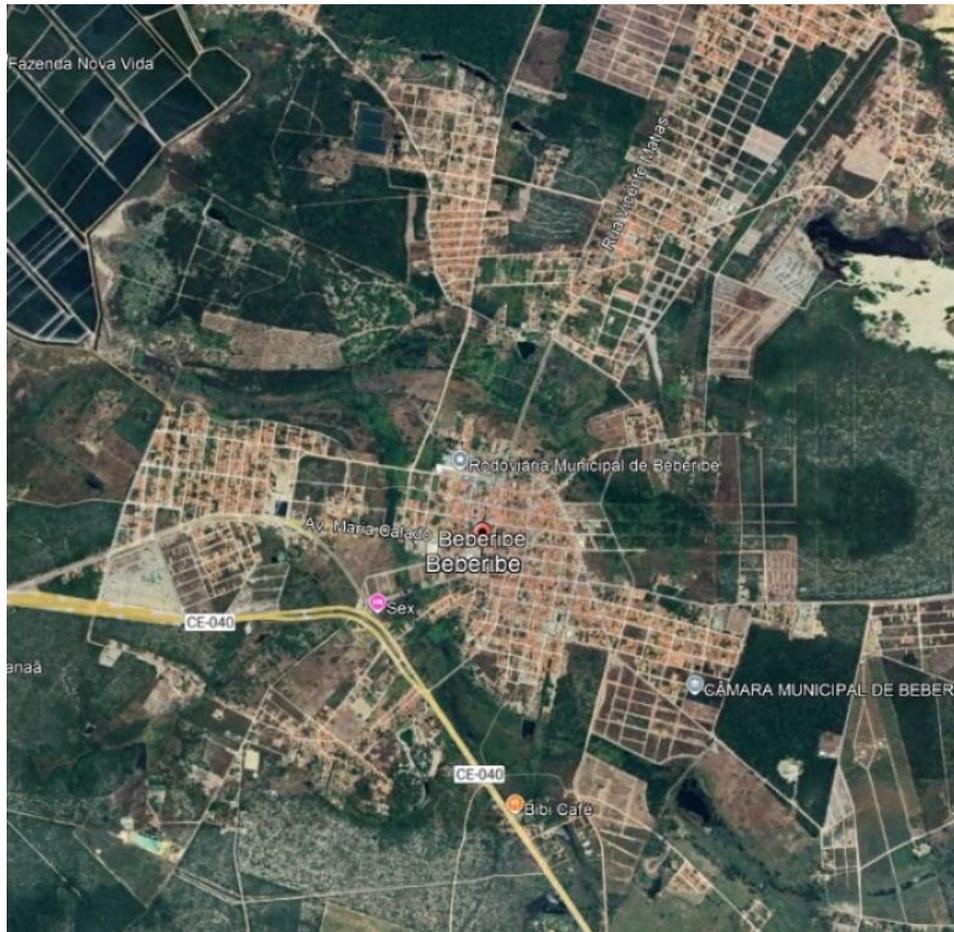
Este trabalho, como já dito, tem o propósito de analisar a relação de complementaridade entre a geração eólica e solar em uma usina de geração híbrida localizada no litoral do Ceará, avaliando seu desempenho e potencial a fim de se obter uma eletricidade gerada por energias renováveis com curvas mais estáveis e que sofra menos com os efeitos da sazonalidade, contribuindo com um Sistema Interligado Nacional (SIN) que tenha melhor confiabilidade, qualidade de energia e capacidade de acompanhar as variações de demanda e que diminua a vulnerabilidade da matriz energética brasileira, que tem visto sua porção de fontes renováveis intermitentes crescerem exponencialmente.

Nesta etapa serão introduzidas informações históricas, técnicas e de localidade a respeito da planta de geração híbrida eólica e solar, que baseou os estudos de complementaridade e ganho de geração, com essa relação.

3.1 O município de Beberibe

A usina de geração híbrida fica localizada no município de Beberibe, no litoral cearense, situada à 82km ao leste da capital Fortaleza, com uma extensão territorial de aproximadamente 1.597 km² e população estimada de 53.114 pessoas (IBGE, 2022), que pode ser vista na Figura 27. A localização exata da planta será preservada a fim de evitar qualquer chance de que o grupo que a detêm seja comprometido de alguma forma diante das informações que serão apresentadas neste trabalho.

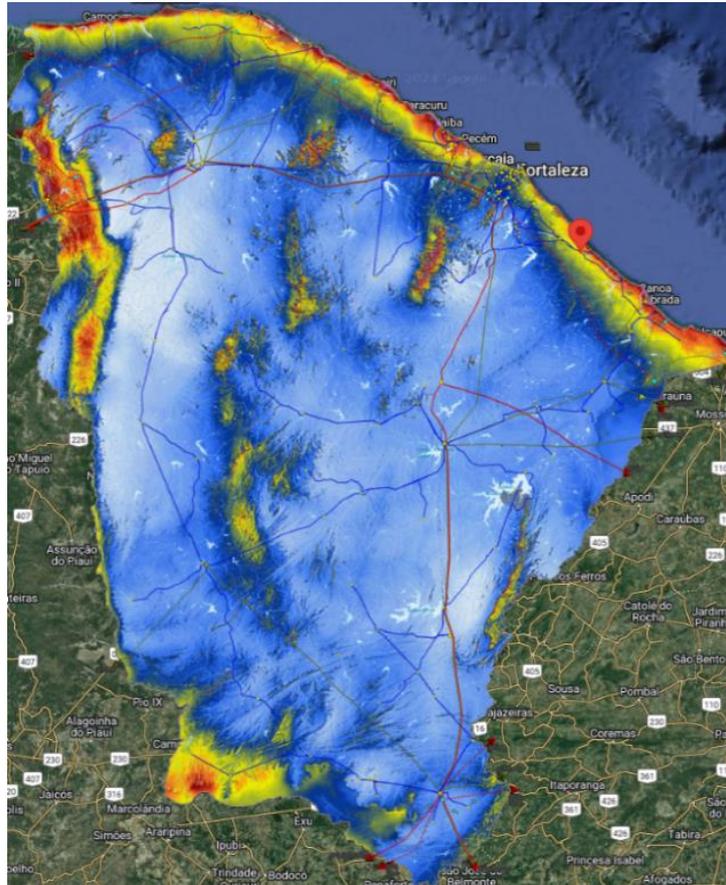
Figura 27: O município de Beberibe



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2024).

A cidade de Beberibe está localizada numa região de uma das melhores médias anuais do vento e de irradiação global horizontal anual do estado, como pode ser visto nas Figuras 28 e 29 e nas Figuras 30 e 31, respectivamente, onde temos uma velocidade média anual de 7,1m/s (a 80m de altura) e uma irradiação global horizontal anual de 5,4kWh/m²/dia. Essas informações foram coletadas do site do Atlas eólico e Solar do Ceará (2019), desenvolvido pela Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE), junto ao Governo do Estado, com apoio de várias outras organizações, publicado junto ao documento público do Atlas, sendo o único Atlas híbrido do Brasil. Ele tem o intuito de guiar, metrificar e fazer simulações a respeito dos recursos anemométricos e solarimétricos de qualquer localização requisitada, dentro do território cearense.

Figura 28: Mapa de velocidade média anual do vento a 80m no Ceará



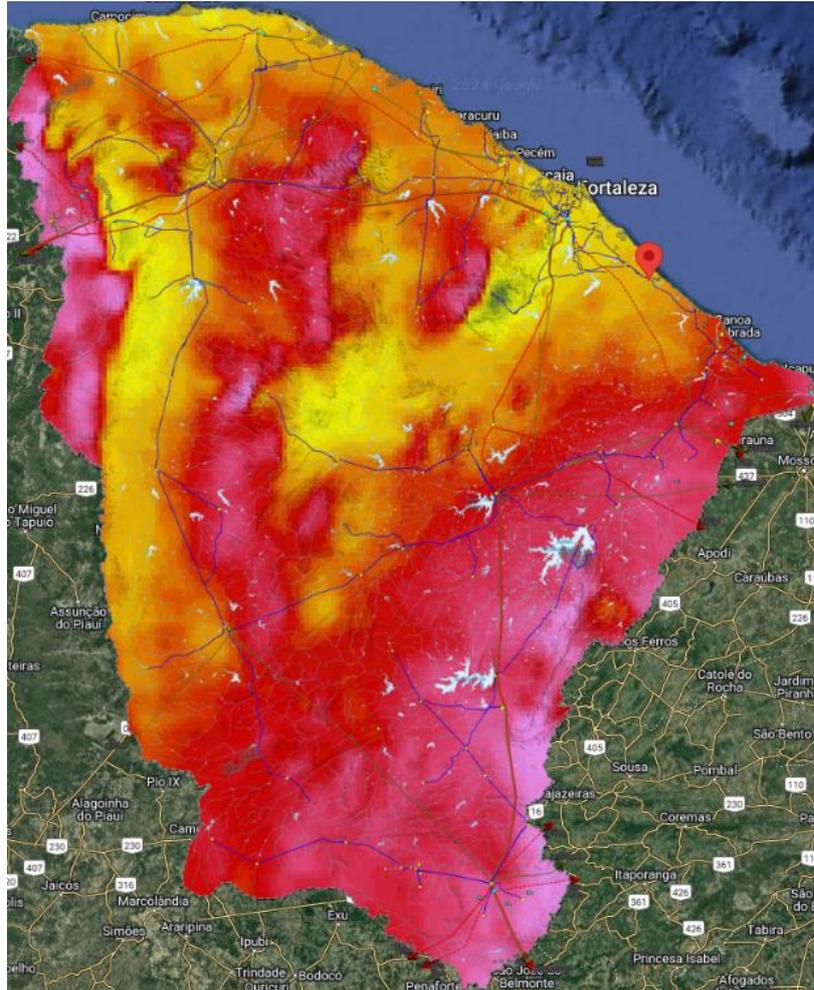
Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR, 2019).

Figura 29: Valores anemométricos a 80m na localização da Usina híbrida a ser tratada

7.1 m/s	Velocidade Média Anual	3.1	k - Fator de forma da distribuição de Weibull
7.9 m/s	C - Fator de escala da distribuição de Weibull	38.5%	Fator de capacidade médio anual

Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR, 2019).

Figura 30: Mapa de Irradiação global horizontal anual no Ceara



Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR, 2019).

Figura 31: Valores solarimétricos na localização da Usina híbrida a ser tratada

5.4 kWh/m²/dia	Irradiação Global Horizontal Anual	1.7 kWh/m²/dia	Irradiação Difusa Horizontal Anual
4.9 kWh/m²/dia	Irradiação Normal Direta Anual	4.1 kWh/kWp	Produtividade fotovoltaica anual no plano inclinado a 10°
17 %	Albedo Médio Anual	27.9 °C	Temperatura Média Diurna Anual
66 %	Nebulosidade média anual		

Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR, 2019).

Ademais, o município também está localizado numa área considerada promissora para a implementação tanto de plantas de geração de energia eólica, quanto de plantas de geração de energia solar, como já visto na Figura 26, o que tem atraído para Beberibe diversos investimentos em empreendimentos de grandes plantas, nas categorias de minigeração e geração centralizada, que geram energia a partir do aproveitamento desses recursos abundantes

do estado. São eles: Parque Eólico de Beberibe, construído e inaugurado em 2008, fica localizado sobre as dunas da Praia das Fontes e conta com 32 aerogeradores Wobben Enercon de capacidade de 800 kW, torres de 75m e uma potência instalada de 25,6MW (CEP, 2024); Central Eólica Praias de Parajuru, construído e inaugurado em 2009, fica localizado em Beberibe e conta com 19 aerogeradores da alemã Vensys de 1,5 MW, torres de 85m e uma potência instalada de 28,8 MW (MEMORIAL, 2018). Ambas as usinas construídas através de uma parceria da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a Impsa Wind, empresa líder na América Latina no investimento no setor, como parte do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA).

Outrossim, agora no campo fotovoltaico, há a UFV CAATINGA I, localizada também em Beberibe, foi construída em 2023 e inaugurada em 2024 e conta com 6264 módulos e 20 inversores SUNGROW de 125 kW, com potência instalada de 3,3 MWp em corrente contínua e 2,5 MW em corrente alternada (LINKEDIN, 2023). Por fim, fechando os exemplos, há a usina de geração híbrida cujos dados técnicos serão apresentados nos tópicos a seguir.

3.2 A Usina Eólica

Antes de apresentar dados e informações técnicas da planta eólica é preciso trazer também o aspecto histórico das suas turbinas, que tem um papel de vanguarda no Ceará e no Brasil na demonstração da tecnologia eólica, contribuindo com a visibilidade nacional à energia eólica.

Nesse contexto, em 1996, a primeira planta eólica de demonstração da tecnologia do Ceará era construída e inaugurada. Chamado de Parque eólico da Praia Mansa, ou Parque eólico do Mucuripe, a usina foi construída no porto do Mucuripe, na região da Praia Mansa, em Fortaleza-CE, fruto de uma parceria do Governo do Ceará e Companhia Energética do Ceará (COELCE) com a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e o Governo alemão, através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Geração e energia Eólica – Programa Eldorado, que ditava acordo de cooperação técnica entre Brasil e Alemanha (CEPEL, 1996, p.10).

O parque eólico da Praia Mansa contava com 4 aerogeradores de 300 kW, da alemã Tacke Windtechnik, 1,2 MW de potência instalada, torres de 40m de altura (CEPEL, 1996, p. 10) e foi, na época, a terceira planta eólica construída no Brasil, a maior planta eólica em capacidade instalada e o segundo parque eólico a ser conectado ao SIN, que já tinha a turbina eólica de 75 kW de Fernando de Noronha-PE, construída em 1992, e a Usina eólica do Morro

do Camelinho em Gouveia-MG, com 4 aerogeradores de 250 kW e potência instalada de 1 MW, construída em 1994 e idealizada pela CEMIG, sendo a primeira planta eólica a se conectar ao SIN (Santos;Araújo, 2023).

Ademais, em 2000 o parque foi desativado para passar por retrofit que repotencializou os 4 aerogeradores (ANEEL, 2005) e só voltou a operar novamente em 2002. Os aerogeradores saíram de uma capacidade de 300 kW cada, para 4 turbinas modelo E-40/600, de 600kW cada, agora com maquinário da, também alemã, Wobben Enercon (THE WIND POWER, 2023), elevando a potência instalada do parque para 2,4 MW, ou seja, a sua capacidade foi dobrada. A Figura 32 mostra o parque em vista aérea da Praia Mansa.

Figura 32: Vista aérea do Parque eólico da Praia Mansa, em Fortaleza-CE



Fonte: (GERMANO BEUTTENMULLER/ GB imagens Aéreas, 2020).

Outrossim, somente no ano de 2021 os aerogeradores foram levados para Beberibe-CE, cujos detalhes de como aconteceu foram esclarecidos durante a pesquisa, em que foi encontrado um vídeo timelapse do processo publicado pelo Engenheiro Lucas Lima – Gerente de Workforce LATAM da Wobben Enercon, na rede LinkedIn, ele, que supervisionou todo o processo na época, esclareceu as motivações de tal fato. De acordo com o Eng. Lucas Lima, em agosto de 2021, após 20 anos de operação, as turbinas foram desmontadas e removidas, por uma empresa especializada, para passar por processo de retrofit estético e estrutural e então serem instaladas, em outubro de 2021, em Beberibe, num local “Um pouco mais afastado do mar e menos agressivo”, disse ele garantindo que vão operar tranquilamente por mais 20 anos.

A Figura 33 mostra a desinstalação dos aerogeradores em uma imagem retirada do vídeo mencionado.

Figura 33: Desmontagem de aerogerador do Parque eólico da Praia Mansa



Fonte: (LUCAS LIMA/ SKYWARD DRONES, 2021).

Nesse contexto, o motivo da saída das turbinas da Praia Mansa se deveu ao término do contrato de venda de energia da planta, o que culminou na compra das máquinas pelo grupo que as detêm hoje, o grupo, por sua vez, também comercializa a energia gerada pelo parque. Hoje o Parque continua com as mesmas especificações técnicas, de acordo com o Eng. Lucas Lima e o The Wind Power (2022):

- 4 aerogeradores E-40/600 de 600 kW da Wobben Enercon
- Quantidade de pás: 3
- Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (WRSG) de tensão 440V
- Transformador: 4x Trafo 630 kVA, 440 V-13.8 kV (Abrigados)
- Sem Gearbox
- Potência instalada: 2,4 MW

Figura 34: Parque eólico da Praia Mansa, agora em Beberibe-CE – 4 aerogeradores em foco no novo local



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Figura 35: Parque eólico da Praia Mansa, agora em Beberibe-CE – Aerogeradores ao lado da UFV no novo local



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

As Figuras 34 e 35 mostram o Parque eólico da Praia Mansa, que será chamado daqui pra frente neste trabalho de Central Eólica Beberibe, no seu novo local de instalação desde outubro de 2021, em Beberibe-CE. Ademais, na Figura 35 é possível ver UFV, que

compartilha do mesmo local, ao lado dos aerogeradores, cujas informações serão detalhadas no tópico a seguir.

3.3 A Usina Solar Fotovoltaica

Apresentado o novo local da Central Eólica Beberibe e as especificações técnicas do seu maquinário, faz-se necessário ir para o próximo passo, que é apresentar da usina solar que compartilha do mesmo local que os aerogeradores.

A UFV Beberibe, como será chamada daqui pra frente neste trabalho, é uma usina instalada em solo e teve sua instalação iniciada no fim de fevereiro de 2023, por empresa especializada contratada pelo grupo detentor da Central Eólica Beberibe, e entrou em operação por volta do meio de abril de 2023. A iniciativa de sua implementação se deu numa perspectiva do grupo de aproveitar a área improdutiva do terreno que abriga os aerogeradores para gerar energia a partir de um recurso tão abundante quanto os ventos da região, que é a irradiação solar. A UFV está localizada logo ao lado dos aerogeradores, mais especificamente a pouco mais de 40 metros do terceiro aerogerador, que chamaremos daqui em diante de Torre 3, numa área desmatada exclusivamente para a sua implementação. As Figura 36 e 37 mostram fotos durante o processo de instalação das estruturas de fixação e dos inversores na sala técnica da usina.

Figura 36: Montagem da estrutura de fixação de solo da UFV Beberibe



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Figura 37: Instalação dos inversores e proteção CA na sala técnica da UFV Beberibe.



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Outrossim, a UFV Beberibe, que tem inversores ongrid, é alimentada pela rede por meio de ligação em paralelo com as buchas do secundário do transformador abrigado da Torre 3, que fica na edificação logo ao lado de onde a base do aerogerador está fixada, de 630 kVA 440V-13.8kV, por meio de condutores de secção transversal dimensionada para serem condizentes com a ampacidade e demais fatores, levados em consideração nesse tipo de dimensionamento, que são protegidos por disjuntor geral de 530A, centralizado, que por sua vez distribui a alimentação para 3 disjuntores de 175A, responsáveis pela proteção/seccionamento dos 3 inversores, dentro do Quadro de Proteção de Corrente Alternada (QPCA) localizado na sala técnica da UFV, como pode ser visto na Figura 38.

Figura 38: Quadro de Proteção de Corrente Alternada da UFV Beberibe



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Nesse contexto, a UFV Beberibe, que pode ser melhor vista nas Figuras 39 e 40, conta com as seguintes especificações técnicas, informações adicionais da ficha de dados do inversor poderão ser vistas no Anexo A:

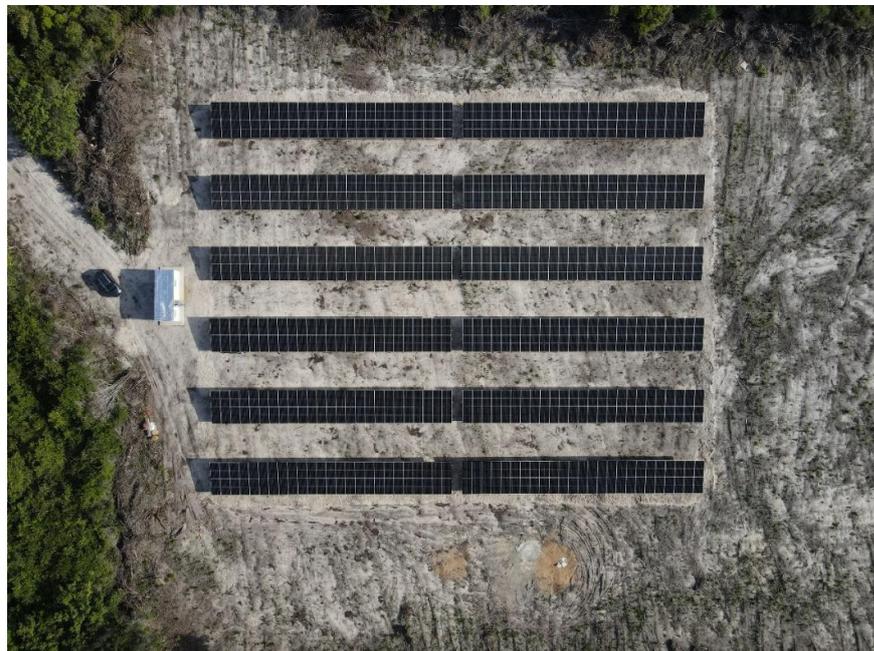
- N° de módulos: 602
- Modelo do módulo: Trina Solar TSM-665DE21 665Wp / Silício monocristalino / eficiência de 21,4%
- Potência CC: 400,33 kWp
- N° de Inversores: 3
- Modelo do inversor: Sungrow SG110CX 110kW / Máx. eficiência 98,7%
- Potência instalada CA: 330kW
- Estrutura de fixação: Mesa de solo SSM Solar

Figura 39: UFV ao lado da Torre 3 da Central Eólica Beberibe



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Figura 40: Módulos sala técnica da UFV Beberibe vistas de cima



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Por fim, diante do que fora exposto neste tópico, podemos afirmar que a Central Eólica Beberibe e a UFV Beberibe fazem parte de uma Planta de Geração Híbrida, fato confirmado pelas características de ligação e injeção de energia na rede entre os sistemas de

cada usina. Essa Planta de Geração Híbrida, por sua vez, terá suas curvas analisadas à fim de guiar os estudos de complementaridade e ganho de geração global.

3.4 Aquisição de dados

Diante de toda a informação apresentada nos tópicos anteriores, para realizar os estudos de complementaridade eólico-solar da Planta de Geração Híbrida, objeto de estudo deste trabalho, foi necessário extrair os dados de geração tanto da Central Eólica Beberibe, quanto da UFV Beberibe.

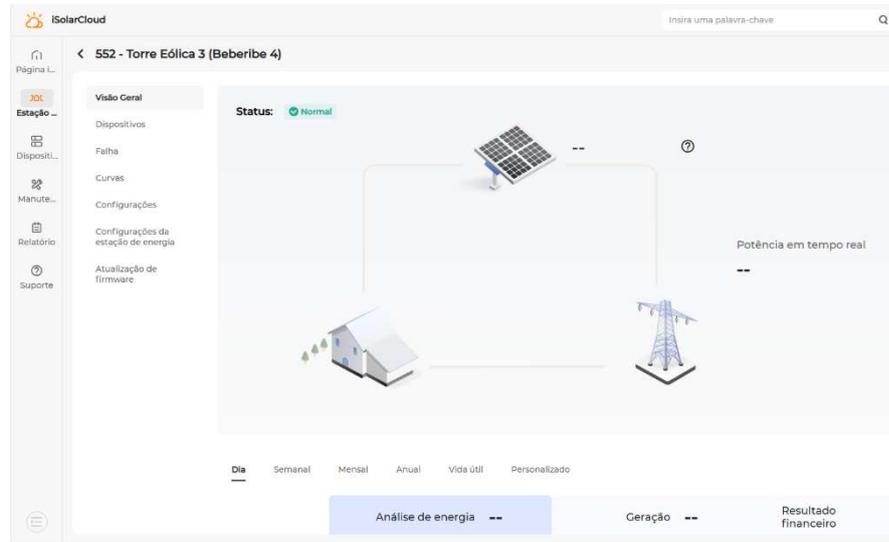
Os dados de geração da UFV Beberibe foram obtidos por meio da plataforma de monitoramento dos inversores Sungrow, chamado de iSolarCloud, que recebe os dados de geração e os dados de outros parâmetros medidos pelos inversores através da atuação do Datalogger stick, que, conectado ao inversor, recebe os dados pela placa de comunicação e envia para o banco de dados do portal por meio da rede Wifi de internet, instalada dentro da sala técnica dos inversores. As Figuras 41 e 42 mostram o Datalogger conectado ao inversor e a página da UFV Beberibe no iSolarCloud.

Figura 41: Vista de baixo da conexão do Datalogger com o inversor



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Figura 42: Página UFV Beberibe no portal iSolarCloud na Web



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Na Figura 42 é possível ver que na página da UFV Beberibe as informações estão zeradas (nada consta), embora o Status esteja “Normal”, indicando que os Dataloggers estão conectados à internet. Essa situação foi ocasionada por uma conexão inapropriada, feita por empresa terceirizada contratada pelo grupo em fevereiro de 2024, entre a placa de comunicação e o dispositivo de comunicação RS485 para obtenção de dados em sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), forma preferida pelo grupo detentor das plantas para coletar e supervisionar os dados das usinas.

Esse fato culminou na danificação da placa de comunicação dos 3 inversores, impedindo sua transmissão de dados ao Datalogger e, conseqüentemente, impedindo a transmissão de dados para o iSolarCloud, no entanto, isso não prejudicou a aquisição dos dados da UFV para os fins desse trabalho, pois os dados de geração foram coletados do portal em abril de 2024, dias antes das placas de comunicação serem danificadas totalmente e todos os dados sumirem, por meio de função disponibilizada de exportação de dados selecionáveis. Portanto, foi possível obter a geração de cada mês de abril/2023 a abril/2024, embora a placa tenha parado de registrar dados em abril/2024 antes do fim do mês, como pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6: Geração mensal 2023-2024 da UFV Beberibe, após 1 ano de operação

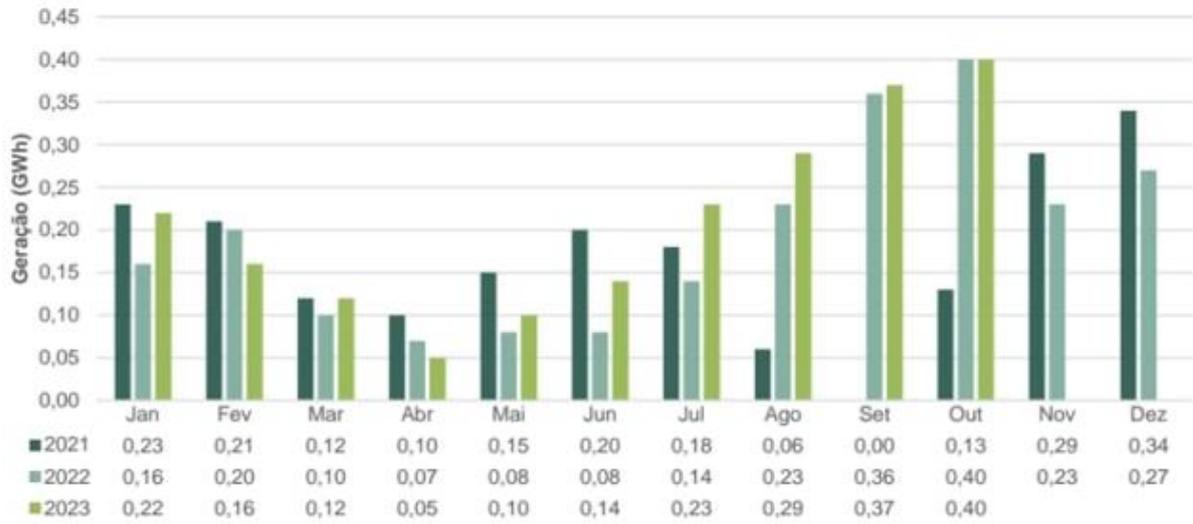
Mês/Ano	FV(MWh)
abr/23	19,361
mai/23	54,913
jun/23	53,213
jul/23	58,379
ago/23	62,293
set/23	59,905
out/23	64,041
nov/23	57,998
dez/23	56,584
jan/24	54,026
fev/24	41,893
mar/24	36,882
abr/24	13,549

Fonte: (ISOLARCLOUD, 2024) adaptado pelo próprio autor.

Outrossim, para a aquisição de informações de geração da Central Eólica Beberibe foi obtido acesso a algumas páginas de um relatório anual entregue pela Wobben Enercon, fabricante dos aerogeradores da planta, no mês de outubro de cada ano, para o grupo dono do parque, em que são apresentados histórico de geração, histórico de velocidade do vento, métricas relacionadas a paradas, a falhas, a manutenções preventivas e corretivas, entre outras informações.

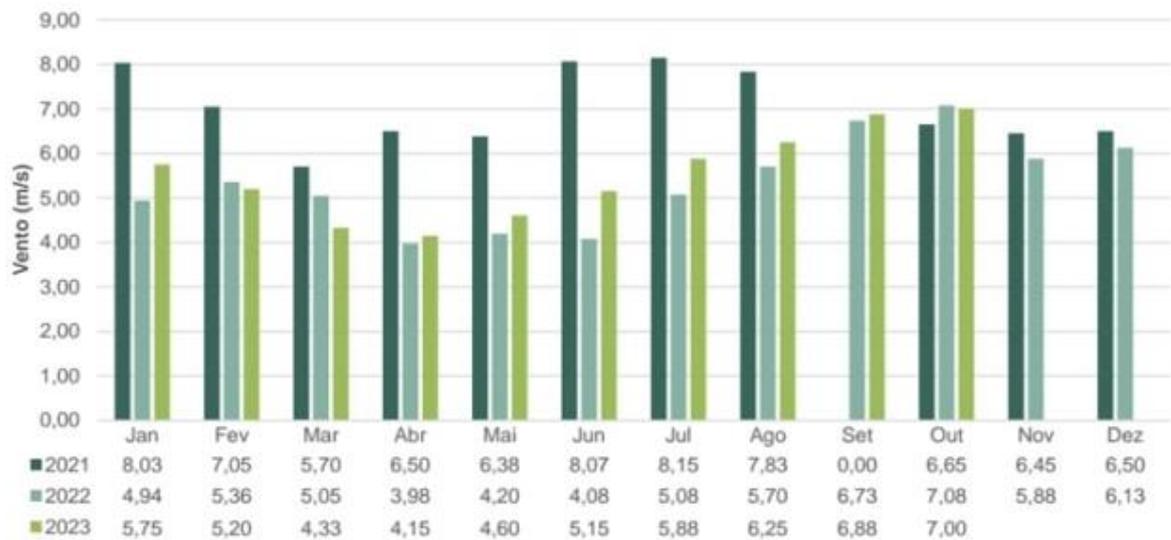
O documento em questão é de outubro de 2023 e, nas páginas que se obteve acesso, consta o histórico de geração e de velocidade do vento a partir de janeiro de 2021, quando as turbinas ainda estavam na Praia Mansa, em Fortaleza-CE, até outubro de 2023, como pode ser visto na Figura 43 e na Figura 44, respectivamente. Fica evidente, na Figura X10, que o processo de retirada do parque da Praia Mansa e sua reinstalação em Beberibe-CE está refletido na geração, visto que foi desmontada em meados de agosto/2021 (geração muito abaixo para a velocidade do vento registrada no mês), ficou o mês de setembro inteiro em processo de retrofit e depois instalação (sem geração registrada) e só voltou a operar em meados de outubro/2021 (geração muito abaixo para o mês).

Figura 43: Histórico de geração da Central Eólica Beberibe



Fonte: (WOBBEN ENERCON, 2023).

Figura 44: Histórico de velocidade do vento da Central Eólica Beberibe



Fonte: (WOBBEN ENERCON, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante das informações previamente abordadas, com ênfase nos tópicos 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, acerca do município de Beberibe, das informações técnicas da UFV Beberibe e da Central Eólica Beberibe e dos dados adquiridos de geração das plantas, pode-se analisar as curvas de geração e avaliar o comportamento complementar da integração local das duas tecnologias, que formam uma Usina de Geração Híbrida (UGH).

Devido a limitação de apenas se ter dados da UFV Beberibe de abril/2023 a abril/2024, enquanto os dados da Central Eólica Beberibe, no mesmo período, datam somente de abril/2023 a outubro/2023, tendo um gap de registro de geração de nov/23 a abr/24, à fim de realizar as análises comparativas com uma amostragem satisfatória, foi considerado que os históricos de geração dos períodos abril/2021-abril/2022 e abril/2022-abril/2023 da Central Eólica Beberibe são, supostamente, históricos de geração do período de abril/2023-abril/2024, podendo, assim, compará-los com o histórico do primeiro ano de geração da UFV Beberibe (abril/2023-abril2024).

4.1 Estimativa de valores sem registro por algoritmo de projeção histórica linearizada

Ademais, como solução para não deixar de fora da análise os dados de geração da Central Eólica Beberibe de abril/2023-abril/2024, por conta dos 6 meses sem registro, foi desenvolvido um código na linguagem Python para estimar os valores de novembro/2023 a abril/2024. O algoritmo realiza uma análise de série temporal de geração de energia eólica (GWh) de janeiro de 2021 a abril de 2024, aplicando uma média móvel de 5 meses para suavizar os dados e identificar tendências. Ele identifica os pontos máximos e mínimos e, a partir deles, calcula equações lineares (canais) usando o conceito de regressão linear para projetar tendências de crescimento e declínio. Também faz uma projeção futura ajustada por um multiplicador, correlacionando os valores estimados aos canais.

O processo é comparado a uma Rede Neural Artificial Multi-Layer Perceptron (MLP) com Backpropagation, onde a média móvel de valores históricos atua como o "banco de dados" e o ajuste seria equivalente ao processo de aprendizado da rede. No entanto, pela amostragem pequena de valores, a aplicação do MLP ou de algoritmos genéticos resultaria em valores randômicos arbitrários, dado esse fato se tornou necessário estipular valores por meio de projeção histórica linearizada, que ainda assim trouxe certo grau de randomicidade e imprecisão em alguns valores, como os referentes a março/2024 e abril/2024, que devem ser

desconsiderados para fins comparativos. O código e os valores estimados podem ser vistos no Anexo B.

Em posse, agora, das projeções estimadas de geração da Central Eólica Beberibe dos meses de novembro/2023 a abril/2024, pode-se usar o período contemporâneo ao primeiro ano completo de geração da UFV Beberibe (abril/2023-abril/2024) para fins de análise comparativa. A Tabela 7 mostra o histórico de geração 2021-2024 atualizado com auxílio das projeções estimativas, cujos valores resultantes referentes ao período de novembro/2023 a abril/2024 estão destacados.

Tabela 7: Histórico de geração eólica 2021-2024 com adição dos valores estimados

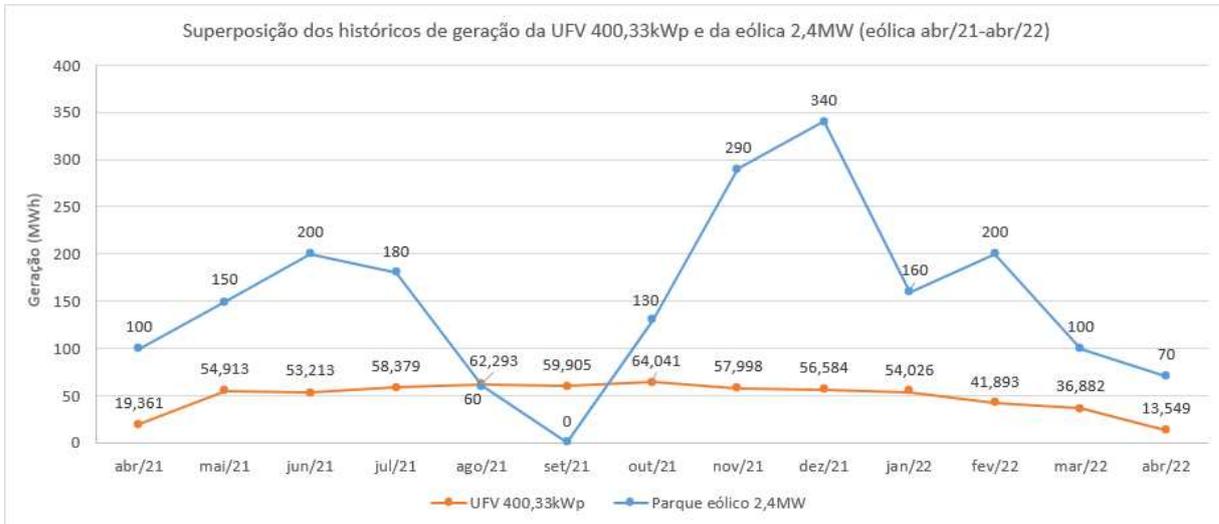
2021	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21
Ger(GWh)	0,23	0,21	0,12	0,1	0,15	0,2	0,18	0,06	0	0,13	0,29	0,34
2022	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22
Ger(GWh)	0,16	0,2	0,1	0,07	0,08	0,08	0,14	0,23	0,36	0,4	0,23	0,27
2023	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	mai/23	jun/23	jul/23	ago/23	set/23	out/23	nov/23	dez/23
Ger(GWh)	0,22	0,16	0,12	0,05	0,1	0,14	0,23	0,29	0,37	0,4	0,17	0,16
2024	jan/24	fev/24	mar/24	abr/24								
Ger(GWh)	0,3	0,1	0,53	0,38								

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024) adaptado de Wobben Enercon, 2023

4.2 Análise e avaliação do comportamento complementar entre as fontes da usina híbrida

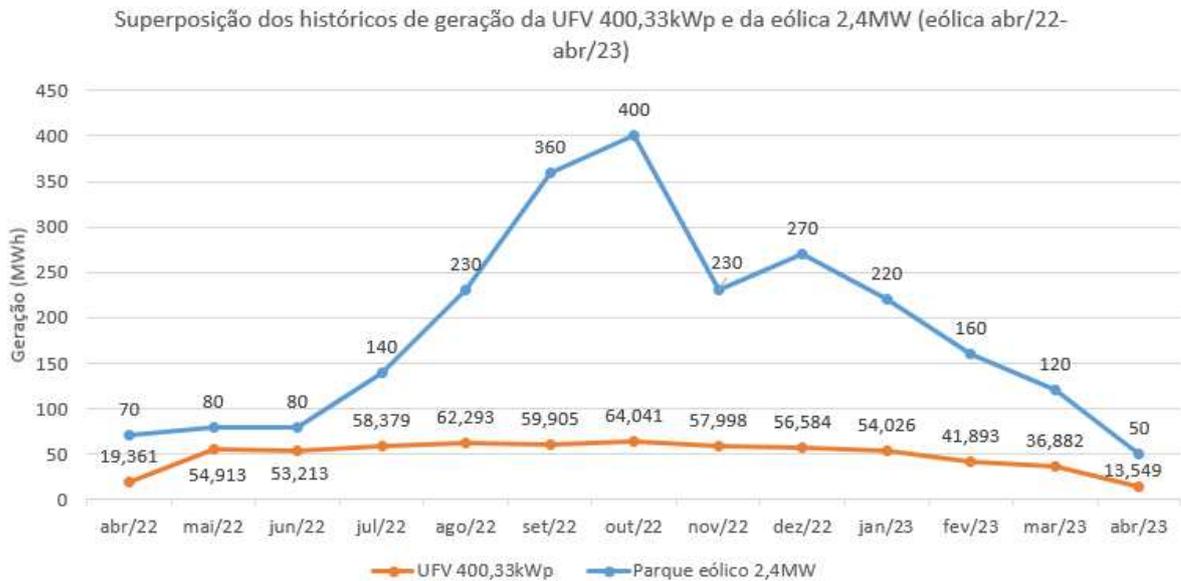
Em vista disso, agora em posse do histórico completo de valores reais e estimados de geração eólica, o Gráfico 1, o Gráfico 2 e o Gráfico 3 ilustram a análise comparativa das curvas anuais de geração da Central Eólica Beberibe 2,4 MW, no período de abril/2021-abril/2022, abril/2022-abril/2023 e abril/2023-abril/2024, respectivamente, com a curva do primeiro ano de geração da UFV Beberibe 400,33kWp (330kWca), no período de abr/2023-abr/2024, em que todas as curvas históricas serão comparadas na unidade de medida MWh.

Gráfico 1: Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x Eólica de abr/2021-abr/2022



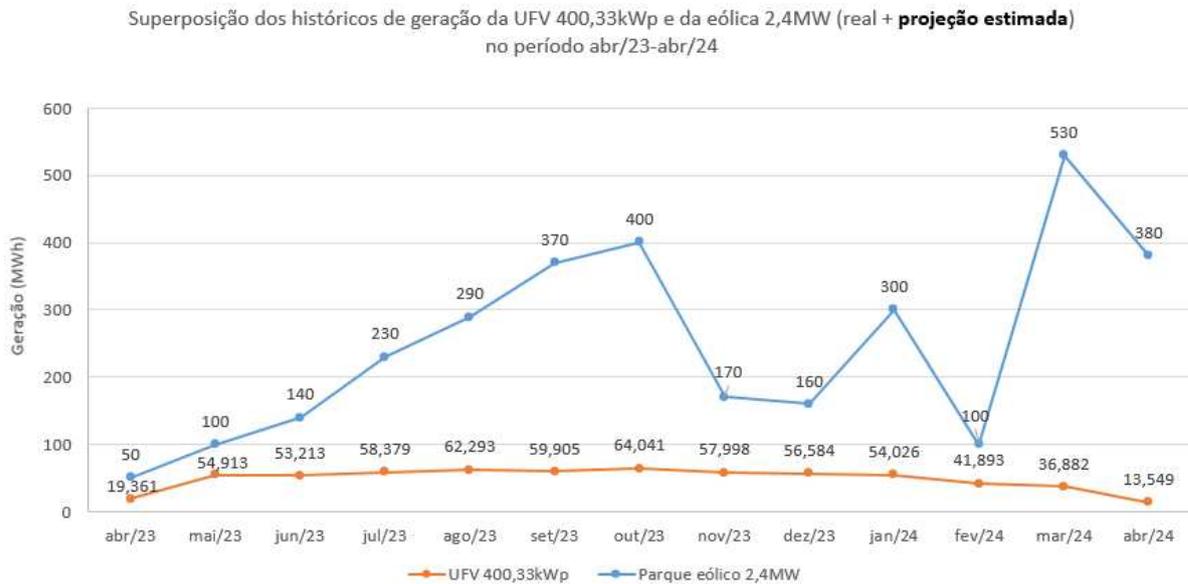
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Gráfico 2: Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x Eólica de abr/2022-abr/2023



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Gráfico 3: Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x Eólica (real + projeção estimada) de abr/2023-abr/2024

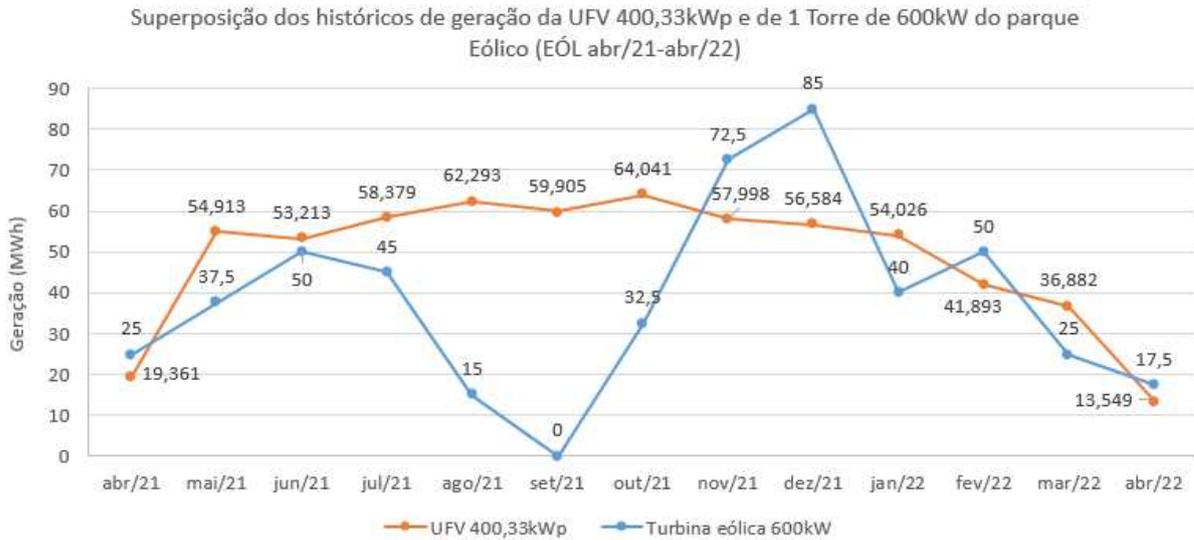


Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Como se pode ver nos 3 gráficos acima, não há um comportamento complementar muito nítido ao longo dos meses, e isso é justificado pela discrepância de capacidade de geração. Enquanto a Central Eólica Beberibe tem 2,4MW de potência instalada CA, a UFV Beberibe tem 330kW de potência instalada CA, ou seja, cerca de sete vezes menor, o que implica numa geração eólica consideravelmente maior mesmo em situações de geração ínfima. Portanto, para solucionar esse problema, foi considerado que todas as 4 turbinas de 600kW do parque tem a mesma geração ao final de cada dia, durante os 30 dias de cada mês, portanto com contribuições iguais à geração total de cada mês, de forma que todos os meses de janeiro/2021 a abril/2024 tiveram sua geração dividida por 4, de forma a se ter uma aproximação da geração de apenas uma torre de 600kW, valor de potência mais próximo ao da UFV Beberibe e que pode fornecer valores de geração no mesmo páreo.

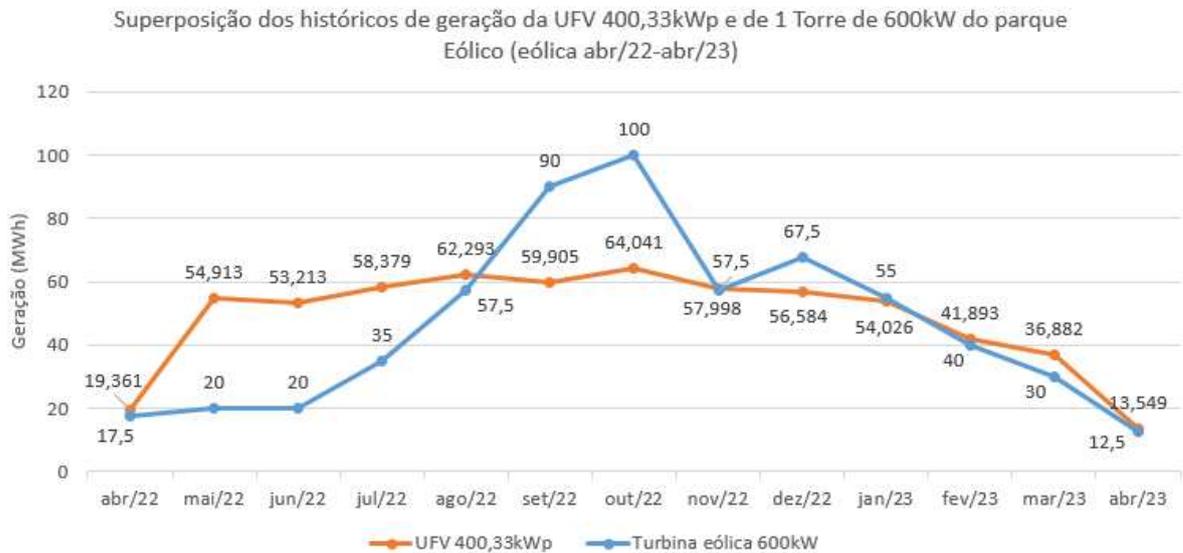
Portanto, no Gráfico 4, Gráfico 5 e Gráfico 6 estão ilustrados a análise comparativa das curvas anuais de geração de uma Turbina de 600kW da Central Eólica Beberibe, no período de abril/2021-abril/2022, abril/2022-abril/2023 e abril/2023-abril/2024, respectivamente, com a curva do primeiro ano de geração da UFV Beberibe 400,33kWp (330kWca), no período de abr/2023-abr/2024.

Gráfico 4: Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x 1 Turbina eólica de abr/2021-abr/2022



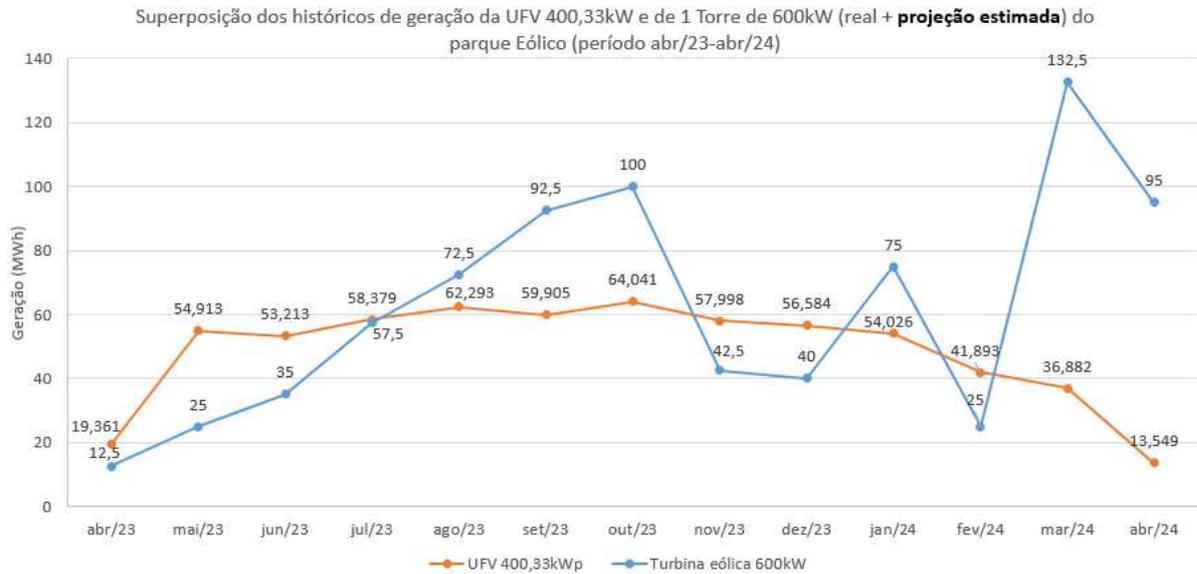
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Gráfico 5: Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x 1 Turbina eólica de abr/2022-abr/2023



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Gráfico 6: Análise de complementaridade dos históricos de geração UFV x 1 Turbina eólica (real + projeção estimada) de abr/2023-abr/2024



Apresentado os gráficos, agora numa escala que possibilita a comparação, pode-se realizar a análise. Na comparação do Gráfico 4 do período abril/2021-abril/2022 da geração de 1 turbina de 600kW com a UFV Beberibe, foi possível notar que salvo o mês de abril/2021, a UFV Beberibe foi superior em boa parte do primeiro semestre e no começo do segundo, não se pode deixar de mencionar que entre os meses de agosto/2021 a outubro/2021 houve desinstalação, retrofit e reinstalação no novo local do parque eólico o que a deixou pouco tempo em operação. A geração da turbina, por sua vez, superou a geração da UFV de novembro/2021 a dezembro/2021 e só tornou a superá-la novamente em fevereiro/2022 e abril/2022.

Na comparação do Gráfico 5, do período abril/2022-abril/2023 da geração de 1 turbina de 600kW com a UFV Beberibe, foi possível notar que de abril/2022 a agosto/2022 a geração da UFV Beberibe foi superior a geração da turbina, que por sua vez foi superior à geração FV em setembro/2022 e outubro/2022, inferior em novembro/2022, superior novamente de dezembro/2022 a janeiro/2023 e inferior novamente à geração FV de fevereiro/2023 a abril/2023.

Na comparação do Gráfico 6, do período abril/2023-abril/2024 da geração de 1 turbina de 600kW com a UFV Beberibe, foi possível notar que de abril/2023 a julho/2023 a geração da UFV Beberibe foi superior a geração da turbina, que por sua vez foi superior de agosto/2023 a outubro/2023 e só tornou a ser superior á geração FV em janeiro/2024. Os valores de março/2024 e abril/2024 foram desconsiderados para a análise comparativa, por serem resultados randômicos e imprecisos da projeção estimada.

Nesse contexto, ficou evidenciado nos gráficos comparativos sazonalidades visíveis no comportamento das curvas, que dizem respeito aos regimes de vento e de radiação solar no Ceará e, mais especificamente, em seu litoral. De acordo com o Potencial eólico sazonal a 80m de altura do Ceará, ilustrado no Anexo C, os regimes sazonais de vento no litoral cearense exibem altas velocidades médias durante o período seco, predominantemente de setembro a dezembro, e as menores médias são vistas em meados de março e abril. Em contrapartida, de acordo com os índices de Irradiação global horizontal sazonal do Ceará, ilustrado no Anexo D, os regimes de radiação solar no litoral cearense apresentam os maiores índices também durante o período seco, predominantemente de setembro a novembro, e as menores médias também são vistas em meados de março e abril. Ademais, ambos os regimes tem valores médios bem constantes e em níveis ótimos durante boa parte do ano no litoral cearense.

A sazonalidade do regime dos ventos e da radiação solar do Ceará é justificada principalmente pela dinâmica sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que faz com que os ventos alísios enfraqueçam ou se intensifiquem sobre o Estado. Quando a ZCIT se afasta do Ceará, atua intensificando a velocidade dos ventos, desfavorecendo a ocorrência de precipitação e formação de nuvens, intensificando os índices de radiação solar, conseqüentemente. Já quando a ZCIT se aproxima do Estado, atua reduzindo a velocidade dos ventos, favorecendo a ocorrência de precipitação e formação de nuvens e diminuindo os índices de radiação solar (Atlas solar e eólico do Ceará, 2019).

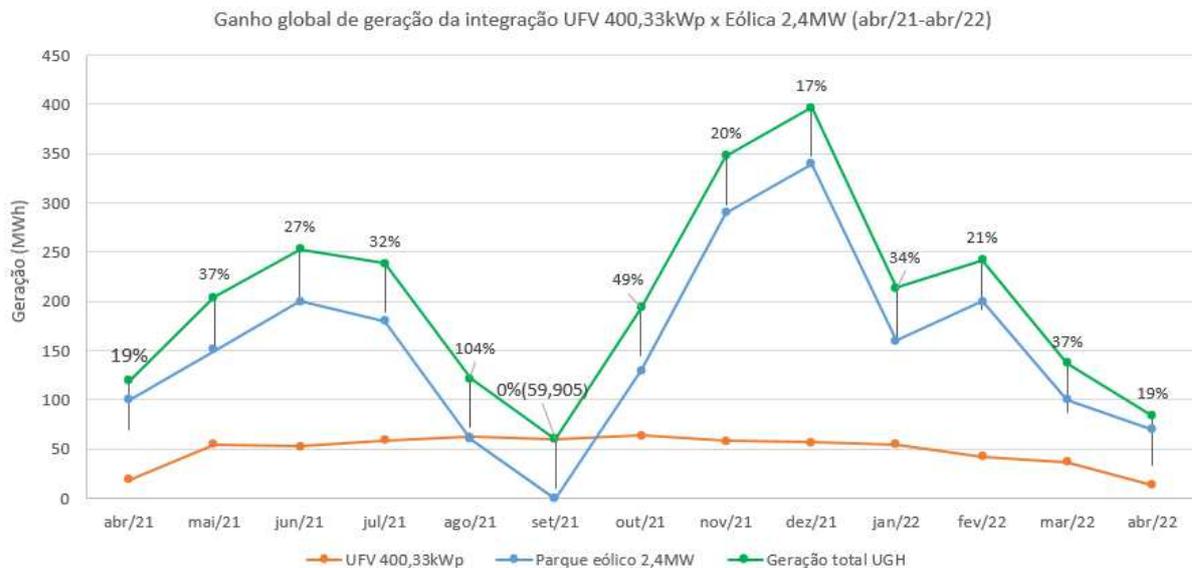
Portanto, resume-se que o primeiro semestre do ano no Ceará é marcado por chuvas, muita nebulosidade e baixa intensidade dos ventos e radiação solar, ao passo que no segundo semestre encontra-se velocidades mais altas dos ventos, maiores índices de radiação solar, menor nebulosidade e baixa precipitação. Essa situação nos faz constatar que durante o ano os regimes de chuva e de radiação solar têm comportamento sazonal similar, de certa forma diretamente proporcional, e com índices médios constantes durante boa parte do ano, o que, em contrapartida, dificulta a visualização de uma complementaridade sazonal eólico-solar mais bem definida no litoral do Ceará, com um nítido comportamento de aumento/falta de disponibilidade de um recurso em detrimento do outro. Esse comportamento pode ser melhor visto no período das 24h diárias, pela característica intermitente da radiação solar com disponibilidade limitada das 05:30 às 17:30, como ilustrou a Figura 25.

Apesar disso, ainda assim é possível visualizar um comportamento complementar entre as plantas da usina híbrida, que seria na perspectiva considerada da comparação da geração de 1 turbina de 600kW com a geração da UFV Beberibe, por terem valores na mesma

ordem de grandeza. Dito isso, a partir da análise dos Gráficos 4, 5 e 6 foi observado um “padrão” de comportamento, em que no primeiro semestre do ano, embora num cenário sazonal desfavorável para ambas as fontes, a geração FV é predominante, no entanto essa vantagem se esvai na transição para o segundo semestre em que, num cenário sazonal agora favorável para as duas fontes, a geração da turbina se torna predominante de agosto a dezembro.

Outrossim, sabendo que a análise do comportamento complementar entre a geração da Central Eólica Beberibe e a geração da UFV Beberibe é dificultada pela discrepância de capacidade instalada entre as plantas, conforme mencionado. Para torná-la viável, foi calculado o ganho mensal e anual de geração da UGH expresso em percentual, a partir da comparação entre a geração isolada da Central Eólica Beberibe, quando ainda não tinha a UFV Beberibe instalada, e a geração total no cenário da integração das duas plantas numa UGH. Os ganhos de geração podem ser observados no Gráfico 7, Gráfico 8 e Gráfico 9.

Gráfico 7: Ganho de geração da usina híbrida UFV + Eólica de abr/2021-abr/2022



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024).

Gráfico 8: Ganho de geração da usina híbrida UFV + Eólica de abr/2022-abr/2023

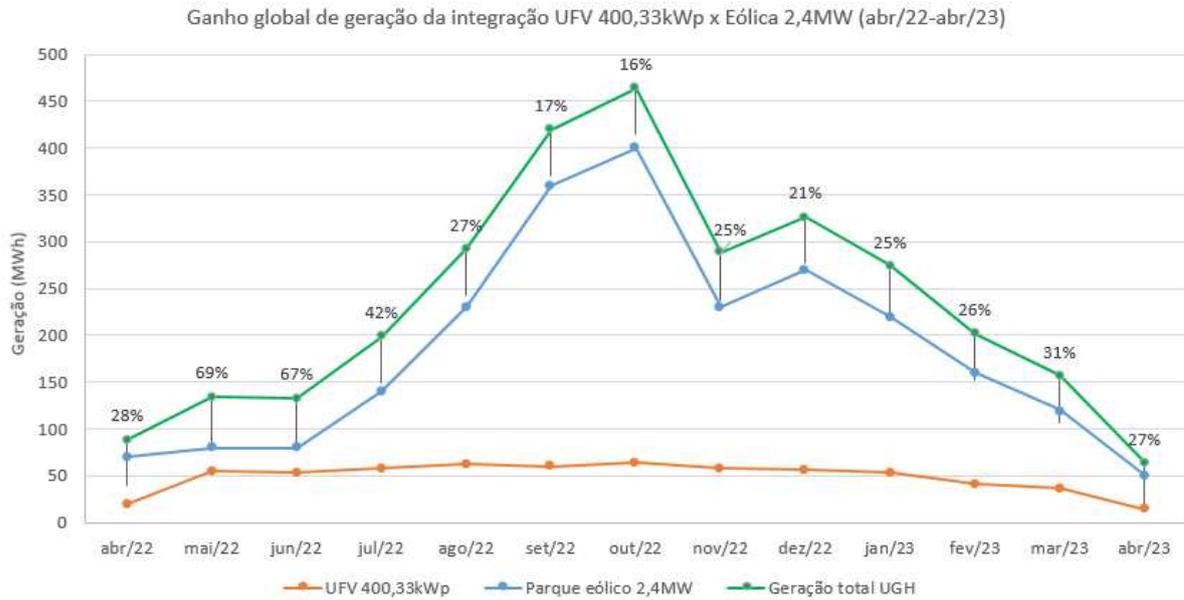
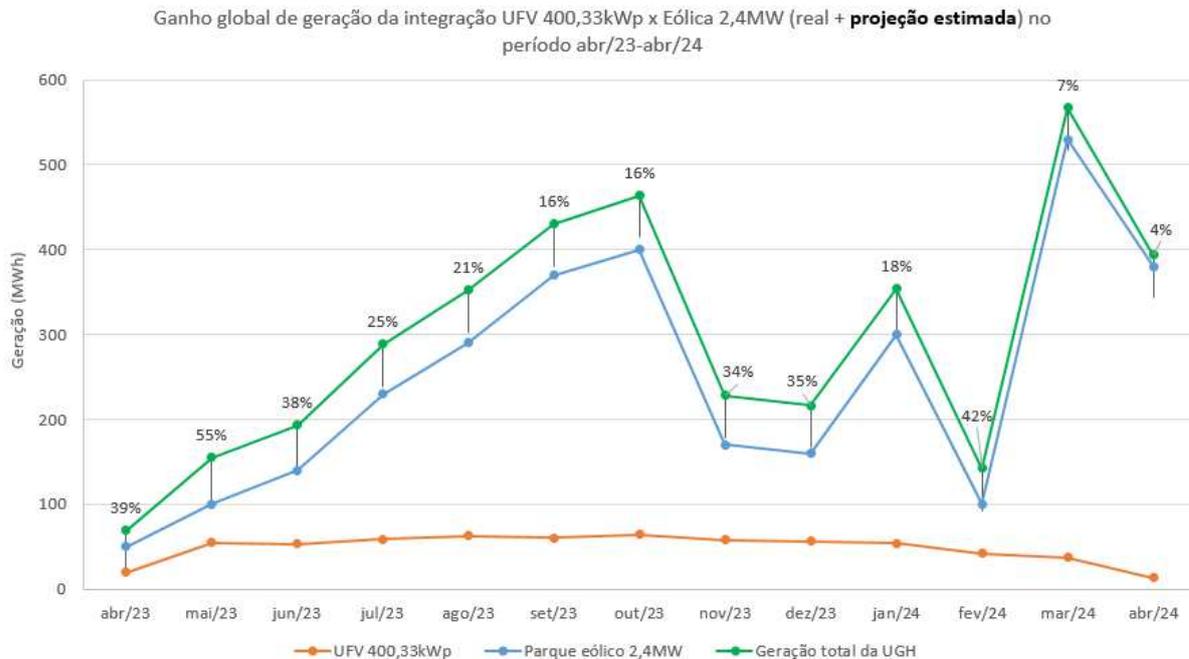


Gráfico 9: Ganho de geração da usina híbrida UFV + Eólica (real + projeção estimada) de abr/2023-abr/2024



Nessa perspectiva, foi possível observar que no primeiro semestre do ano, período considerado um gargalo para a produção de eletricidade dessas fontes devido aos regimes

sazonais desfavoráveis de vento e de radiação solar, em que as menores médias desses indicadores são encontradas em meados de março e abril, aplicando média simples, que no período abril/2021-abril/2022 foi constatado ganho médio de geração, entre os meses de fevereiro a abril de 2022, de cerca 26%. Já no período abril/2022-abril/2023, entre os meses de fevereiro a abril de 2023, o ganho médio de geração foi de cerca de 28%. Por sua vez, no período abril/2023-abril/2024, entre os meses de fevereiro a abril de 2024, o ganho médio de geração foi de cerca de 18%, mas deve ser desconsiderado pela projeção estimada de valores arbitrários em março e em abril.

Observando-se agora o segundo semestre do ano, período de melhor performance de produção de eletricidade das fontes eólica e solar, em que as maiores médias de seus indicadores são encontradas em meados de setembro a novembro, aplicando média simples, foi constatado que no período abril/2021-abril/2022 foi constatado ganho médio de geração, entre os meses de setembro a dezembro de 2021, de cerca 22%. Já no período abril/2022-abril/2023, entre os meses de setembro a dezembro de 2022, o ganho médio de geração foi de cerca de 20%. Por sua vez, no período abril/2023-abril/2024, entre os meses de setembro a dezembro de 2023, o ganho médio de geração foi de cerca de 25%.

Ademais, nos períodos de abril/2021-abril/2022, abril/2022-abril/2023, abril/2023-abril/2024, aplicando-se média simples nos valores percentuais, foram calculados ganhos médios anuais significativos na produtividade de cerca de 32%, 32% e 27%, respectivamente. Pode-se concluir, então, que a combinação da Central Eólica Beberibe com a UFV Beberibe reduziu os impactos dos regimes sazonais de vento e de radiação solar na geração do primeiro semestre e impulsionou a geração do segundo semestre, cujos regimes sazonais de vento e de radiação solar exibem as maiores médias de indicadores.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o potencial eólico e solar do Brasil, do Ceará e, mais enfaticamente, do município de Beberibe, como protagonista num cenário de transição energética por meio da implementação combinada de usinas de geração eólica e de geração solar, compondo usinas de geração híbrida menos intermitentes, mais seguras e estáveis. Foi possível apresentar também o aspecto histórico da Central Eólica Beberibe, mostrando seu pioneirismo no Brasil, organizações envolvidas e aspectos técnicos que envolveram sua instalação em 1996 na Praia Mansa, na região do Mucuripe em Fortaleza-CE e a sua realocação para Beberibe-CE, bem como os aspectos técnicos que envolveram a instalação da UFV Beberibe numa perspectiva, do grupo detentor do parque, de usar a área improdutivo no terreno para aproveitar o abundante recurso local de radiação solar .

Apesar das dificuldades de se ter uma discrepância de capacidade instalada entre as plantas, um histórico limitado de geração de energia solar, de abril/2023 a abril/2024, com gerações incompletas nos meses de abril de cada ano, e de se ter um histórico limitado de geração da eólica no período contemporâneo à geração solar, em que só se tem registro de dados de abril/2023 a outubro/2023, foi possível contorná-las com o desenvolvimento de um algoritmo de projeções históricas linearizadas para estimar os valores que faltavam. Viabilizando, então, a comparação dos históricos de geração eólica de abril a abril, entre os anos de 2021 a 2024, como se fossem contemporâneos ao histórico de geração de energia solar.

A partir das análises comparativas entre as curvas históricas de geração eólica e solar nos períodos de 21-22, 22-23 e 23-24, na perspectiva comparativa da geração de 1 turbina de 600kW com a geração da UFV de 400,33kWp, consideração feita para colocar as gerações na mesma ordem de grandeza e viabilizar a análise, foi notório o efeito dos regimes sazonais de vento e radiação solar nas curvas, de forma que no primeiro semestre do ano a geração de energia solar foi predominante e no segundo semestre a geração da turbina de 600kW foi predominante.

A análise também foi realizada comparando-se a geração original do parque eólico com a geração solar da UFV, numa perspectiva de ganho de geração, a partir da comparação entre a geração isolada da Central Eólica Beberibe e a geração total no cenário da integração das duas plantas numa UGH. Os resultados dos ganhos mensais de geração mostraram que a integração reduziu os impactos dos regimes sazonais de vento e de radiação solar na geração do primeiro semestre e impulsionou a geração do segundo semestre, cujos regimes sazonais de vento e de radiação solar exibem as maiores médias de indicadores. Ademais, a análise de ganho

de geração nos três períodos já mencionados exibiu ganhos médios anuais de geração total significativos por volta de 30%, portanto, a combinação foi capaz de promover ganhos significativos de eficiência e produtividade na geração de energia, além de mais estabilidade e menos intermitência, se comparada à aplicação individual de plantas fotovoltaicas e eólicas.

Pode-se concluir, portanto, que os objetivos deste trabalho foram atingidos e que resultado das análises evidenciam que a prática de implementação de usinas de geração híbrida no Brasil, no Ceará e no litoral cearense, deve ser mais fortalecida e incentivada pois, em operação, corroboram com um sistema global de geração renovável menos intermitente, com ganhos significativos em eficiência e produtividade de geração, contribuindo com um Sistema Elétrico Nacional cada vez mais capaz de acompanhar as variações de demanda e menos impactado pela escassez de recursos hídricos nos reservatórios das hidrelétricas. Fortalecendo, dessa maneira o SIN e a Matriz Energética Brasileira com confiabilidade, qualidade de energia, estabilidade, ao passo que afasta cenários de vulnerabilidade e imprevisibilidade, frente ao grande crescimento de capacidade instalada das fontes renováveis intermitentes, com ênfase nas fontes solar e eólica, que o país passa e passará, certamente, nas próximas décadas, vide seu potencial de abundância desses recursos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ - ADECE. **Atlas Eólico e Solar do Ceará, Mapas e Simuladores** [online], 2019. Disponível em: <http://atlas.adece.ce.gov.br/>. Acesso em: 05 set. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 19 mar. 2024

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL – IRENA. **Estatísticas de capacidade renovável 2024** [online]. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024>. Acesso em: 15 mar. 2024.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do; BROWER, Michael; ZACK, John; SÁ, Antonio Leite de. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia; Camargo Schubert Engenharia Eólica; TrueWind Solutions; Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2001. 188 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA. **Boletim de Geração Eólica 2022** [online]. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA. **Boletim de Geração Eólica 2023** [online]. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia eólica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2005. 243p.

BARROS, Beatriz Zanut. **Conheça os fatores que influenciam na produção de energia eólica**. Portal Engenharia 360 [online], 2022. Disponível em: <https://engenharia360.com/nikola-picape-eletrica-badger/>. Acesso em: 20 mai. 2024.

BMC ENERGIA. **Portfólio: Sistema Híbrido**, BMC Energia [online], s. d. Disponível em: <https://bmcenergia.com.br/portfolio>. Acesso em: 30 mai. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2. ed. São José dos Campos, SP: INPE, 2017. Disponível em:

m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2023**: ano base 2022. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023** [online]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 15 mar. 2024.

CEARÁ (Estado); ADECE; FIEC; SEBRAE. **Atlas eólico e solar: Ceará**. Curitiba: Camargo Schubert; Fortaleza: ADECE, FIEC, SEBRAE, 2019. 188 p. Disponível em: <http://atlas.adece.ce.gov.br/pdf/Atlas-Eolico-Solar-Ceara-2019-EBOOK.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024

CEARÁ. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA - SEMACE. **Com grande potencial em energias renováveis, o Ceará está se tornando a casa do hidrogênio verde** [online]. Portal Casa Civil, 2024. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/2024/01/03/com-grande-potencial-em-energias-renovaveis-o-ceara-esta-se-tornando-a-casa-do-hidrogenio-verde/#:~:text=O%20Potencial%20do%20Cear%C3%A1,capacidade%20contratada%20de%202.876MW>. Acesso em: 14 abr. 2024.

CENTRO de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL. **Central Eólica de Praia Mansa terá quatro aerogeradores de 300 kW. CRESESB Informe**, Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, ano II, n. 1, p. 10. Jun.1996.

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

CHESF. **Chesf energiza Usina Solar Flutuante** [online]. Disponível em: https://www.chesf.com.br/_layouts/15/Chesf_Noticias_Farm/Noticia.aspx?IDNoticia=373. Acesso em: 12 set. 2024.

CODEVASF. **Inauguração da usina solar flutuante de Sobradinho**, na Bahia [online]. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/noticias/2019/codevasf-participa-da-inauguracao-da-usina-solar-flutuante-de-sobradinho-na-bahia/whatsapp-image-2019-08-05-at-12-02-23-1.jpeg/view>. Acesso em: 12 set. 2024.

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO – CHESF. **Chesf entrega Casa Nova II e III** [online], 2017. Disponível em: https://www.chesf.com.br/_layouts/15/chesf_noticias_farm/noticia.aspx?idnoticia=234. Acesso em: 10 jun. 2024.

COMPANHIA Elétrica de Minas Gerais - CEMIG. **Praias de Parajuru** [online], 2024. Disponível em: <https://memoriadaeletricidade.com.br/acervo/31302/parque-eolico-praias-de-parajuru>. Acesso em: 05 set. 2024.

COMPANHIA Energética de Petrolina – Grupo CEP. **Usinas do Grupo, Eólica beberibe** [online], 2024. Disponível em: <http://www.grupocepenergia.com.br/usinas/eolica-beberibe/>. Acesso em: 05 set. 2024.

CONSELHO GLOBAL DE ENERGIA EÓLICA – GWEC. **Relatório global de vento 2024** [online]. Disponível em: https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/04/GWR-2024_digital-version_final-1.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

DIAS, Edmilson Jose. **O potencial da geração solar FV no Brasil: histórico e futuro**. 2023. 81 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/30759/O%20Potencial%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Solar%20FV%20no%20Brasil%20Hist%C3%B3rico%20e%20Futuro.pdf?squence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 abr. 2024.

ENF SOLAR. **Solar Inverter Directory: SG110CX** [online]. Disponível em: <https://www.enfsolar.com/pv/inverter-datasheet/12367>. Acesso em: 19 set. 2024.

FEDERAÇÃO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO DO ESTADO DO CEARÁ – FIEC. **Energias renováveis no Ceará** [online], 2020. Disponível em: <https://parquetecnologico.ufc.br/wp-content/uploads/2021/01/ceara-energias-renovaveis-10nov2020-1.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2024.

GASPARIN, Fernanda Bach; et al. **A Influência de políticas públicas para o progresso da geração solar fotovoltaica e diversificação da matriz energética brasileira**. Rev. Virtual Quim. [online], v. 14, n. 1, p. 77-81, 2022. Disponível em: <https://rvqsub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4250/918>. Acesso em: 22 mar. 2024.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GOMES, Rafael de Moura. **Desenvolvimento da energia eólica no Ceará, no Brasil e no mundo: uma solução energética viável**. 62 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Ceará – UFC, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/35461/1/2016_tcc_rmgomes.pdf. Acesso em: 28 mar. 2024.

HOLANDA, Alexandre. **Análise de caso: estudo de implementação de uma usina solo para investimento**. 82 f. TCC (Monografia - Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral) - Universidade Federal do Ceará – UFC, 2024.

INSTITUTO Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Cidades e Estados** [online], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/beberibe.html>. Acesso em: 05 set. 2024.

JEREZ, Sonia; et al. **Uma abordagem orientada para a ação para aproveitar ao máximo a complementaridade das energias eólica e solar**. *Earth's Future* [online], v. 11, mai. 2023.

Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022EF003332>. Acesso em: 18 abr. 2024.

LINKEDIN. **Publicado por Gilton Sena** [online], 2023. Disponível em: https://www.linkedin.com/posts/gilton-sena-bbb88426b_energiasolar-solar-energetica-activity-7118281579071758336 i8n2/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop. Acesso em: 05 set. 2024.

MATOS, Bruno Dias Aguiar. **Análise dos recursos energéticos e sua complementaridade na viabilidade de sistemas de geração híbridos solar - eólico**. 81 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Estado do Ceará, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/45195?locale=pt_BR. Acesso em: 20 mai. 2024.

MEMORIAL da Eletricidade. **Usinas, Parque Eólico Praias de Parajuru** [online], 2018. Disponível em: <https://memoriadaeletricidade.com.br/acervo/31302/parque-eolico-praias-de-parajuru>. Acesso em: 05 set. 2024.

MINISTÉRIO de Minas e Energia - MME (Brasil). **Resenha Energética Brasileira: exercício de 2018**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, p. 10, Mai. 2019.

NASA. **Climate and Earth's Energy Budget** [online]. 2023. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>. Acesso em: [data de acesso].

NABUCO, Saynarah Cruz. **Estudo de parque eólico offshore para suprimento de uma usina de hidrogênio verde: análises técnica e econômica**. 171 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Estado do Ceará – UFC, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/67638/3/2022_tcc_scnabuco.pdf. Acesso em: 20 mai. 2024.

NEVES, Lívia. **Usinas Híbridas: o que são e quais vantagens oferecem**. Portal Way2 [online]. Disponível em: <https://www.way2.com.br/blog/o-que-sao-usinas-hibridas/>. Acesso em: 20 mai. 2024.

OLIVEIRA, Halleson Ney Gomes; SILVA, Kelvin Inocência Silvino da. **Fontes de energias no Brasil. Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 17, n. 3, p. 01-10, 2024, p. 2.

PEREIRA, Enio Bueno; et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf. Acesso em: 28 mar. 2024.

PEREIRA JÚNIOR, Jackson. **Ceará se consolida como a maior potência do Nordeste em conexões solares**. Portal Economic News Brasil [online], 2021. Disponível em: <https://economicnewsbrasil.com.br/2021/11/04/ceara-se-consolida-como-a-maior-potencia-do-nordeste-em-conexoes-solares/>. Acesso em: 14 abr. 2024.

ROCHA, Fabíola de Araújo; POMPEU, Gina Vidal Marcilio. **Energias limpas: instalação, manutenção e descomissionamento diante do cenário da transição energética e da justiça climática**. Porto Alegre: Fundação Fênix, 2024. Disponível em:

<https://www.unifor.br/documents/20143/1113403/290++ENERGIAS+LIMPAS.pdf/c1d1a4d0-eb40-80b3-8988-ad0cf624ae52?t=1717537042621>. Acesso em: 01 jun. 2024.

SCHULTZ, D. J. et al. **Sistemas Complementares de Energia Eólica e Hidráulica no Brasil**. Espaço Energia. Revista técnico-científica da área de energia. Número 03. Out. 2005. Disponível em: <http://www.espacoenergia.com.br/browseissues.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

SANTOS, Afonso Henriques Moreira; et al. **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. 3. ed. Itajubá: FUPAI, 2006.

SANTOS, José Alexandre Ferraz de Andrade. **Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power Generation in Brazil**. ScienceDirect [online], n. 67, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957178720300795>. Acesso em: 18 abr. 2024.

SANTOS, Priscila; ARAÚJO, Francisco. O Desenvolvimento da Energia Eólica no Brasil: **Uma Revisão Bibliográfica**. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação – REASE**, São Paulo, v.9, n. 06, p. 2978-2989, jun. 2023.

SOUSA JÚNIOR, Wilson Cabral de; REID, John; LEITÃO, Neidja Cristine Silvestre. **Custos e benefícios do complexo hidrelétrico Belo Monte: uma abordagem econômico-ambiental**. 4. ed. Conservação Estratégica, 2006 [online]. Disponível em: https://iieb.org.br/wp-content/uploads/2019/02/public_out_belo_monte.pdf.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

THE WIND POWER. **Wobben, E40/600**[online], 2022. Disponível em: https://www.thewindpower.net/turbine_en_876_wobben_e40-600.php. Acesso em: 11 set. 2024.

THE WIND POWER. **Wind farms, Mucuripe (Brazil)**[online], 2023. Disponível em: https://www.thewindpower.net/windfarm_es_3684_mucuripe.php. Acesso em: 11 set. 2024.

TOLMASQUIN, Maurício Tiomno. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. Disponível em: https://bibliotecadigital.economia.gov.br/bitstream/123456789/242/1/NT_EnergiaSolar_2012.pdf. Acesso em: 20 abr. 2024.

UFRS. **Efeito fotovoltaico**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul [online], 2024. Disponível em: http://penta3.ufrgs.br/fisica/energia/Energia_solar/efeito_fotovoltaico.html. Acesso em: 3 set. 2024.

ANEXO A – FICHA DE DADOS INVERSOR SUNGROW SG110CX

SG110CX

Multi-MPPT String Inverter for 1000 Vdc System



☀️ HIGH YIELD

- 9 MPPTs with max. efficiency 98.7%
- Compatible with bifacial module
- Built-in PID recovery function

💡 SMART O&M

- Touch free commissioning and remote firmware upgrade
- Smart IV Curve Diagnosis *
- Fuse free design with smart string current monitoring

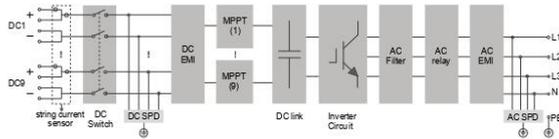
🛠️ SAVED INVESTMENT

- Compatible with Al and Cu AC cables
- DC 2 in 1 connection enabled
- Q at night function

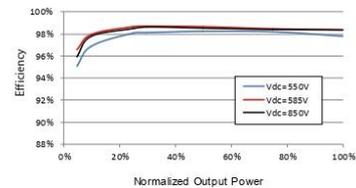
🛡️ PROVEN SAFETY

- IP66 and C5 protection
- Type II SPD for both DC and AC
- Compliant with global safety and grid code

CIRCUIT DIAGRAM



EFFICIENCY CURVE



Type designation	SGT10CX
Input (DC)	
Max. PV input voltage	1100 V **
Min. PV input voltage / Start-up input voltage	200 V / 250 V
Nominal PV input voltage	585 V
MPP voltage range	200 – 1000 V
No. of independent MPP inputs	9
No. of PV strings per MPPT	2
Max. PV input current	26 A * 9
Max. DC short-circuit current	40 A * 9
Output (AC)	
AC output power	110 kVA @ 45 °C / 100 kVA @ 50 °C
Max. AC output current	158.8 A
Nominal AC voltage	3 / N / PE, 400 V
AC voltage range	320 – 460V
Nominal grid frequency / Grid frequency range	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz
Harmonic (THD)	< 3 % (at nominal power)
Power factor at nominal power / Adjustable power factor	> 0.99 / 0.8 leading – 0.8 lagging
Feed-in phases / AC connection	3 / 3-PE
Efficiency	
Max. efficiency	98.7 %
European efficiency	98.5 %
Protection and Function	
DC reverse polarity protection	Yes
AC short-circuit protection	Yes
Leakage current protection	Yes
Grid monitoring	Yes
Ground fault monitoring	Yes
DC switch	Yes
AC switch	No
PV string monitoring	Yes
Q at night function	Yes
PID recovery function	Yes
Arc fault circuit interrupter (AFCI)	Optional
Surge protection	DC Type II (optional: Type I + II) / AC Type II
General Data	
Dimensions (W*H*D)	1051*660*362.5 mm
Weight	89 kg
Topology	Transformerless
Degree of protection	IP66
Night power consumption	< 2 W
Operating ambient temperature range	-30 to 60 °C (> 50 °C derating)
Allowable relative humidity range	0 – 100 %
Cooling method	Smart forced air cooling
Max. operating altitude	4000 m (> 3000 m derating)
Display	LED, Bluetooth+APP
Communication	RS485 / Optional: WLAN, Ethernet
DC connection type	MC4 (Max. 6 mm ²)
AC connection type	OT / DT terminal (Max. 240 mm ²)
Compliance	IEC 62109, IEC 61727, IEC 62116, IEC 60068, IEC 61683, VDE-AR-N 4110:2018, VDE-AR-N 4120:2018, IEC 61000-6-3, EN 50549, AS/NZS 4777.2:2015, CEI 0-21, VDE 0126-1-1/A1 VFR 2014, UTE C15-712-1:2013, DEWA
Grid Support	Q at night function, LVRT, HVRT, active & reactive power control and power ramp rate control

*: Only compatible with Sungrow Logger, EyeM4 and iSolarCloud

** : The inverter enters the standby state when the input voltage ranges between 1,000V and 1,100V. If the maximum DC voltage in the system can exceed 1000V, the MC4 connectors included in the scope of delivery must not be used. In this case MC4 Evo2 connectors must be used.



ANEXO B – CÓDIGO E RESULTADOS DA PROJEÇÃO HISTÓRICA ESTIMADA DOS VALORES DE GERAÇÃO EÓLICA NOV/2023-ABR/2024

```

from operator import length_hint
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd

# Gerar as datas de janeiro de 2021 a abril de 2024
dates = pd.date_range(start='2021-01-01', end='2024-04-30', freq='M')

# Lista de valores fornecidos 34 meses fornecer ate o 40 (+6)
values = [
    0.23, 0.21, 0.12, 0.1, 0.15, 0.2, 0.18, 0.06, 0, 0.13, 0.29, 0.34,
    0.16, 0.2, 0.1, 0.07, 0.08, 0.08, 0.14, 0.23, 0.36, 0.4, 0.23, 0.27,
    0.22, 0.16, 0.12, 0.05, 0.1, 0.14, 0.23, 0.29, 0.37, 0.4
]

# Criar um DataFrame para facilitar a manipulação dos dados
data = pd.DataFrame({'Date': dates[:len(values)], 'Value': values})

# Encontrar o maior valor
max_index = data['Value'].idxmax()
max_point = data.iloc[max_index]

# Encontrar o segundo maior valor à esquerda do maior valor
left_data = data[:max_index]
second_max_index = left_data['Value'].nlargest(2).index[-1]
second_max_point = left_data.loc[second_max_index]

# Calcular a equação da reta que passa pelos o maior valor e o segundo maior à esquerda
x1, y1 = max_point['Date'].toordinal(), max_point['Value']
x2, y2 = second_max_point['Date'].toordinal(), second_max_point['Value']

# Coeficientes da equação da reta (y = mx + b)
m_top = (y2 - y1) / (x2 - x1)
b_top = y1 - m_top * x1

# Gerar valores de x para a reta dos maiores valores
x_vals = np.array([date.toordinal() for date in dates])
y_vals_top = m_top * x_vals + b_top

# Encontrar o menor valor
min_index = data['Value'].idxmin()
min_point = data.iloc[min_index]

# Encontrar o segundo menor valor à direita do menor valor
right_data = data[min_index+1:]
second_min_index = right_data['Value'].nsmallest(1).index[-1]
second_min_point = right_data.loc[second_min_index]

# Calcular a equação da reta que passa pelos dois pontos dos menores valores
x3, y3 = min_point['Date'].toordinal(), min_point['Value']
x4, y4 = second_min_point['Date'].toordinal(), second_min_point['Value']

# Coeficientes da equação da reta (y = mx + b)
m_min = (y4 - y3) / (x4 - x3)
b_min = y3 - m_min * x3

# Gerar valores de y para a reta dos menores valores
y_vals_min = m_min * x_vals + b_min

# Calcular a média móvel com janela de 6 meses
rolling_mean = data['Value'].rolling(window=5).mean()

#criar array isolado
valores_media = []
for i in range(0, len(rolling_mean) - 4):
    if not np.isnan(rolling_mean[i]) and not np.isnan(rolling_mean[i + 4]):
        valores_media.append(rolling_mean[i])

valores_estimados = []

for i in range(0, len(valores_media) - 4, 4):
    media = np.mean(valores_media[i:i+5])
    valores_estimados.append(media)

#print("Médias de 5 em 5 valores:", valores_estimados)

valores canais_top = []
valores canais_min = []

valores canais_top = y_vals_top[len(rolling_mean):]
valores canais_min = y_vals_min[len(rolling_mean):]

```

```

#print("Canal alto:", valores_canais_top)
#print("Canal baixo:", valores_canais_min)

index_maior = np.argmax(valores_estimados)
index_menor = np.argmin(valores_estimados)

#print("Posicao maior: ",index_maior)
#print("Posicao menor: ",index_menor)

# Convertendo a lista de valores estimados em um array NumPy
valores_estimados_array = np.array(valores_estimados)

# Calcular o multiplicador usando os índices
a =valores_canais_top[index_maior]
b =valores_canais_min[index_menor]

c =valores_estimados_array[index_maior]
d =valores_estimados_array[index_menor]

multiplicador = (a-b)/(c-d)
defasador = (a+d)-(b+c)

# Multiplicar os valores estimados pelo multiplicador
valores_estimados_array *= multiplicador
valores_estimados_array -= defasador

print("Valores estimados: ",valores_estimados_array)

# Plotar o gráfico com a média móvel
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(data['Date'], data['Value'], marker='o', label='Geracao')
plt.plot(dates, y_vals_top, 'r--', label='Maior canal')
plt.plot(dates, y_vals_min, 'g--', label='Menor canal')
plt.plot(data['Date'], rolling_mean, 'y-', label='Média Móvel (Janela de 5 meses)')
plt.plot(dates[4+30:len(valores_estimados)+4+30], valores_estimados_array, marker='o', color='black', label='Valores Estimados')

# Adicionar títulos e rótulos
plt.title('Valores por Mês (Jan 2021 - Abr 2024) com Média Móvel')
plt.xlabel('Mês')
plt.ylabel('Ger(GWh)')
plt.legend()
plt.grid(True)

# Mostrar o gráfico
plt.show()

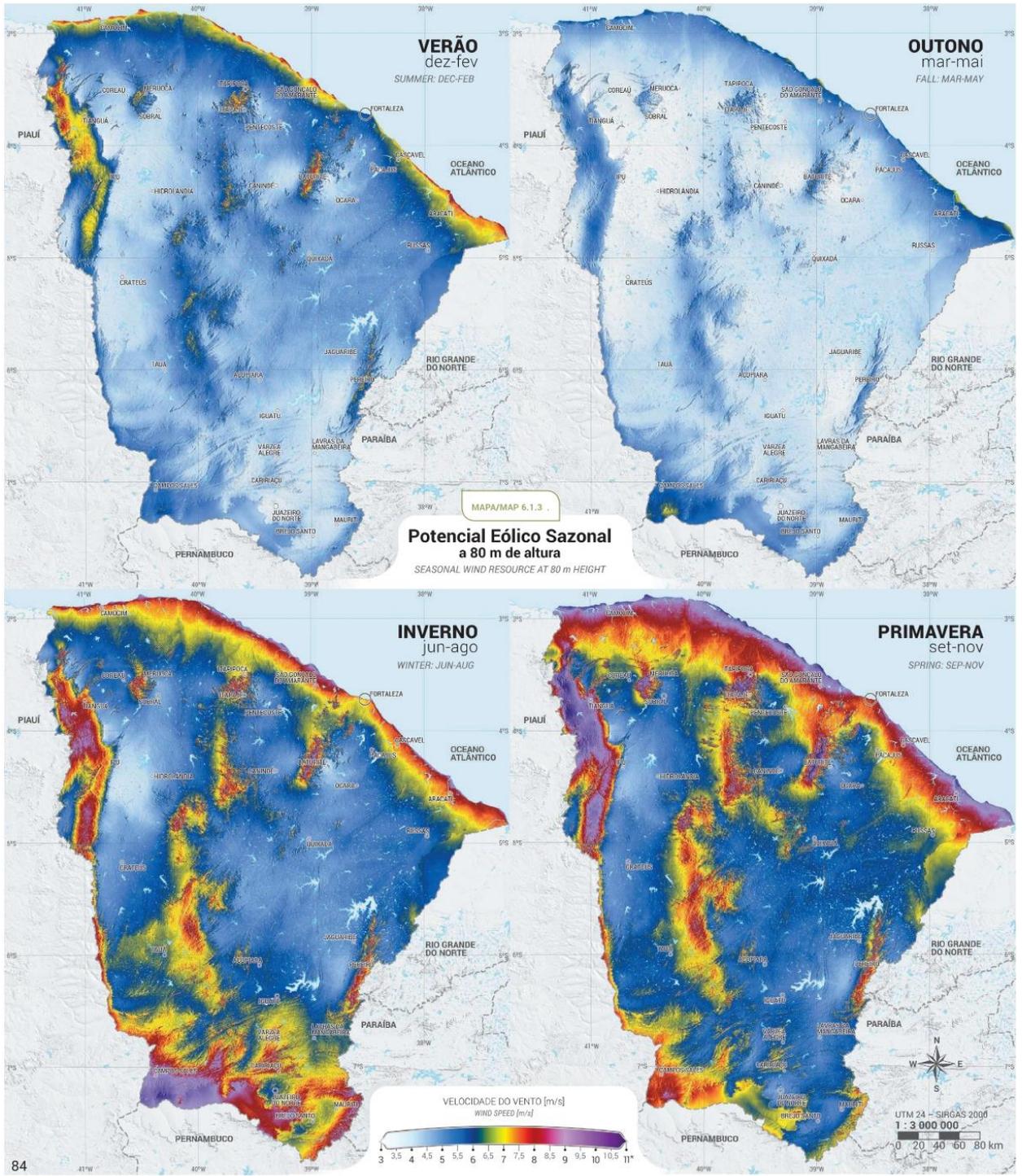
```

↔ Valores estimados: [0.17026511 0.16259646 0.29679771 0.10380354 0.5294132 0.37604035]



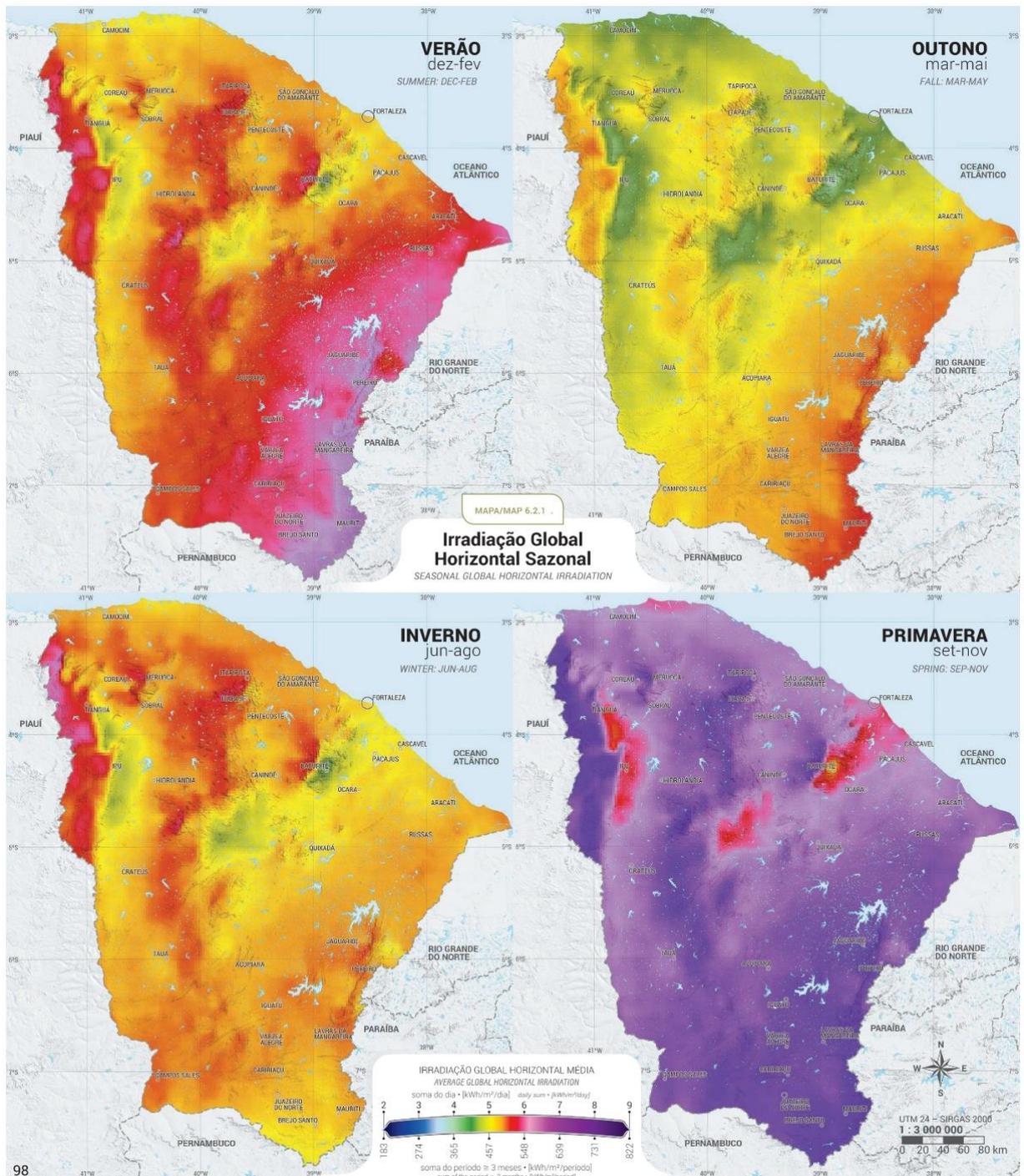
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2024) utilizando o site de computação em nuvem Google Colab

ANEXO C – POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 80M DE ALTURA



Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR DO CEARÁ, 2019, p.84).

ANEXO D – IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL SAZONAL



Fonte: (ATLAS EÓLICO E SOLAR DO CEARÁ, 2019, p.98).