



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALBERES BARBOSA DE AGUIAR

**SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA DIMINUIÇÃO DA GERAÇÃO
TERMELÉTRICA EM FERNANDO DE NORONHA**

Recife
2022

ALBERES BARBOSA DE AGUIAR

**SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA DIMINUIÇÃO DA
GERAÇÃO TERMELÉTRICA EM FERNANDO DE NORONHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Delgado Soriano

Recife
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Aguiar, Alberes Barbosa de.

Sistema híbrido eólico-fotovoltaico para diminuição da geração termelétrica em Fernando de Noronha / Alberes Barbosa de Aguiar. - Recife, 2023.

60 p : il., tab.

Orientador(a): Guilherme Delgado Soriano

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Geração híbrida eólico-fotovoltaica. 2. Fontes renováveis de energia. 3. Sistemas isolados. 4. Fernando de Noronha. I. Soriano, Guilherme Delgado. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ALBERES BARBOSA DE AGUIAR

**SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA DIMINUIÇÃO DA
GERAÇÃO TERMELÉTRICA EM FERNANDO DE NORONHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 02/05/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Delgado Soriano (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo José Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. MSc. Artur Muniz Szpak Furtado (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom precioso: a vida! Por estar sempre presente me abençoando.

Aos meus queridos e amados pais, pelo carinho, amor e companheirismo.

As minhas irmãs (Claudiane Aguiar, Gisele Aguiar, Elane Aguiar e Rosangela Aguiar) por se fazerem presente na minha trajetória de vida.

Ao professor. Dr. Guilherme pelas orientações necessárias que possibilitaram que os objetivos desse trabalho fossem atingidos.

A Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) pela disponibilidade dos dados de carga da unidade de Fernando de Noronha.

Ao Engenheiro Eletricista Jadiel Mendonça Vasconcelos pelas indicações e contribuições.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para minha formação profissional meus sinceros agradecimentos.

“Existe uma força motriz mais poderosa do que o vapor,
a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”
Albert Einstein

RESUMO

Estudos para a redução de fontes poluentes vêm mostrando mais frequentemente a importância da substituição da geração a óleo diesel pelas fontes renováveis disponíveis atualmente. Tais pesquisas tornam-se mais significativas quando se trata de locais especiais, como o arquipélago de Fernando de Noronha, área de proteção ambiental que possui um sistema de geração de energia isolado. A produção conjunta da tecnologia eólica e fotovoltaica pode ser uma alternativa para predominância de fontes limpas no atendimento da demanda desses locais, tendo como vantagem a possível complementariedade energética durante o tempo. Este trabalho avaliou o comportamento de um subsistema de geração híbrido e associado eólico-fotovoltaico, bem como a melhor forma do dimensionamento em relação às configurações: potência, área, tipos de aerogeradores e prováveis cenários para implementação no Arquipélago Fernando de Noronha. A análise foi realizada nos *softwares HOMER e System Advisor Model* a partir de informações climáticas via satélite e de base de dados, com aplicação de um estudo de caso para o consumo da Compesa e para o dimensionamento de uma planta *offshore* estimando a carga total. Os resultados mostram que os modelos híbridos podem auxiliar a geração térmica da ilha. O estudo de caso da Compesa indicou uma redução de aproximadamente 2.554.000 litros de óleo diesel por ano. Já o da planta *offshore* revelou uma diminuição correspondente a 4.115.000 litros de diesel por ano, sendo equivalente a 50,5% da produção prevista para 2029. Fernando de Noronha possui bons indicativos para complementariedade energética eólico-FV com alto potencial de produção a ser extraído no mar. O modelo híbrido mostrou-se eficiente com um controle auxiliar entre carga e geração para o gerenciamento do consumo nos momentos favoráveis da produção renovável.

Palavras-chave: Geração híbrida eólica-fotovoltaica; Fontes renováveis de energia; Sistemas isolados; Fernando de Noronha.

ABSTRACT

Studies for the reduction of polluting sources have more frequently shown the importance of replacing diesel oil generation with the renewable sources currently available. Such research becomes more significant when it comes to special locations, such as the Fernando de Noronha archipelago, an environmental protection area that has an isolated power generation system. The joint production of wind and photovoltaic technology can be an alternative for the predominance of clean sources to meet the demand in these places, taking advantage of the possible energy complementarity over time. This work evaluated the behavior of a hybrid and associated wind-photovoltaic generation subsystem, as well as the best way of dimensioning in relation to the configurations: power, area, types of wind turbines and probable scenarios for implementation in the Fernando de Noronha Archipelago. The analysis was carried out using HOMER and System Advisor Model software based on climate information via satellite and a database, with the application of a case study for Compesa's consumption and for the dimensioning of an offshore plant, estimating the total load. The results show that the hybrid models can help the thermal generation of the island. The Compesa case study indicated a reduction of approximately 2,554,000 liters of diesel oil per year. The offshore plant revealed a decrease corresponding to 4,115,000 liters of diesel per year, equivalent to 50.5% of the expected production for 2029. Fernando de Noronha has good indications for wind-PV energy complementarity with high production potential to be extracted at sea. The hybrid model proved to be efficient with an auxiliary control between load and generation to manage consumption in favorable moments of renewable production.

Keywords: Hybrid wind-photovoltaic generation; Renewable energy sources; Isolated systems; Fernando de Noronha.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Previsão do aumento da carga ao longo dos próximos anos em Fernando de Noronha	15
Figura 2 - Previsão do crescimento da demanda em Fernando de Noronha.	16
Figura 3 - Perfil do consumo energético em Fernando de Noronha.....	19
Figura 4 - Variação da velocidade média anual do vento no Arquipélago.....	20
Figura 5 - Velocidade média anual do vento na base de dados da NASA para Fernando de Noronha.	21
Figura 6 - Irradiação média anual na base de dados da NASA.....	21
Figura 7 - Comportamento da irradiância média para ano de 2021 em Fernando de Noronha.	23
Figura 8 - Capacidade de potência FV instalada no Brasil.....	24
Figura 9 - Principais componentes da turbina eólica.....	27
Figura 10 - Velocidade média horária do vento para o ano de 2021 em Noronha.	28
Figura 11 - Levantamento do potencial <i>offshore</i> de Noronha.	32
Figura 12 - Configurações adotadas para conexão com a rede.	34
Figura 13 - Perfil complementar dos recursos primários em Fernando de Noronha.....	35
Figura 14 - Vista superior via satélite NASA do açude do Xeréu.....	38
Figura 15 - Demanda das maiores unidades consumidoras da Compesa em Fernando de Noronha.	39
Figura 16 - Consumo de todas as unidades da Compesa em Noronha no ano de 2022.	40
Figura 17 - Configuração da usina UFF no <i>SAM</i>	41
Figura 18 - Suposição da distância dos módulos para o local estimado dos inversores.....	42
Figura 19 - Modelo da turbina no <i>SAM</i>	43
Figura 20 - Modelo da carga da Compesa no <i>HOMER</i>	44
Figura 21 - Configuração híbrida adotada no <i>HOMER</i>	45
Figura 22 - Estimativa da carga ao longo de um ano em Fernando de Noronha.....	46
Figura 23 - Parâmetros estimados para os dados de carga no <i>HOMER</i>	46
Figura 24 – Resultado da Geração CA mensal no <i>SAM</i> para estudo de caso da Compesa.	47
Figura 25 - Comportamento do sistema híbrido no <i>HOMER</i> para o estudo de caso da Compesa.	49
Figura 26 – Resultado da geração mensal no <i>HOMER</i> para o estudo de caso da Compesa. ...	49

Figura 27 - Comportamento do sistema híbrido no <i>HOMER</i> com baterias.	50
Figura 28 - Geração mensal no SAM para planta <i>offshore</i>	53
Figura 29 - Comportamento da usina associada no <i>SAM</i> com turbina de 2 <i>MW</i> no mês de agosto.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Unidades geradoras a diesel.....	18
Tabela 2 - Potencial FV <i>onshore</i> disponível em Fernando de Noronha.....	24
Tabela 3 - Possível configuração para UFF.....	39
Tabela 4 – Métricas do sistema associado para turbina de 2 MW.	48
Tabela 5 - Resultados da simulação no <i>HOMER</i> para o estudo de caso da Compesa.....	48
Tabela 6 - Resultados da planta <i>offshore</i> com demanda máxima.	51
Tabela 7 - Comportamento do <i>Curtailment</i> para usinas associadas.....	53
Tabela 8 - Métricas do sistema associado para turbina com 5 MW.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BDE	Base de Dados do Estado de Pernambuco
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCC	Conta de Consumo de Combustíveis
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaica
GD	Geração Distribuída
HOMER	Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources
MME	Ministério de Minas e Energia
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
SAM	<i>System Advisor Model</i>
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPMP	Seguimento do Ponto de Máxima Potência
UHE	Usina Hidrelétrica
UFF	Usina Fotovoltaica Flutuante
UFV	Usina Fotovoltaica
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

LISTA DE SÍMBOLOS

v_a	Velocidade do Vento no Ponto A
v_b	Velocidade do Vento no Ponto B
h_a	Altura no Ponto A
h_b	Altura no Ponto B
Z	Comprimento da Rugosidade Local

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Geral	16
1.1.2	Específicos.....	17
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE FERNANDO DE NORONHA.....	18
2.2	RECURSOS PRIMÁRIOS	20
2.3	SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	22
2.3.1	Sistema fotovoltaico offshore e flutuante.....	25
2.4	SISTEMA EÓLICO	26
2.4.1	Avaliação onshore de grande e pequeno porte para Fernando de Noronha	29
2.4.2	Sistema eólico offshore	30
2.4.2.1	<i>Avaliação da tecnologia eólica offshore para Fernando de Noronha.....</i>	<i>31</i>
2.5	SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO	32
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	35
3.1	BASE DE DADOS.....	36
3.2	ANÁLISE DO <i>CURTAILMENT</i> PARA USINAS ASSOCIADAS	36
3.3	ANÁLISE DO SISTEMA HÍBRIDO	37
3.3.1	Estudo de caso compesa	37
3.3.1.1	<i>Dimensionamento da UFF no SAM</i>	<i>40</i>
3.3.1.2	<i>Modelo da Turbina eólica no SAM</i>	<i>42</i>
3.3.1.3	<i>Modelo do sistema no HOMER.....</i>	<i>43</i>
3.3.2	Estudo de caso planta offshore com demanda máxima.....	45
3.4	RESULTADOS E DISCURSÃO.....	47
4	CONCLUSÕES	55
4.1	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	56
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICES.....	59

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande potencial para extração de energia elétrica renovável, apresentando crescimento na diversificação da matriz energética com a expansão das usinas eólicas e fotovoltaicas previsto pelo Plano Decenal de Energia 2030 (PDE) [1]. Pesquisas sobre a junção entre essas fontes apontam uma possível complementaridade, tendo em vista que durante uma parte do dia a usina eólica apresenta menor disponibilidade dos recursos para produção comparados aos da fonte solar fotovoltaica [2,3,4].

Os sistemas híbridos são formados por uma geração conjunta entre duas ou mais fontes e a complementaridade energética define-se como a capacidade de dois ou mais recursos se complementarem no tempo no mesmo local [5]. A produção eólica-fotovoltaica tem como objetivo o melhor aproveitamento tanto dos recursos climáticos disponíveis no local quanto da utilização do sistema de transmissão/distribuição, uma vez que a capacidade ociosa produzida pela fonte eólica pode ser reduzida pelo potencial fotovoltaico durante o dia. Para essa junção, a depender da configuração adotada, torna-se necessário a análise de perdas de energia devido a capacidade de escoamento de determinada rede elétrica, ou seja, o desligamento de uma das usinas quando a produção atingir a suportabilidade máxima no ponto de conexão. Segundo estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), deve-se levar em conta alguns parâmetros climáticos locais e a forma do dimensionamento de cada usina para análise de viabilidade da complementaridade na tentativa de não generalizar possíveis benefícios com a utilização e contratação da rede [5,6].

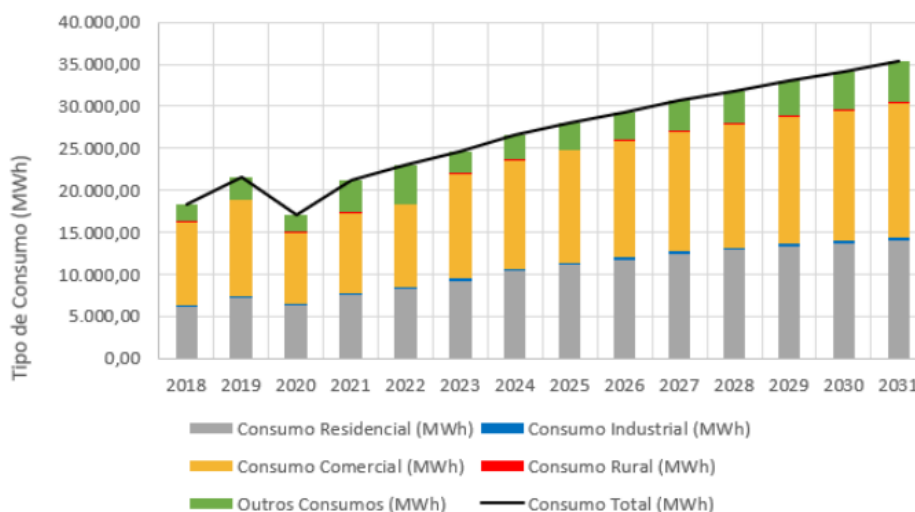
A geração renovável híbrida vem sendo uma alternativa para predominância de fontes limpas no atendimento da demanda dos sistemas isolados, ocasionando a diminuição ou substituição da fonte fóssil, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e possivelmente o custo total de geração [1]. Os sistemas isolados no Brasil são considerados os locais com produção e transmissão de energia elétrica que não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional - SIN [7], por razões técnicas ou econômicas¹. Esses sistemas estão concentrados majoritariamente na região norte, tendo como fonte de alimentação principal os geradores a diesel [8]. Conforme o decreto n. 7.246/2010 e pela Portaria MME n. 67/2018, às distribuidoras no atendimento dos sistemas isolados devem encaminhar a EPE anualmente um projeto de planejamento visando identificar a necessidade de expansão da oferta

¹ BRASIL. Decreto nº 7.246. [S.l.]: [s.n.], 2010.

de geração ou substituição das unidades geradoras de modo a proporcionar o suprimento de energia elétrica a esses mercados [7,9,8].

O arquipélago de Fernando de Noronha compõe tais mercados, sendo um Patrimônio Natural Mundial da Humanidade situado no litoral do Nordeste, sob a administração do estado de Pernambuco [10]. Atualmente um grupo de geradores a diesel garantem o fornecimento de energia da ilha com capacidade de 4.978 kW [11,12]. O crescimento da carga ao longo dos próximos anos deve-se aos novos empreendimentos comerciais, à ampliação do sistema de dessalinização e à Lei N° 16.810, de 7 de janeiro de 2020 [8], que proíbe, a partir de agosto de 2023, a entrada de veículos que emitem dióxido de carbono, permitindo que a mobilidade terrestre seja realizada totalmente por carros elétricos a partir de 2030 [10]. Nesse contexto, há uma previsão no aumento da carga de acordo com a Figura 1 [11].

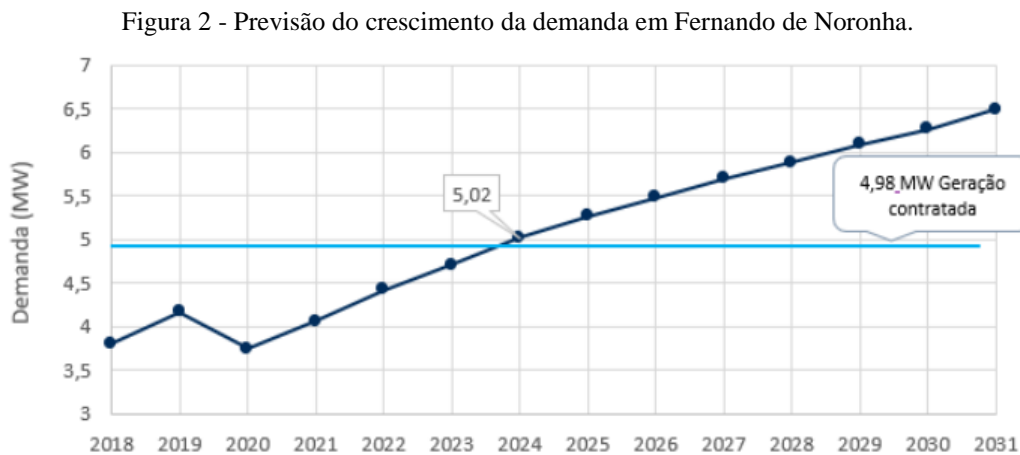
Figura 1 - Previsão do aumento da carga ao longo dos próximos anos em Fernando de Noronha



Fonte: EPE (2021).

O aumento da capacidade da geração termelétrica para suprir a crescente demanda, conforme a Figura 2 [13], diverge dos termos exigidos para neutralizar a emissão de Gases de Efeito Estufa [10]. Além disso, o elevado custo com a Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) e as dificuldades no fornecimento de combustíveis em época de estiagem corrobora a importância do estudo de novas tecnologias para auxiliar a geração de energia que possibilitem a diminuição do consumo de diesel [8].

Em consonância, o exposto na nota técnica da EPE “Fernando de Noronha - Identificação das Alternativas de Suprimento - Avaliação de médio e longo prazo” reforça a necessidade de buscar novas alternativas energéticas para o arquipélago, a fim de evitar a ampliação do parque gerador a óleo diesel, bem como as restrições e barreiras encontradas para implementá-las [11].



Fonte: EPE (2021).

Com base nas afirmações apresentadas, este trabalho analisa uma alternativa de geração renovável para o suprimento de energia da ilha, com a junção das fontes eólicas e solar fotovoltaica. O estudo busca a predominância dessas fontes renováveis para fornecimento de energia tendo como relevância a diminuição da geração termelétrica. A análise tem como premissa a condição da liberação ambiental para implementação do sistema híbrido eólico-fotovoltaico, fator primordial para conservação da ilha.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Analisar o comportamento híbrido das fontes renováveis eólica e solar para diminuição da geração térmica em Fernando de Noronha.

1.1.2 Específicos

- Avaliar e comparar os dados disponíveis dos recursos climáticos por satélite, medição e estudos;
- Analisar a complementaridade dos recursos climáticos e energéticos no local;
- Dimensionar um sistema híbrido no *Homer Pro* que seja o mais viável tecnicamente para sua implementação;
- Avaliar a melhor forma do dimensionamento em relação às configurações: potência, área, tipos de aerogeradores e possíveis cenários para implementação;
- Elaborar estudo de caso.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma: introdução, referencial teórico, desenvolvimento e conclusão. A introdução, capítulo 1, busca uma contextualização em torno do tema, indicando os possíveis pontos a serem desenvolvidos, bem como a sua relevância. O capítulo 2, referencial teórico, trata da teoria necessária para o desenvolvimento do estudo. Este capítulo reúne definições do sistema eólico, fotovoltaico, híbrido e informações dos dados climáticos local. Tais definições são aplicadas às características de Fernando de Noronha, sendo possível identificar os melhores cenários para implementação das usinas híbridas. O capítulo 3, desenvolvimento, discute uma metodologia para avaliação do sistema híbrido eólico-fotovoltaico a partir dos dados climáticos, consumo elétrico e estudos de caso. Através de simulações nos *softwares SAM* e *HOMER* são apresentados os resultados da complementariedade energética e um modelo de geração capaz de auxiliar na alimentação do consumo elétrico. Por fim, o capítulo 4 apresenta a conclusão do trabalho e propõe estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No mundo, a inserção de fontes renováveis para alimentação das áreas isoladas vem aumentando. Esse crescimento apresenta algumas vantagens, como a redução da poluição e dos transportes dos combustíveis a longo prazo. Dependendo do tipo de geração, a junção dessas tecnologias renováveis tende a ser uma alternativa para suprir a demanda nesses locais [14]. O modelo híbrido composto pelas usinas eólica e fotovoltaica torna-se uma opção favorável, com auxílio de armazenamento, devido a possibilidade do comportamento complementar ao longo do tempo.

Fernando de Noronha, por ser um local distante da costa Nordeste, cerca de 400 *km*, apresenta dificuldade para conexão com o Sistema Interligado Nacional-SIN. Logo, a maior parte do fornecimento resulta da geração termelétrica. A partir das condições impostas para redução de gases poluentes e da previsão no aumento da demanda ao longo dos próximos anos, deve-se introduzir novas alternativas energéticas renováveis para sua alimentação [13].

2.1 Características energéticas de Fernando de Noronha

Atualmente o consumo elétrico na ilha é predominante alimentado pela geração a óleo diesel, através da usina termelétrica Tubarão, com capacidade de potência instalada de 4.978 *kW*, composta por unidades geradoras conforme a Tabela 1. Além dessas unidades, o parque termelétrico possui um sistema reserva com 2.293 *kW* visando a confiabilidade em caso de falhas dos geradores [13].

Tabela 1 – Unidades geradoras a diesel.

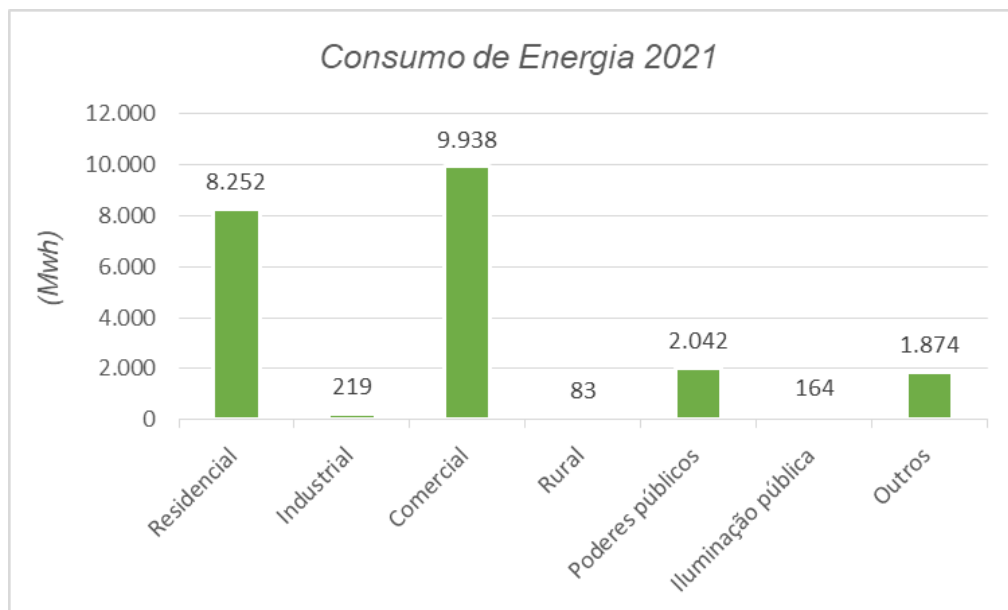
Unidade Geradora	Potência (kW)	Quantidade	Potência (kW) Total
UT1	1.286	3	3.858
UT2	1.120	1	1.120

Fonte: Adaptado [11].

Essa fonte de geração, junto aos carros a combustão, são responsáveis por cerca de 40% da emissão dos gases poluentes [10]. No momento, sistemas fotovoltaicos encontram-se em funcionamento, sendo Noronha I e Noronha II, as usinas de maior potência instalada com 400 *kWp* e 550 *kWp*, respectivamente. A primeira corresponde a cerca de 4,2% do consumo total da ilha, já a segunda equivale a 5,6% [15].

Tal sistema de geração alimenta o perfil consumidor da Figura 3, por meio de três redes de distribuição em 13,8 *kV*: 01F1,02F2 e 03F3. Os geradores a diesel fornecem potência no nível de 380 *V* que através de transformadores elevadores é convertida para o padrão dos alimentadores. A partir destes ramais são derivados os pontos de conexão dos consumidores, utilizando um conjunto de componentes elétricos, entre eles os transformadores, seccionadores, chaves fusíveis e sinalizadores [16]. O perfil do consumo da Figura 3 mostra que a classe comercial seguida da residencial representam a maior parte do consumo da ilha.²

Figura 3 - Perfil do consumo energético em Fernando de Noronha.



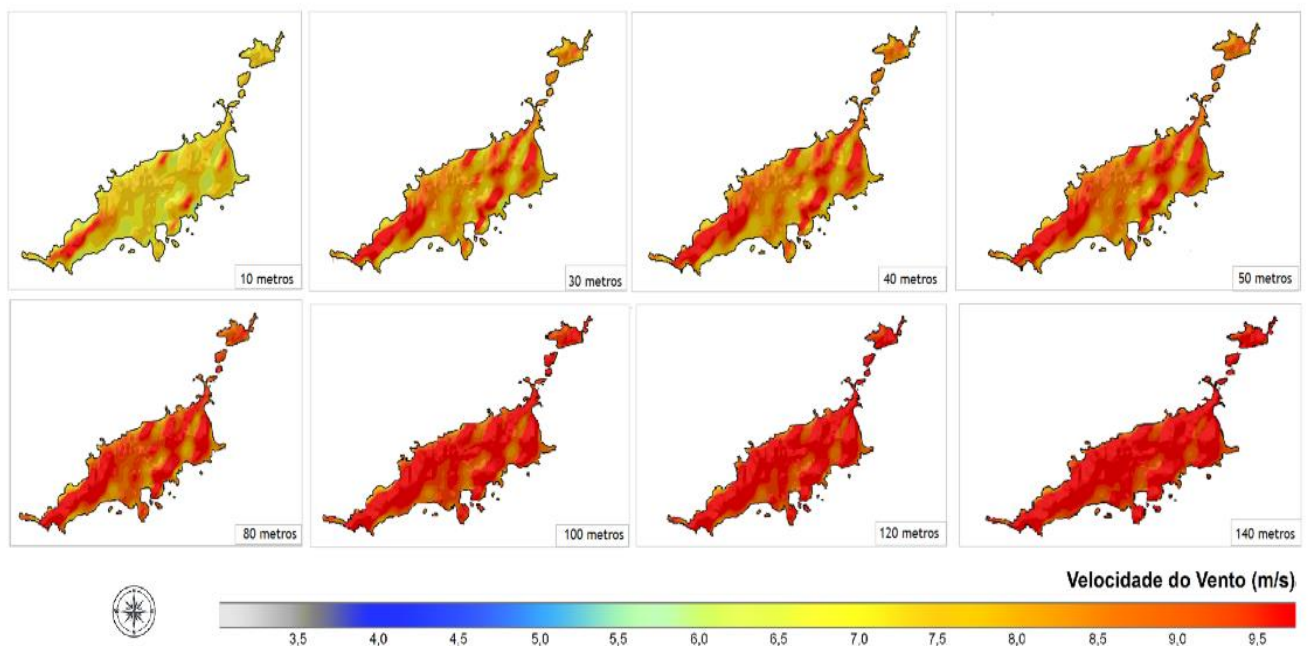
Fonte: Adaptado PDE (2022).

² Disponível em: <http://www.bde.pe.gov.br/>. Acessado 20 de outubro de 2022.

2.2 Recursos primários

Em relação aos recursos climáticos, os dados apontam um bom potencial na disponibilidade da radiação solar e velocidade do vento, grandezas fundamentais para implementação das fontes eólicas e solar fotovoltaica (FV). Segundo o Atlas Eólico e Solar de Pernambuco, Noronha tem maior frequência de ventos, principalmente alísios de sudeste, no quadrante sudeste da Rosas dos Ventos de Energia. A velocidade média anual varia em alguns pontos da ilha, conforme o mapa da Figura 4, com máximo de 5 m/s para alturas menores que 10 metros, podendo chegar até 9 m/s para alturas maiores que 100 metros, independentemente do local [17].

Figura 4 - Variação da velocidade média anual do vento no Arquipélago.

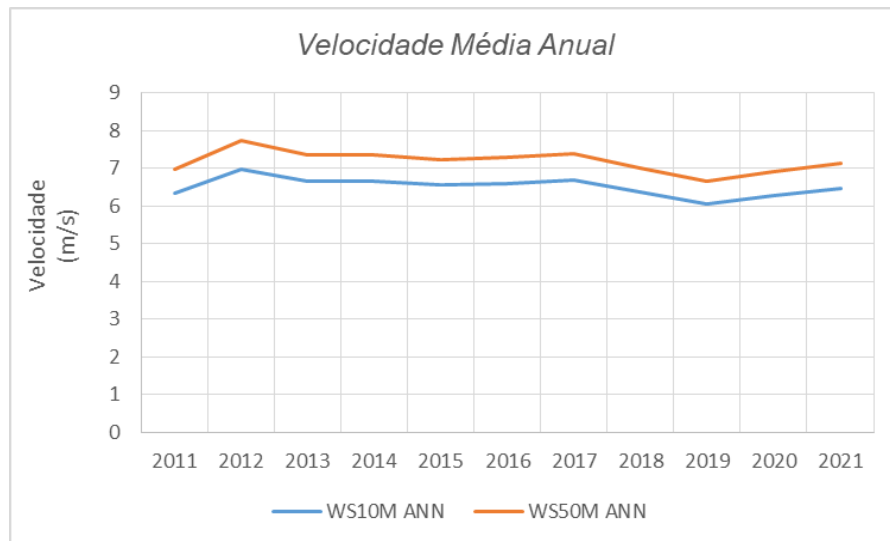


Fonte: Atlas Eólico e Solar de Pernambuco (2017).

Dados parecidos são encontrados pelo satélite da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), de acordo com a Figura 5, que mostra a velocidade média anual nos últimos dez anos para alturas de 10 e 50 metros, respectivamente³.

³ Disponível em: POWER | Data Access Viewer (nasa.gov). Acessado dia 20 de outubro de 2022.

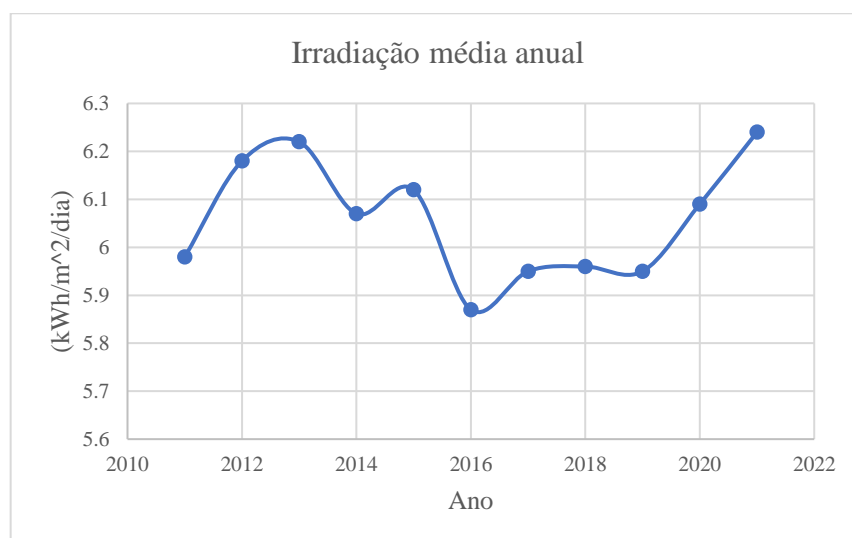
Figura 5 - Velocidade média anual do vento na base de dados da NASA para Fernando de Noronha.



Fonte: adaptado NASA (2022).

Quanto aos recursos de irradiação solar, os valores médios anuais estimados no Atlas Eólico e Solar de Pernambuco variam entre 6,13 a 6,2 $\frac{kWh}{m^2 dia}$, e de acordo com os dados da NASA, na Figura 6, apresentam potencial favorável para instalação da tecnologia Fotovoltaica.

Figura 6 - Irradiação média anual na base de dados da NASA.



Fonte: adaptado NASA (2022).

Noronha tem clima tropical, com a estação da seca no período de agosto a janeiro, e o inverno se estendendo de fevereiro a julho. A média anual da temperatura é de

aproximadamente 27°C, com pouca variação ao longo dos meses, não superando os 30°C de máxima nem 24°C de mínima [17].

2.3 Sistema solar fotovoltaico

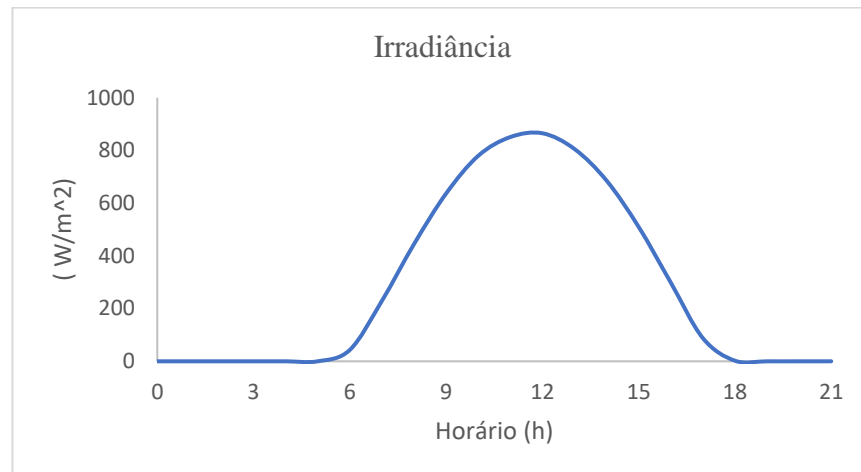
A geração fotovoltaica em locais remotos nacionais possui participação mínima comparada às termelétricas. Mesmo com as iniciativas para inserção de energia renovável, estima-se a contribuição de apenas 0,2% dessa tecnologia em 2023 na matriz elétrica de tal conjunto [8]. Apesar de ser uma fonte limpa, sua variabilidade e as limitações impostas para confiabilidade da rede elétrica, a torna dependente de fontes controláveis e/ou armazenamento com baterias para alimentação do consumo ao longo do tempo [18].

A energia solar necessita do sistema solar para produção, sendo de forma direta por meio do efeito Fotovoltaico. Esse efeito consiste na conversão direta da radiação eletromagnética emitida pelo sol em energia elétrica. A transformação ocorre através de uma célula formada por materiais semicondutores capaz de gerar uma tensão elétrica em seus terminais. Um conjunto de células são agrupadas para construção de módulos ou placas fotovoltaicas. A combinação entre as ligações série e/ou paralelo dos módulos permite que a geração tenha tensão e corrente adequada para a aplicação de cada sistema.

A radiação solar incidente na superfície da terra varia ao longo do dia, meses e estações, que dependendo do ângulo de incidência atinge valores máximos e mínimos. Esta grandeza é composta por raios solares que chegam em todas direções, sendo absorvidos, espalhados e refletidos por moléculas de ar, nuvens, poeira e vapor. A radiação direta corresponde aos raios que provêm diretamente da direção do sol. A difusa resulta dos raios que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera [19]. A soma destes componentes, juntamente com o coeficiente de reflexão do ambiente ao redor da superfície inclinada em relação a horizontal, forma a radiação global [20].

Para melhor captação da irradiação as placas são dispostas a inclinação e direção fixa ou tecnologia de monitoramento, variando o ângulo de inclinação e/ou a direção, de modo que aumente sua produção. Em um conjunto de módulos fixos, dependendo do local da instalação, mantém-se ao norte com inclinação aproximadamente igual a latitude do local [19]. A Figura 7 mostra a disponibilidade da irradiância média descendente de ondas curtas da superfície em Fernando de Noronha para o ano de 2021.

Figura 7 - Comportamento da irradiância média para ano de 2021 em Fernando de Noronha.



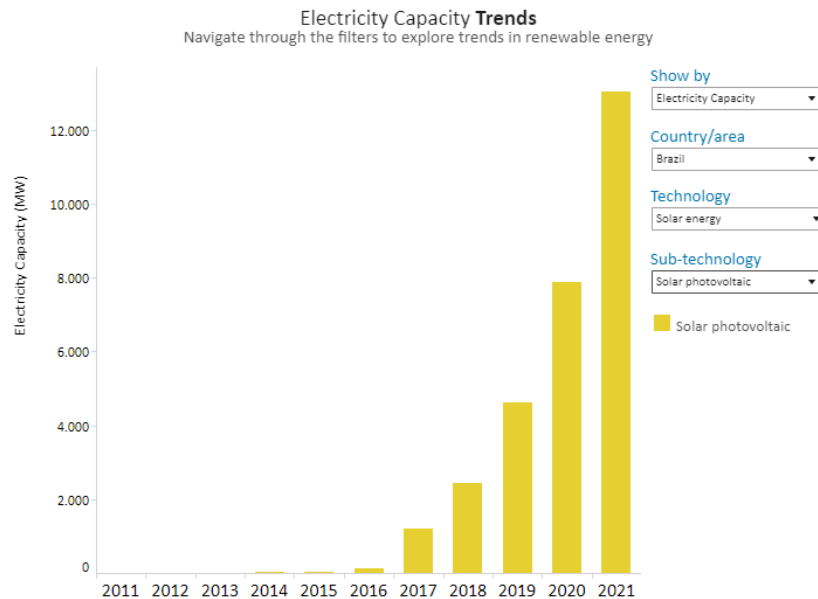
Fonte: adaptado NASA (2022).

A conexão com a rede, geração distribuída (GD) ou centralizada nos sistemas fotovoltaicos realiza-se por meio de inversores que recebem a energia em corrente contínua (CC), gerada pelos módulos, e a converte em um sinal alternado com características compatíveis à da rede elétrica, possibilitando a injeção da potência e/ou consumo no local da instalação. Além da conversão, o inversor tem um papel fundamental para a operação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs), sendo responsável pelo sincronismo, proteção e gerenciamento da conexão, bem como no controle para o funcionamento no ponto de máxima potência [21]. A máxima potência é o valor máximo que um módulo pode produzir sob condições específicas de radiação e temperatura. Tal valor depende do produto de tensão e corrente de potência máxima. Durante a operação das placas ao longo do dia essas grandezas variam, caracterizando na mudança deste ponto ao longo da curva característica $I - V$. Para melhor aproveitamento da geração solar alguns inversores utilizam a tecnologia de seguimento do ponto máximo de potência (SPMP), o qual tem por objetivo fazer com que o sistema forneça maior energia à rede [20].

A Figura 8 apresenta o aumento da capacidade de potência FV instalada no Brasil, ocorrendo um acelerado índice de inserção, principalmente nos últimos três anos. A parcela desse crescimento é mínima nas áreas isoladas comparado aos sistemas conectados no SIN. Para a ilha de Fernando de Noronha pode-se utilizar mais a fonte fotovoltaica, em uma pesquisa realizada recentemente obteve-se o potencial *onshore* disponível baseado nas residências e áreas sem restrições ambientais, a partir do sensoriamento por fotografias tiradas por um *drone*,

o autor calibrou os dados existentes de irradiação para identificar os valores ilustrados na Tabela 2 [22].

Figura 8 - Capacidade de potência FV instalada no Brasil.



Fonte: IRENA⁴.

Tabela 2 - Potencial FV *onshore* disponível em Fernando de Noronha.

Estrutura	Quantidade	Área (m ²)	Potencial FV (GWh/Ano)
Telhados	1.272	199.743	51,6
Áreas Abertas	26	239.603	67

Fonte: Salim (2021).

Como a ilha tem alta sensibilidade ambiental as áreas abertas disponíveis indicadas para o aproveitamento FV podem variar com o tempo, ou seja, vindo a ter restrições de uso futuramente [13]. Já a utilização dos telhados depende da adesão do consumidor e aprovação do ponto de conexão junto a concessionária responsável pela distribuição e fornecimento de energia no local.

⁴ Dados disponíveis em: Energia solar (irena.org). Acesso 29 de agosto de 2022.

2.3.1 Sistema fotovoltaico offshore e flutuante

A tecnologia FV *offshore* no Brasil possui limitações, no momento não existem instalações em funcionamento para essa modalidade. O país vem se adaptando com a FV flutuante, sendo implementada em barragens e lagos de água doce. Atualmente foram concedidos leilões sobre o espelho d'água das usinas hidrelétricas (UHE) de Sobradinho na Bahia, Porto Primavera em São Paulo e Balbina no Amazonas, entres outros projetos para Pesquisa e Desenvolvimento. A usina fotovoltaica flutuante (UFF) instalada na UHE Sobradinho encontra-se em operação desde 2019, inicialmente com capacidade de potência instalada de 1 MWp [23].

O relatório da EPE “Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050” avaliou o potencial solar *offshore* em áreas disponíveis e sem restrições ambientais, o resultado indicou alta capacidade de geração, principalmente na costa do Nordeste devido à elevada irradiação.

Além de minimizar as perdas por sombreamento, efeito muito importante quando se leva em conta o montante de potência nos projetos *onshore*, uma das principais vantagens na instalação está no possível aumento da eficiência dos módulos em função da temperatura, havendo uma tendência na diminuição desta grandeza com o resfriamento na água [24,25]. Em paralelo a isso, existem alguns obstáculos para projetos *Offshore*, como a duração da vida útil, por causa das grandes cargas de ventos, ondas e corrosão através da água salgada, microfissuras e desalinhamento dos módulos, falta de normas, orientações e regulamentos legais.

Os sistemas FV marinhos e flutuantes, diferente dos FVs no solo, necessitam de uma estrutura adicional com flutuadores, suporte e amarração. Os flutuadores são bases, que unido a estrutura de suporte, mantém a UFV flutuando, já a amarração são cabos e âncoras responsáveis pela sua fixação. Toda estrutura, incluindo as placas, encontram-se em fase de estudos e algumas modificações estão sendo introduzidas para adaptação ao ambiente e as condições extremas [26].

Esta tecnologia tem previsão de crescimento em países e ilhas com escassez de áreas como na Índia, China, entre outros [27]. No momento, no Brasil não existem padrões específicos para sua instalação, utilizando-se de normas de projetos em solos como orientação, necessitando para isso da liberação de órgãos ambientais [23]. Cabe destacar a análise dos impactos ambientais para avaliar a viabilidade de tal sistema. Com a implementação espera-se uma mudança na vida marinha em torno do mesmo e na ocupação do espaço influenciando em

outras atividades, como pesca e turismo. A viabilidade pode ter impactos positivos com a junção de outras fontes, eólica e das ondas, tendo melhor aproveitamento dos recursos naturais, estrutura da rede e equipamentos [28].

Ao decorrer deste estudo, a companhia Pernambucana de saneamento (Compesa) que responde pelo atendimento do Distrito de Fernando de Noronha, tendo em vista o crescimento comercial, ocasionando a ampliação do sistema de dessalinização e conseqüentemente o aumento da carga nos próximos anos, realizou recentemente, um estudo de viabilidade junto a Neoenergia para instalação de uma UFF. A usina será projetada no espelho d'água do Açude do Xaréu, ocupando uma área de aproximadamente $4.400 m^2$, com aproximadamente $630 kWp$ de potência instalada⁵.

2.4 Sistema eólico

Fernando de Noronha foi o primeiro local no Brasil a ser instalado uma turbina eólica em 1992, com potência de $75 kW$. No ano de 2001 a ilha contava com $300 kW$, a partir da instalação de um novo aerogerador, que alimentavam até 25% do consumo total na época. Após um raio atingir e destruir uma das pás e o gerador da torre de maior potência ($225 kW$), em 2009, a turbina foi desativada, sendo posteriormente desmontada. Com a modernização da usina Tubarão neste mesmo ano, o sistema elétrico passou a ser alimentado pela geração térmica [29].

Uma turbina eólica consegue extrair parte da energia cinética produzida pelo vento e convertê-la em energia elétrica. Isso por meio de uma estrutura eletromecânica composta por rotor, transmissão e caixa multiplicadora, gerador elétrico e mecanismo de controle. Tais componentes representam as seguintes características:

- O rotor transforma a energia cinética do vento em energia de rotação. Sua classificação depende da posição do eixo, podendo ser horizontal ou vertical;
- Transmissão e caixa multiplicadora: transmite a energia do eixo do rotor até o gerador. A caixa multiplicadora contém eixos, mancais e engrenagens de transmissão e acoplamento, que mantêm a velocidade de rotação equivalente à utilizada pelo gerador. Dependendo da tecnologia do aerogerador, o eixo é

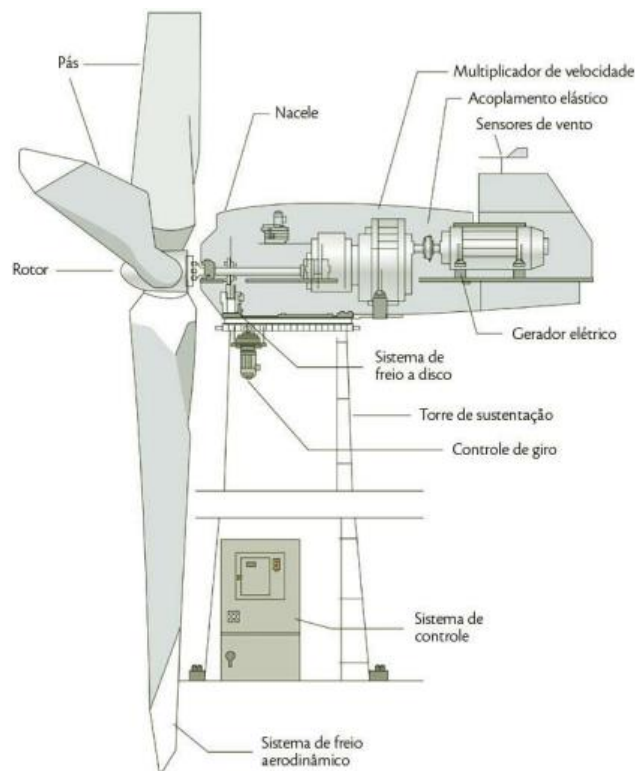
⁵ Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/sala-de-imprensa/noticias/Paginas/usina-solar-flutuante-ampliara-geracao-energia-renovavel-fernando-de-noronha.aspx>. Acesso 5 de março de 2023.

acoplado diretamente ao sistema de geração sem a necessidade da caixa multiplicadora;

- Mecanismo de controle: controla a direção do rotor, velocidade, carga, entre outros. Essas grandezas podem utilizar diferentes tipos de controle como mecânico, aerodinâmico e eletrônico;
- Gerador elétrico: converte a energia mecânica rotacional em elétrica por meio de uma máquina síncrona ou assíncrona.

Toda estrutura é sustentada por uma torre e acessórios que a mantém em uma altura determinada. A Figura 9 mostra os principais elementos do sistema eólico.

Figura 9 - Principais componentes da turbina eólica.



Fonte: Rodrigues (2011).

A quantidade de energia produzida pela fonte eólica depende do dimensionamento de alguns componentes e fatores como o diâmetro do rotor, dimensão do gerador, altura, rendimento do aerogerador e quantidade de vento que passa pelas pás [30].

O vento caracteriza-se por ser uma grandeza estocástica que varia de direção e velocidade ao longo do tempo, essa variação também pode sofrer influência no local da instalação devido aos obstáculos do terreno [31]. Para exploração do potencial eólico deve-se ter conhecimento do seu comportamento em uma determinada região, essa etapa é precedida pela medição anemométrica seguindo as normas e melhores práticas [32]. A velocidade pode ser estimada em função da altura através da equação (2.4.1), para tal, é necessário o valor da rugosidade do local e do comportamento do vento em um certo ponto [31].

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\ln\left(\frac{h_1}{z}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{z}\right)} \quad (2.4.1)$$

Em que:

h_1 = altura do solo no ponto 1 [m];

h_2 = altura do solo no ponto 2 [m];

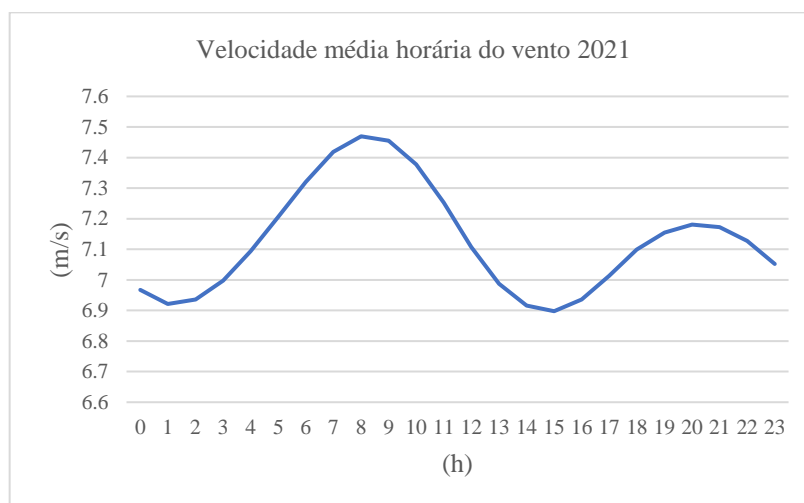
v_1 = velocidade do vento no ponto 1 $\left[\frac{m}{s}\right]$;

v_2 = velocidade do vento no ponto 2 $\left[\frac{m}{s}\right]$;

z = comprimento de rugosidade no local [m].

A Figura 10 mostra o comportamento da velocidade média horária do vento para altura 50 m em Noronha ao longo de 2021.

Figura 10 - Velocidade média horária do vento para o ano de 2021 em Noronha.



Fonte: adaptado NASA (2022).

O Brasil atualmente ocupa a sexta posição no *ranking* global de capacidade instalada *onshore* com 22 *GW*, resultante de 812 parques com mais de 9200 aerogeradores em operação, distribuídos em 12 estados⁶. Essa potência corresponde a 12% da capacidade total da matriz elétrica, sendo a tecnologia com maior crescimento em 2021, representando 59,1% na expansão da geração de todas as fontes [33].

2.4.1 Avaliação onshore de grande e pequeno porte para Fernando de Noronha

A instalação de uma turbina *onshore* de grande porte na ilha não é recomendado devido às características do local e das restrições ambientais. Levando-se em consideração os parâmetros de altitude, declividade, faixa de proteção ambiental e afastamento urbano, o Atlas solar e eólico de Pernambuco em seu estudo indica a não viabilidade deste tipo de tecnologia. Além das condições e parâmetros indicados, a EPE reforça as dificuldades encontradas em relação a falta de estrutura portuária para o transporte e montagem de um aerogerador de grande porte, e que a estimativa da área num parque eólico varia com o dimensionamento da turbina, modelo do parque e das distâncias necessárias para o funcionamento das máquinas. Destaca-se também a importância da distância para os centros urbanos com descarte das áreas de preservação ambiental.

A geração distribuída, com aerogeradores de pequena potência, pode ser uma alternativa favorável para Fernando de Noronha quanto a estrutura e coeficiente de área, nesse caso, depende da decisão do consumidor para sua adesão e de outros fatores como ruídos e impacto visual. No entanto, além das restrições ambientais, a geração eólica de baixa potência no Brasil é pouco praticada, existe a fabricação de alguns modelos que de acordo com a potência nominal são instalados em torres ou nos telhados das residências [13]. Considera-se turbinas de grande porte as que possuem potência nominal superior a 1 *MW*⁷.

⁶ Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso 15 de setembro de 2022.

⁷ Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/582/7/06%20-%20Energia%20E%20Elica%283%29.pdf>. Acesso 17 de setembro de 2022.

2.4.2 Sistema eólico offshore

O setor eólico *offshore* desenvolveu-se com base na experiência coletada das indústrias relacionadas. No início dos anos 2000, o Reino Unido adaptou as então maiores turbinas *onshore* (2MW) para o mar. As embarcações para instalação foram trazidas da indústria petrolífera *offshore*, os primeiros projetos tendiam a ser muito caros e demoravam mais do que o esperado para construção, diante dos requisitos logísticos relativamente complexos de planejamento e execução no oceano.

Com passar do tempo, a energia eólica flutuante evoluiu para uma tecnologia especializada. As turbinas *offshore* estão sendo projetadas especificamente para reduzir os requisitos de manutenção devido ao custo relativamente alto do acesso marítimo. Ao mesmo tempo, tais parques estão sujeitos a menos limitações enfrentadas pelo vento *onshore*, incluindo pressões no uso de espaço, preocupações com vistas e restrições de transporte/infraestrutura, isso possibilita no aumento das peças, ocasionando em altos fatores de capacidade. Acompanhando a evolução da captação de energia, a inovação indica um avanço na instalação em áreas mais afastadas da costa, conseqüentemente de maiores profundidades.

Essa tecnologia deve ser explorada a partir da zona econômica exclusiva (ZEE), por meio de uma estrutura de suporte fixa ou flutuante para sustentação da turbina. Considera-se que as fundações fixas são adequadas para profundidade com menos de 50 m e velocidade média do vento superior a 7 m/s. As flutuantes são viáveis tecnicamente de 50 até 1000 m de profundidade [34]. Existem vários tipos de fundações que podem ser escolhidas segundo as condições do local (profundidade e solo), das características da turbina e experiência da cadeia de suprimentos.

Os aerogeradores são conectados através de cabos isolados, formando uma rede coletora com vários arranjos de circuitos, cuja configuração adotada visa a confiabilidade e diminuição dos custos de implantação. Tal rede conecta as turbinas ao sistema de transmissão/distribuição utilizando uma ou mais subestação *offshore* para distância considerável do litoral.

A tecnologia empregada nos parques depende da distância em relação à costa, podendo elevar os custos com cabeamento e estruturas. Há duas formas de transmissão da potência gerada: corrente alternada (CA) e CC. Esta última normalmente é utilizada para distâncias maiores que 100 km, acrescentando-se a subestação uma conversora para retificação da corrente ou tensão. A transmissão CC apresenta as seguintes vantagens: redução das perdas por efeito

joule; menor número dos condutores; controle do fluxo de potência; operação assíncrona com o sistema em terra que limita a propagação de perturbações e ausência de fenômenos de ressonância na conexão dos parques.

A fonte eólica *offshore* tem se tornado uma alternativa para expansão da geração renovável no mundo por preocupações ambientais e avanços tecnológicos, explorando melhores ventos, onde são mais constantes e de maiores velocidades [35], sua capacidade instalada ultrapassou 50 *GVA*, liderado por China, Reino Unido e Alemanha⁸. Com o crescimento internacional, criou-se a expectativa de inserção na matriz energética nacional, atento a isso, os órgãos responsáveis passaram a pesquisar o potencial e entender suas características na tentativa de buscar soluções para o seu desenvolvimento [35]. No momento existem empreendimentos em fase de licenciamento ambiental, com a flexibilização a partir do decreto N° 10.946⁹, acredita-se na implementação nos próximos anos¹⁰.

2.4.2.1 Avaliação da tecnologia eólica offshore para Fernando de Noronha

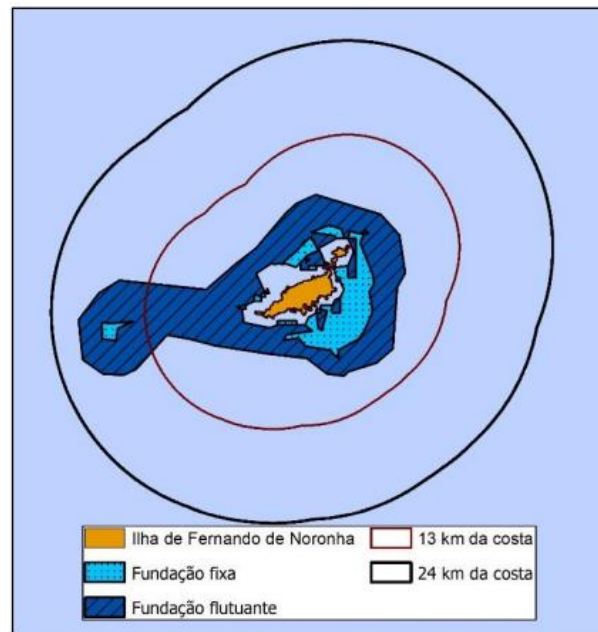
Fernando de Noronha tem alto potencial eólico *offshore*, estima-se inicialmente uma potência acima de 1 *GW*. Este valor corresponde à altura de 100 m, dividido conforme a classificação estrutural e região exploratória. A Figura 11 mostra os locais propícios para instalação, segundo a EPE, identificou-se um potencial de 204,4 *MW* com área de 68,14 *km*² para fundações fixas e de 983,2 *MW* em 327,75 *km*² para fundações flutuantes.

⁸ Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/582/7/06%20-%20Energia%20E%20Elica%283%29.pdf>. Acesso 17 de setembro de 2022.

⁹ “Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para a geração de energia elétrica a partir de empreendimentos offshore”

¹⁰ Disponível em: <https://abeeolica.org.br/nota-para-imprensa-sobre-decreto-de-eolicas-offshore/>. Acesso 25 de setembro de 2022.

Figura 11 - Levantamento do potencial *offshore* de Noronha.



Fonte: EPE (2021).

As estruturas do parque eólico *offshore* podem ser pré-montadas em locais distintos e posteriormente transportadas até o local da instalação. Neste caso, existe a possibilidade de usar os portos situados em outras costas, minimizando o problema portuário para grandes embarcações [13].

Para um menor número de turbinas, suas características técnicas melhor viabiliza o licenciamento Ambiental [35]. Noronha atende esse critério por ter consumo médio inferior à potência dos aerogeradores *offshore* atuais, necessitando a implementação de apenas uma turbina.

Os impactos Ambientais, por ser um local de alta sensibilidade, tende a dificultar tal empreendimento. Alguns dos impactos podem ser contornados, o visual, por exemplo, a partir de 16 km da costa torna-se quase imperceptível [13].

2.5 Sistema híbrido eólico-fotovoltaico

Com o avanço da geração renovável no cenário nacional há interesse dos agentes empreendedores no desenvolvimento de projetos que utilizem o modelo híbrido eólico-FV, tendo como premissa o melhor aproveitamento dos recursos primários e da rede de

transmissão/distribuição através da complementariedade energética. Tal combinação pode apresentar essa vantagem diante da variabilidade energética ao longo do tempo. Nesse sentido, a EPE propôs uma metodologia adequada para análise da complementariedade visando a otimização do sistema elétrico em um ponto de conexão a partir de simulações em locais com alto potencial de produção.

A análise dos recursos primários e o dimensionamento das fontes são primordiais para previsão do comportamento do sistema, dependendo da metodologia adotada pode-se chegar a resultados indesejados. Tentando encontrar a melhor forma possível a ser utilizada para otimização da geração a ser contratada, a nota técnica nº EPE-DEE-NT-025/2017-r0, adotou medições da velocidade do vento e irradiação num intervalo de 10 minutos, com comparações horárias e mensais, variando a potência das fontes e o diâmetro do rotor, sendo este considerado o responsável pela maior inserção de energia [5].

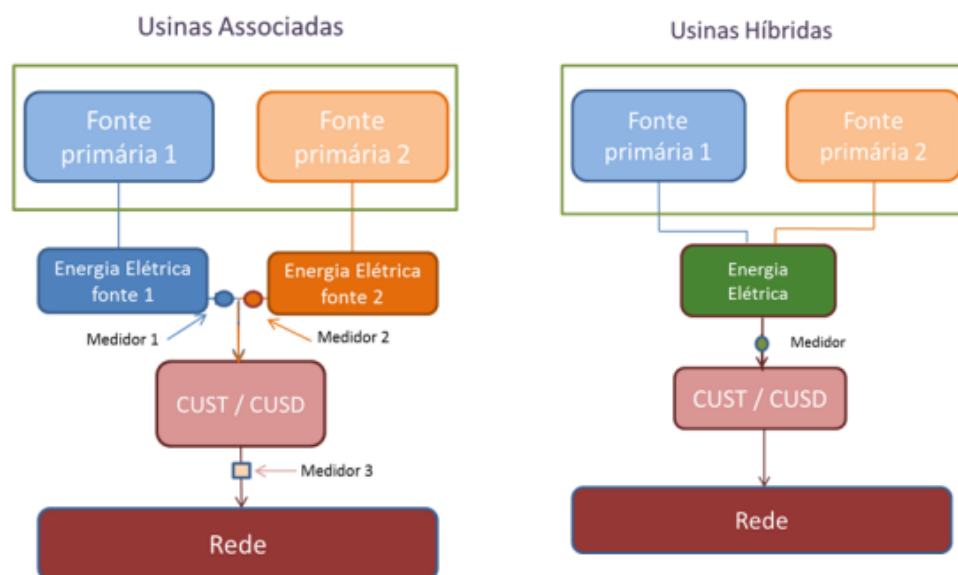
A segunda nota técnica da EPE (Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento) classifica as chamadas “usinas híbridas” como aquelas em que as distintas fontes se combinam ainda no processo de produção, compartilhando os mesmos equipamentos da geração. Para as demais configurações, considera-se os seguintes termos:

- Usinas Associadas: duas ou mais fontes distintas com características de geração complementar, situadas próximas ou que divide a mesma área de instalação, compartilhando fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e acesso à rede básica ou de distribuição;
- Usinas Adjacentes: utilizam instalações de interesse restrito, cada usina conecta-se à rede com potência contratual compatível à nominal instalada, sendo construídas em localidades muito próximas entre si ou que compartilhe o mesmo terreno.
- Potifólio comerciais: sua composição é de natureza comercial-contratual de diferentes fontes com recursos complementares que não envolve qualquer proximidade física ou compartilhamento de equipamentos [6].

A Figura 12 apresenta as configurações das usinas associadas e híbridas para conexão com a rede. No ponto de conexão deve-se realizar a análise da complementariedade visando não ultrapassar o limite de potência contratada e/ou permitida. Isso ocorre quando uma das usinas corresponde a capacidade máxima contratada [5], nesse tipo de configuração, chamado

de usinas associadas, a FV complementa a eólica, que dependendo da potência instalada e do comportamento da produção conjunta pode-se atingir os limites suportados da rede (curtailment¹¹). Esse efeito é desconsiderado para os outros tipos de configurações, no caso das usinas híbridas os conversores dos aerogeradores são responsáveis pela conversão da energia, dispensando o uso dos inversores fotovoltaicos, uma vez que a combinação das fontes ocorre antes da etapa de conversão, não ocasionando perdas por ultrapassagem do limite permitido, mas um sub-aproveitamento quando a disponibilidade dos recursos combinados superar a capacidade de produção de energia elétrica [6].

Figura 12 - Configurações adotadas para conexão com a rede.



Fonte: Adaptado EPE (2018).

Apesar de tal metodologia ser proposta recentemente (2017), o Brasil possui um parque eólico-FV em operação desde 2015, situado na cidade de Tacaratu (PE), com potência inicialmente instalada em aproximadamente 90 MW¹².

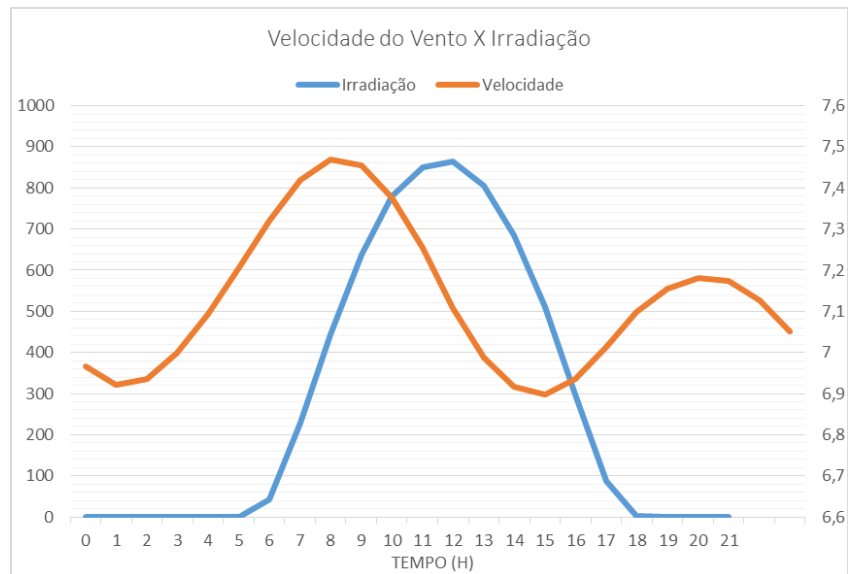
¹¹ O curtailment representa o montante de energia gerada e não aproveitada por limitação do sistema elétrico para o seu escoamento.

¹² Disponível em:

https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/19210/Marcio_Trannin_Fontes_Renov%C3%A1veis.pdf. Acesso em 26 de fevereiro de 2023

A complementariedade energética varia em relação ao local da instalação do parque. A geração pode ter comportamento diferente para cidades da mesma região [5]. Os recursos de irradiação e velocidade do vento em Fernando de Noronha apresenta perfil complementar, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Perfil complementar dos recursos primários em Fernando de Noronha.



Fonte: adaptado NASA (2022).

A Resolução Normativa (REN) nº 954, de 30 de novembro de 2021, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu tratamento regulatório para implementação de usinas híbridas e associadas¹³. Recentemente instaurou-se uma consulta pública para definir os módulos das Regras de Comercialização. Tais modelos podem ser adotados no início de 2023¹⁴.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A metodologia consiste em uma análise técnica do comportamento do sistema híbrido eólico-FV através de simulações horárias e mensais que possa atender o aumento da demanda elétrica na ilha. A análise visa a não expansão do sistema térmico ou substituição do mesmo, dependendo das condições do uso de armazenamento, bem como a avaliação dos possíveis

¹³ Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-954-de-30-de-novembro-de-2021-364715864>. Acesso em 18 de outubro de 2022.

¹⁴ Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/ccee-apresenta-proposta-para-implementacao-mercado-logica-das-usinas-hibridas-no-brasil>. Acesso em 18 de outubro de 2022.

cenários para sua instalação. Para isso, foram avaliadas duas possibilidades: a potência do aerogerador menor que 50% da capacidade térmica instalada utilizando um estudo de caso composto pela UFF com previsão da implementação e a potência do aerogerador aproximadamente à da capacidade térmica instalada para uma planta *offshore* com auxílio de baterias.

3.1 Base de dados

Diante da dificuldade na disponibilidade de medições no local, os recursos climáticos foram extraídos via satélite e de bancos de dados com valores horários. Para as grandezas da fonte solar pode-se usar os dados da *Climate.OneBuilding.org* e do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) devido às características de entrada do *software* SAM (*System Advisor Model*). Estas bases de dados possuem um formato de arquivo com valores de irradiação horizontal global, direta, difusa, temperatura ambiente e entre outros, cuja junção de ao menos dois tipos dessas irradiações mais alguns parâmetros são necessários para a montagem do formato de entrada que permite o dimensionamento da UFV.

No caso da usina eólica, utilizou a base de dados via satélite da NASA, cujo site possui acesso a parâmetros suficientes para simulação, como velocidade e direção do vento, pressão e temperatura. Os valores encontrados são referentes às alturas de 10 e 50 metros, não sendo recomendável para os parques *offshore*. Como um dos objetivos deste trabalho é a simulação no mar, através da equação (2.4.1) obteve a velocidade do vento em 100 metros, mantendo os valores das demais grandezas idênticas às de 50 metros, por meio da rugosidade mínima do mar calmo (0,0002 m).

3.2 Análise do *curtailment* para usinas associadas

As simulações para o sistema associado foram realizadas no *software* SAM (*System Advisor Model*) desenvolvido pelo NREL com recursos do departamento de energia dos Estados Unidos. Este *software* modela vários tipos de sistemas de energia renovável entre eles o solar, eólico e armazenamento. O arquivo de entrada dos recursos primários para o dimensionamento dos sistemas renováveis deve ser montado a partir de um formato aceitável composto por medidas próprias ou de base de dados disponíveis com valores em horas ou minutos.

Os arquivos foram modelados de acordo com APÊNDICE A e APÊNDICE B. Utilizou-se a extensão .CV para o formato dos parâmetros da fonte FV e .SRW para o desempenho da energia eólica. O .SRW armazena quatro tipos de dados para cada altura: velocidade e direção do vento, pressão e temperatura. O mesmo foi construído utilizando três níveis: 10, 50 e 100 metros.

O estudo tentou seguir a metodologia da EPE para análise do *curtailment*, não sendo totalmente possível devido a indisponibilidade das medições dos dados primários no local. A análise do comportamento das usinas associadas se desenvolveu com as seguintes equivalências de potência:

1. Turbina com 2 MW e UFF;
2. Turbina com 5 MW considerando uma UFV correspondente a 50% desta potência;
3. Turbina com 5 MW e UFF.

Cada opção foi avaliada usando dois diâmetros diferentes para a mesma turbina.

3.3 Análise do sistema híbrido

Para análise do sistema híbrido utilizou o *software HOMER* com alguns dados primários já mencionados. O *HOMER* faz uma avaliação técnico-econômica, sendo escolhido principalmente em locais isolados, visando a melhor tomada de decisão energética. A avaliação econômica não foi objetivo deste estudo, servindo apenas como modelo do sistema. O arquivo dos recursos primários renováveis foi modelado com a velocidade do vento em 100 m e a irradiação horizontal global convertida para $\frac{kWh}{m^2 dia}$. Tais recursos foram importados para um arquivo de texto a partir do APÊNDICE A e APÊNDICE B.

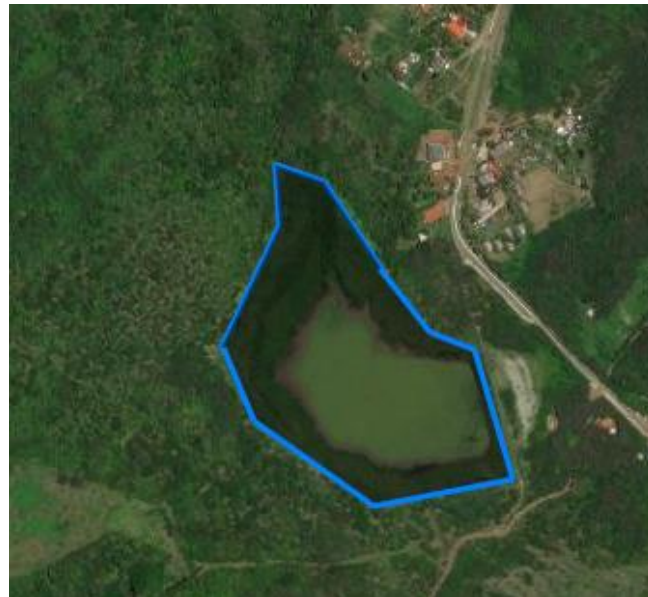
3.3.1 Estudo de caso Compesa

A classe de poderes públicos é responsável pelo terceiro maior consumo de energia elétrica da ilha, como ilustra a Figura 3. Aproveitando o novo empreendimento previsto para

implementação futura da Compesa e Neoenergia, foi dimensionada uma UFF com potência semelhante para análise da geração eólica-FV no local.

O Açude do Xaréu abastece 60% da ilha, complementado pela dessalinização da água do mar¹⁵. A Figura 14 mostra uma vista superior via satélite do reservatório.

Figura 14 - Vista superior via satélite NASA do açude do Xaréu.



Fonte: Satélite NASA.

No próprio *site* da NASA estima-se a área que o mesmo estar inserido, sob a curva azul, cerca de $80.000 m^2$ ou no espaço verde claro $30.000 m^2$, onde encontra-se o nível da água na figura. A planta UFF deve ser instalada num ponto estratégico de modo a permanecer sobre o espelho d'água em períodos de escassez.

Tomando como base o valor da potência indicado no tópico 2.3.1 uma possível configuração para a UFF encontra-se na Tabela 3. A quantidade de módulos obtém-se entre a razão da potência instalada e a nominal da placa.

O inversor pode operar numa faixa de potência superior à sua capacidade nominal, em alguns equipamentos esse limite chega a 50%, o qual é chamado de sobredimensionamento.

¹⁵ Disponível em: <https://servicos.compesa.com.br/acude-xareu-responsavel-pelo-abastecimento-de-60-de-fernando-de-noronha-esta-vertendo/>. Acesso 5 de março de 2023.

Esse fator é determinado da divisão da potência CC instalada pela soma da potência CA dos inversores. Para a configuração adotada (Tabela 3) tal relação representa 5%.

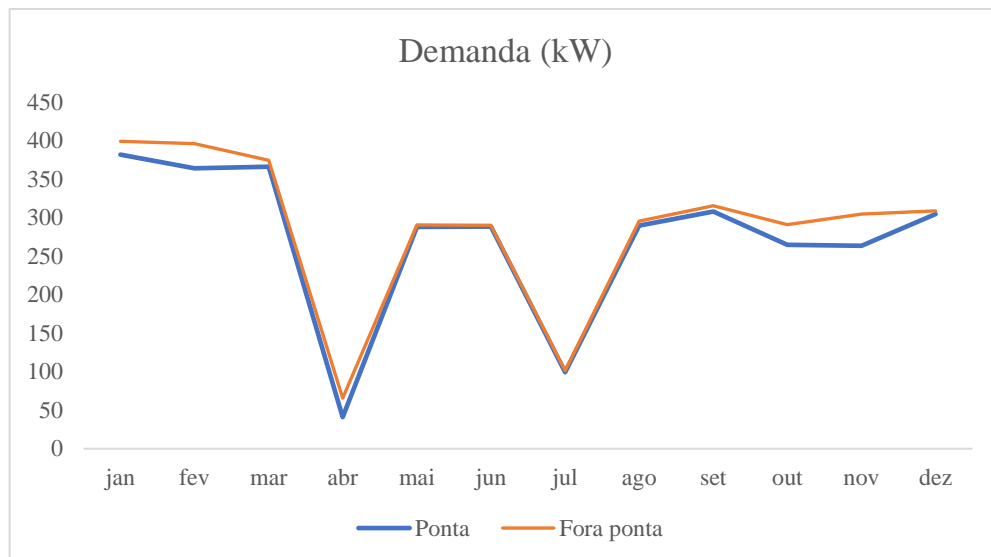
Tabela 3 - Possível configuração para UFF.

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA	QUANTIDADE
MÓDULO	500Wp	1260
INVERSOR	120kW	5

Fonte: próprio autor.

A compesa segue o aumento da carga para manter a prestação de serviços ao Distrito de Fernando de Noronha, entre as unidades consumidoras destacam-se a elevatória do desalinizador e Boldró, cuja demanda representa a maior quantidade de energia por hora. A Figura 15 mostra comportamento da soma da demanda desses consumidores ao longo de 2022.

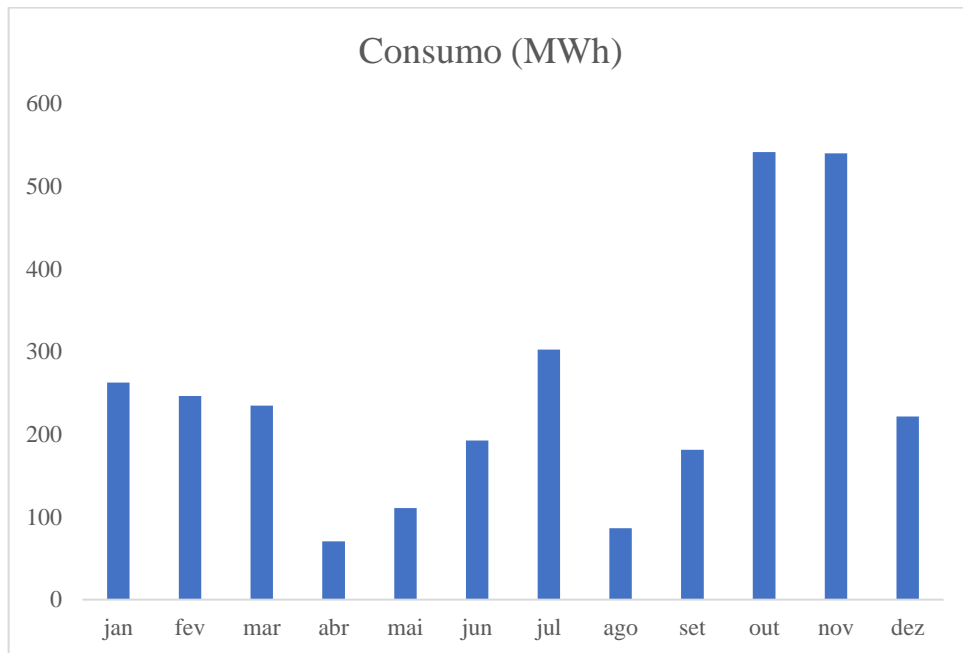
Figura 15 - Demanda das maiores unidades consumidoras da Compesa em Fernando de Noronha.



Fonte: adaptado compesa (2022).

Essa demanda compõe o consumo total em *kWh* da companhia correspondente a Figura 16.

Figura 16 - Consumo de todas as unidades da Compesa em Noronha no ano de 2022.



Fonte: adaptado Compesa (2022).

3.3.1.1 Dimensionamento da UFF no SAM

A UFF foi dimensionada no SAM usando a opção *PVWatts* não financeiro, o qual obtém o comportamento FV sem a necessidade de dados comerciais. Este modelo retorna o desempenho energético produzido pelas placas em CA a partir dos recursos de entrada e da configuração do sistema. O arquivo do APÊNDICE A apresenta uma parte dos recursos primários de entrada. Ao inseri-lo na interface do *software*, segue com a configuração dos parâmetros: capacidade de potência instalada CC, tipo do módulo, relação CC para CA, eficiência do inversor, tipo de arranjo, orientação, inclinação, taxa de cobertura do solo e perdas internas. A Figura 17 ilustra os valores adotados no dimensionamento da UFF. Observa-se que há três campos para indicação dos dados: parâmetros do sistema, orientação e inclinação, e perdas. O primeiro relaciona a potência do sistema CC e CA através do fator de sobredimensionamento do inversor. Ao inserir a potência CC das placas e o valor do fator, o *software* retorna à potência equivalente em CA. Para a eficiência da usina considerou os inversores correspondente 99% e módulo do tipo *premium* (21%).

Figura 17 - Configuração da usina UFF no SAM.

System Parameters

System nameplate capacity kWdc

Module type

DC to AC ratio

Rated inverter size kWac

Inverter efficiency %

-Area Estimate for Land Area Calculations

Estimated total module area m²

Orientation and Tracking

Azimuth N = 0
W 270 E 90 S 180

Tilt 90° Vert. 0° Horiz.

Array type

Tilt degrees

Azimuth degrees

Ground coverage ratio

System Losses

System losses account for performance losses you would expect in a real system that are not explicitly calculated by PVWatts.

Specify total system loss Total loss %

-Specify System Loss Categories

Soiling <input type="text" value="1"/> %	Connections <input type="text" value="0.5"/> %
Shading <input type="text" value="0"/> %	Light-induced degradation <input type="text" value="0.5"/> %
Snow <input type="text" value="0"/> %	Nameplate <input type="text" value="1"/> %
Mismatch <input type="text" value="0"/> %	Age <input type="text" value="0"/> %
Wiring <input type="text" value="3"/> %	Availability <input type="text" value="0"/> %
Total system losses <input type="text" value="5.88"/> %	

Ativar o V

Fonte: próprio autor.

No segundo campo considerou o tipo de arranjo em solo aberto com inclinação de 10 graus voltado para o norte. A distribuição dos módulos organizados em fileiras inclinadas deve manter um distanciamento mínimo para que uma placa não interfira na eficiência da seguinte por sombreamento. Além disso, um distanciamento considerável favorece a manutenção dos módulos. Essa distribuição é modelada no SAM através da taxa de ocupação do solo (*Ground coverage ratio*), a partir desse dado o software estima as perdas por sombreamento e área de ocupação. O valor da taxa da Figura 17 foi ajustada de modo a obter aproximadamente a área indicada do tópico 2.3.1.

No último campo, o SAM determinou a perda interna total através dos seguintes componentes: sujeira, cabos, conexões e efeito de degradação dos módulos. Visando a projeção real do sistema usou uma perda por cabeamento em 3% devido a suposição da distância dos

módulos para o local dos inversores (130 metros). Com as placas projetadas no lago, considerou um ponto seguro no solo para instalação dos inversores conforme a Figura 18.

Figura 18 - Suposição da distância dos módulos para o local estimado dos inversores.



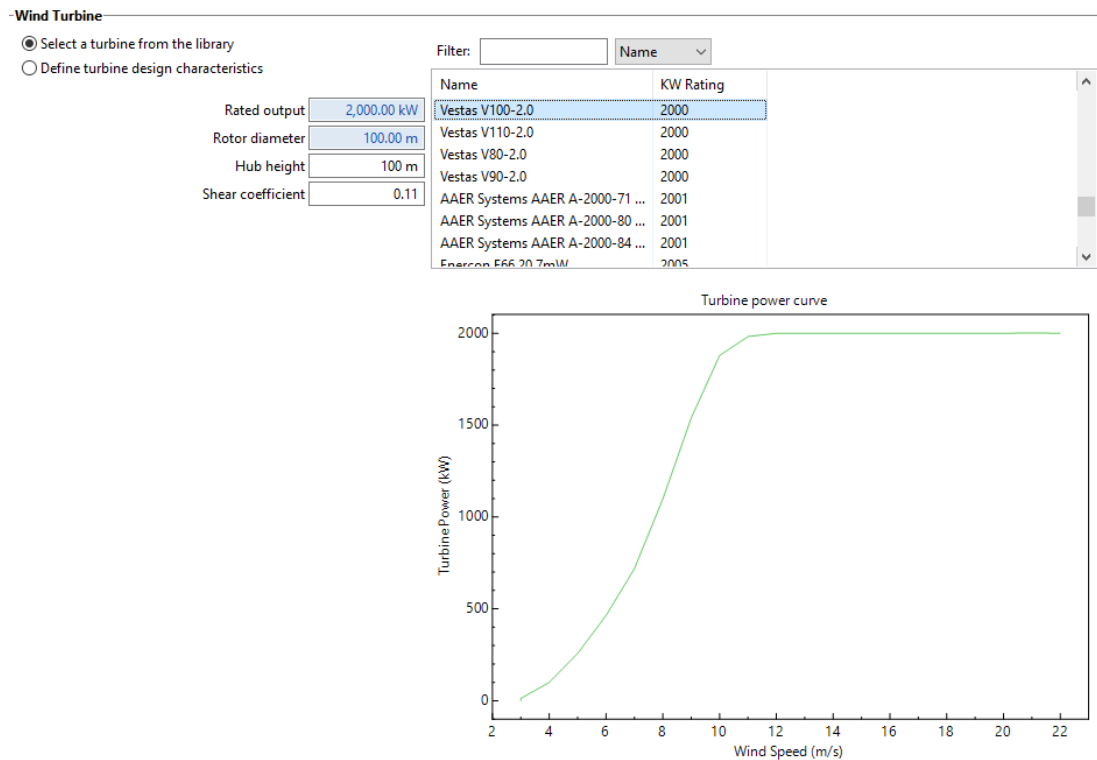
Fonte: adaptado satélite NASA.

3.3.1.2 Modelo da Turbina eólica no SAM

O dimensionamento da fonte eólica segue os mesmos passos da UFF com o arquivo de entrada contendo os dados primários e configuração dos parâmetros. Após a inserção das grandezas de entrada vem o modelo da turbina, o qual foi projetado de acordo com a Figura 19. Como a potência corresponde a um aerogerador de grande porte, segundo as condições mencionadas para a ilha, a tecnologia *offshore* torna-se a opção mais viável para implementação. Com a inovação ao longo dos anos, atualmente não se encontra uma turbina de potência equivalente para instalação no mar, sendo necessário solicitar sua fabricação.

Na Figura 19 observa-se os valores dos principais componentes da turbina como potência (2000 kW), diâmetro do rotor (100 m), altura do cubo (100 m) e coeficiente de cisalhamento (0.11), bem como a curva da potência em relação a velocidade. Para análise da complementariedade energética, variando o diâmetro do rotor, utilizou as turbinas da Vestas do tipo V100-2.0 e V110-2.0, respectivamente, com características idênticas, mas diâmetros diferentes.

Figura 19 - Modelo da turbina no SAM.



Fonte: próprio autor.

O campo seguinte (*Wind Farm*) permite especificar o número de turbina do projeto incluindo uma representação do *layout* do parque eólico para estimar as perdas por efeito esteira. Como o projeto corresponde apenas uma turbina esse fator foi desconsiderado. Assim como as perdas internas da turbina no campo *Wake losses*.

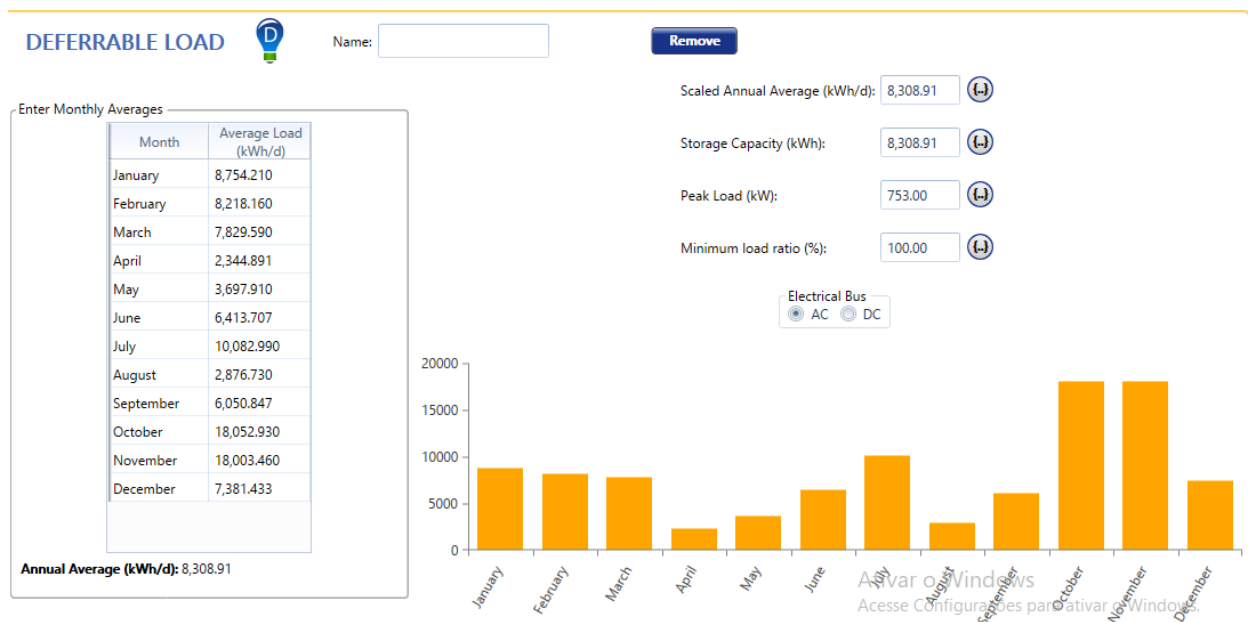
3.3.1.3 Modelo do sistema no HOMER

A análise do sistema híbrido desenvolveu-se por meio do *software HOMER*. Na tentativa da correspondência entre o comportamento dos tipos de tipologias, utilizou a opção de entrada dos dados, montado de acordo com tópico 3.3, e os principais parâmetros da usina associada projetada no *SAM*. O consumo da Figura 16 foi modelado como uma carga adiável. A carga adiável requer uma certa quantidade de energia dentro de um determinado período, podendo esperar até que a energia esteja disponível. O bombeamento de água é um exemplo comum, existe uma flexibilidade na operação da bomba desde que a água no tanque não seque.

O estudo adotou uma “bomba” com potência suficiente para fornecer a energia correspondente ao maior consumo registrado no mês em *kWh*. O qual foi identificado em outubro, sendo equivalente a *753 kW*, operando 24 horas por dia.

Com base nas informações da capacidade dos geradores, Tabela 1, considerou inicialmente o fornecimento através de um gerador a diesel com potência *1120 kW*. A Figura 20 ilustra o modelo da carga no *HOMER*.

Figura 20 - Modelo da carga da Compesa no *HOMER*.



Fonte: próprio autor.

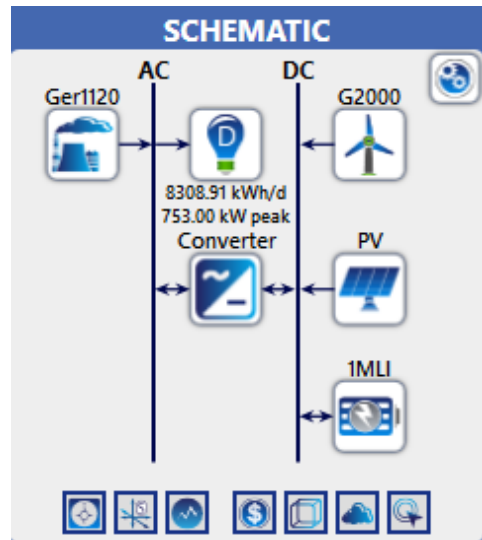
Após o dimensionamento da carga a análise do sistema se desenvolveu com as seguintes simulações:

1. Gerador a diesel;
2. Gerador a diesel e UFF;
3. Gerador a diesel, UFF e Turbina eólica de *2 MW*;
4. Gerador a diesel, UFF, Turbina eólica de *2 MW* e baterias.

A etapa 3 foi projetada usando o aerogerador de menor diâmetro (*100 m*) e parâmetros adotados no *SAM*. Para isso, o *HOMER* permite que seja modelada a turbina eólica a partir da curva de potência e dados específicos (altura do cubo, potência e coeficiente de cisalhamento).

Já para a opção 4 adicionou uma bateria com capacidade de 1 *MWh* do tipo *Li-Ion*. A configuração final da Figura 21 mostra a junção de todos os passos adotados.

Figura 21 - Configuração híbrida adotada no *HOMER*.



Fonte: próprio autor.

3.3.2 Estudo de caso planta offshore com demanda máxima

O dimensionamento da planta *offshore* teve como objetivo uma maior fração de energia fornecida pelo sistema eólico-FV para alimentação da demanda na ilha prevista para 2029. O modelo usou uma turbina com potência de 5 *MW* sendo complementado com 2.5 *MWp* da fonte FV. A potência complementar inclui a UFF mais 1.9 *MWp* para uma planta *offshore* FV.

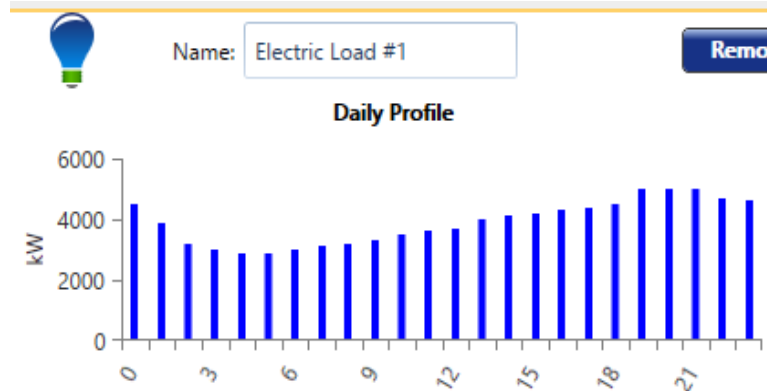
O sistema FV projetado no *SAM* considerou uma perda total de 14.08% com capacidade instalada de 2875 *kWp* e taxa de sobredimensionamento 1.15. Os demais parâmetros são correspondentes aos da Figura 17.

O sistema eólico adotou os aerogeradores *Areva Mulbrid* e *BARD 5.0*, disponíveis na biblioteca do *SAM*, ambos com mesma curva de potência, mas diâmetros diferentes, 116 e 122 m, respectivamente. O estudo considerou essas turbinas com tecnologia suficiente para manter a conversão da energia conjunta com a adição da planta FV *offshore*.

Sabendo da potência instalada das principais fontes de geração e estimativas do consumo em Fernando de Noronha, o *HOMER* foi alimentado com essas informações de modo a obter resultados correspondentes a previsões futuras. O *software* possui uma biblioteca com alguns

modelos de carga por hora que pode ser seguido. O estudo usou a opção de preenchimento manual com a inserção dos valores horários supondo um comportamento de consumo ao longo do dia de acordo com a Figura 22.

Figura 22 - Estimativa da carga ao longo de um ano em Fernando de Noronha.



Fonte: próprio autor.

Cada mês utiliza um dia como referência e a partir da escolha de uma taxa de variabilidade ao longo do tempo, onde adotou 5%, por meio de uma distribuição estatística, estima-se o comportamento durante o ano. A Figura 23 mostra o dimensionamento dos parâmetros obtidos pelo *HOMER* para configuração adotada.

Figura 23 - Parâmetros estimados para os dados de carga no *HOMER*.

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/day)	93,600	93,600
Average(kW)	3,900	3,900
Peak (kW)	6,135.3	6,135.3
Load factor	.64	.64

Load Type: AC DC

Fonte: próprio autor.

A partir do dimensionamento da carga avaliou-se as seguintes configurações:

1. Gerador a óleo diesel mais uma planta FV com a potência equivalentes as principais usinas existentes (950 *kWp*).

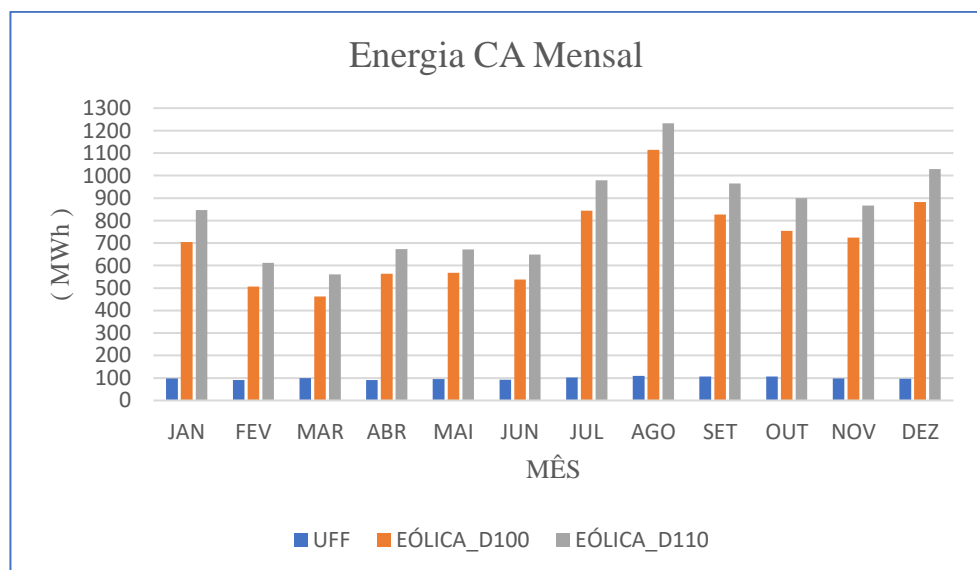
2. Um banco de 6 geradores a diesel com a potência correspondente a 6 *MW* mais o sistema renovável da opção 4 do tópico 3.3.1.3.
3. Planta híbrida *offshore*, composta por uma turbina de 5 *MW*, 2.5 *MWp* de FV, baterias (capacidade de 1 *MWh* do tipo *Li-Ion*) e 5 geradores a diesel de 1 *MW* por unidade.

Para a turbina de 5 *MW* utilizou a curva de potência da *Areva* com um diâmetro do rotor de 116 m.

3.4 Resultados e discussão

A Figura 24 mostra o resultado da geração mensal para cada tipo de fonte dos tópicos 3.3.1.1 e 3.3.1.2 (estudo de caso Compesa). Observa-se que o montante produzido pela UFF possui pouca variação ao longo dos meses, diferentemente da turbina eólica cuja geração no mês de agosto é mais que o dobro comparado ao de março. O rotor de maior diâmetro capta mais energia do vento aumentando o fator de capacidade, conforme a Tabela 4. Dependendo das condições de contratação e capacidade da rede elétrica no local, a melhor opção tecnicamente torna-se o rotor de menor diâmetro para a configuração das usinas associadas.

Figura 24 – Resultado da Geração CA mensal no SAM para estudo de caso da Compesa.



Fonte: próprio autor.

Tabela 4 – Métricas do sistema associado para turbina de 2 MW.

Métrica	UFF	Turbina D100	Turbina D110
Energia anual CA	1.184.833 kWh	8.489.374 kWh	9.986.401 kWh
Fator capacidade	21,5 %	48,5 %	57%

Fonte: próprio autor.

A energia estimada para a UFF tem valor aproximadamente equivalente ao indicado pela Neoenergia, cerca de 1.238 MWh/Ano. Esse valor pode ser maior devido o ganho de eficiência dos módulos sobre o fio d'água do açude do Xeréu, compensando as perdas internas.

Os resultados do sistema híbrido da Tabela 5 revelam que as principais unidades consumidoras da Compesa podem ser alimentadas predominantemente por fontes renováveis seguindo a premissa de carga adiável.

Tabela 5 - Resultados da simulação no HOMER para o estudo de caso da Compesa.

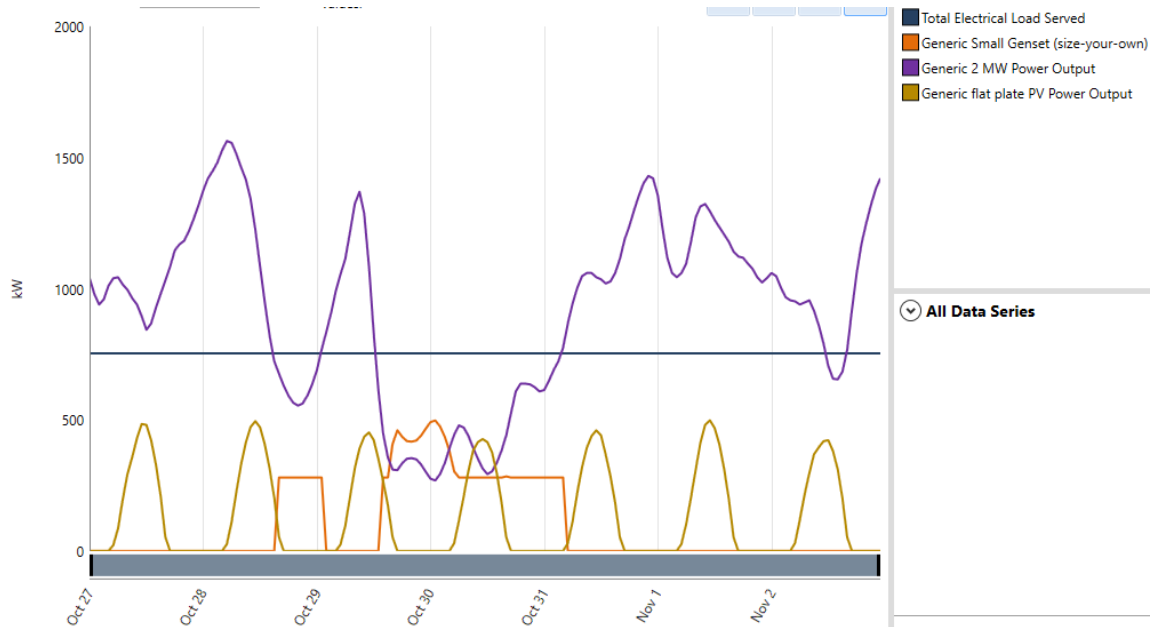
Opção	Fonte	Potência (kW)	Tempo (h)	Produção/ fonte (kWh/ano)	Produção (kWh/ano)	Combustível (L)	Geração por fonte (%)	Fração Renovável (%)	Excesso (kWh/ano)	(%) Excesso
1	GER	1120	4.018	3.025.554	3.025.554	974.482	100	0	0	0
2	GER	1120	4.018	2.535.355	3.610.973	840.657	69,7	16,2	676.870	16,1
	UFF	630	4.049	1.101.796		-	30,3			
3	GER	1120	587	217.851	10.021.544	81.169	2,17	92,8	6.610.973	68,3
	UFF	630	4.049	1.101.796		-	11			
	EOL	2000	8.636	8.701.898		-	68,3			
4	GER	1120	0	0	9.803.693	0	0	100	6.590.844	67
	UFF	630	4.049	1.101.796		-	11,2			
	EOL	2000	8.636	8.701.898		-	88,8			
	BESS	1000		190.961		-				

Fonte: próprio autor.

Dependendo do tempo de espera para o funcionamento da “bomba” (capacidade de armazenamento do tanque) o consumo tende a ser suprido totalmente pela geração renovável com funcionamento no período de maior aproveitamento. Nota-se na Figura 25 que no mês de maior consumo (outubro), o qual tomou como base a potência de pico, a carga opera

constantemente com potência máxima na maioria dos dias, necessitando da geração térmica em momentos de menor aproveitamento da geração renovável.

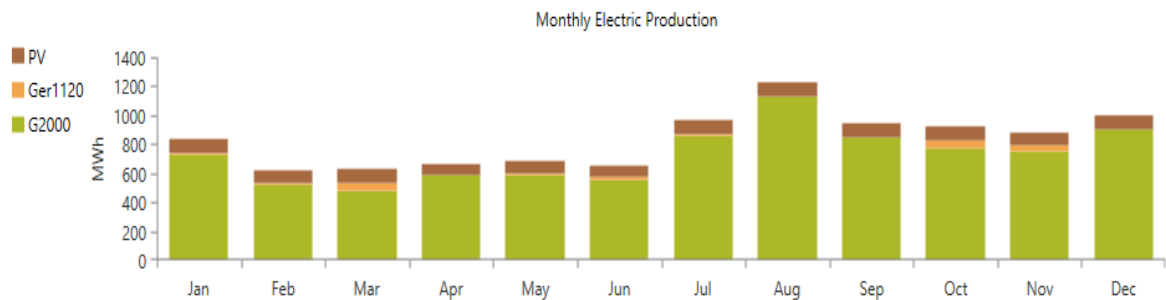
Figura 25 - Comportamento do sistema híbrido no *HOMER* para o estudo de caso da Compesa.



Fonte: próprio autor.

O comportamento da geração mensal do sistema (Figura 26), mostra que em alguns meses a térmica tem maior destaque, como março, outubro e novembro. O principal motivo para operação do gerador a diesel ocorre porque o modelo híbrido eólico-FV não é capaz de compensar a carga em alguns momentos. Isso mostra a importância de manter uma fonte controlável para alimentação total da carga devido a intermitências das fontes renováveis.

Figura 26 – Resultado da geração mensal no *HOMER* para o estudo de caso da Compesa.

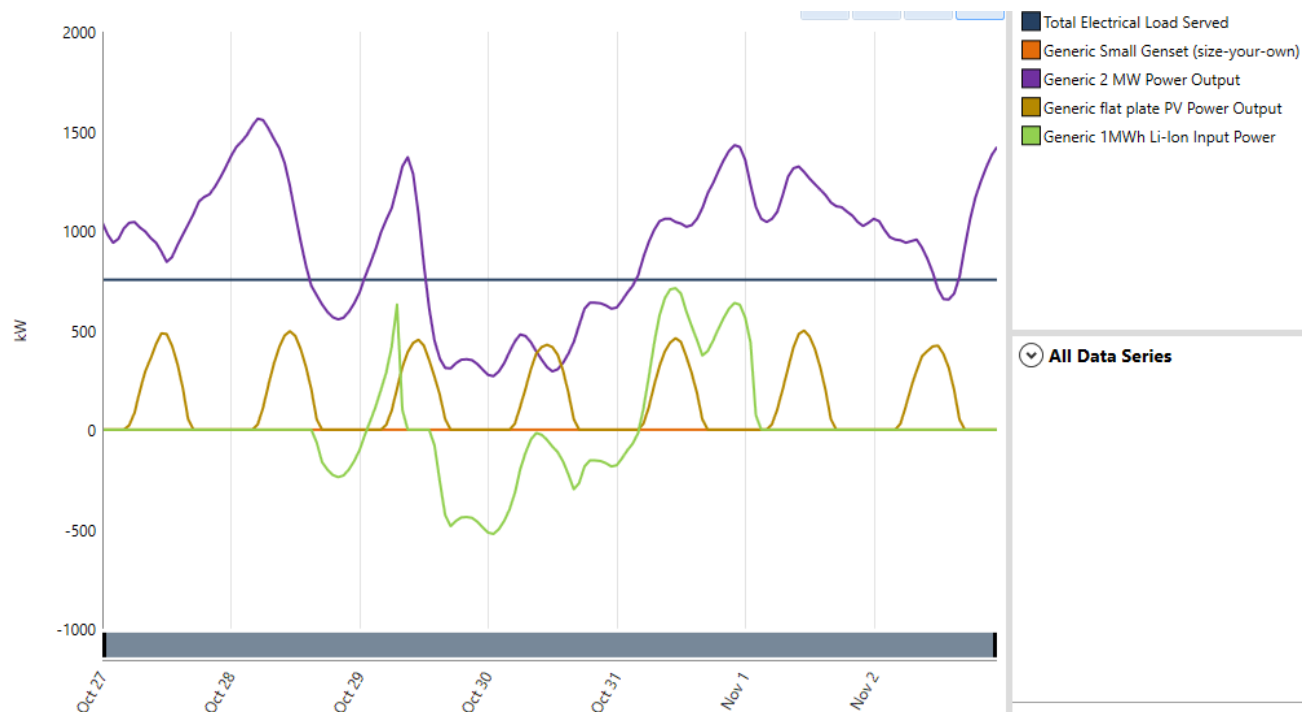


Fonte: próprio autor.

A produção correspondente a Figura 26 é composta pela geração térmica (Ger 1120) em amarelo, eólica (G200) em verde e FV (PV) na cor roxa.

O acréscimo de um banco de baterias permite que o consumo seja alimentado totalmente pelo sistema híbrido eólico-FV, cessando a geração térmica, para isso o *HOMER* retornou uma configuração contendo 30 unidades do modelo especificado no tópico 3.3.1.3. Com essa opção tem-se uma flexibilidade no suprimento da carga, a Figura 27 detalha tal comportamento do sistema com a inserção do armazenamento para o final de outubro e início de novembro.

Figura 27 - Comportamento do sistema híbrido no *HOMER* com baterias.



Fonte: próprio autor.

A energia produzida na opção 3 excede o consumo da companhia, cerca de 68,3%, podendo ser injetada diretamente na rede. Essa fração é reduzida com acréscimo do banco de baterias, 67%, como esperado, já que se armazena a potência proveniente das fontes renováveis nos momentos de abundância para posteriormente nos períodos menos favoráveis ser utilizada. Observa-se que a fração da geração térmica não foi compensada totalmente pelo conjunto de baterias, 2,17%, constatando a injeção de parte deste valor na rede de distribuição. Ao substituir o gerador por dois de menor porte, de modo que a soma da potência seja equivalente a necessária para alimentação da carga (500 e 255 kW), obteve-se 1,72%.

O modelo híbrido apresenta-se útil tendo em vista a opção de controle entre a carga e geração, esse controle pode incluir a transmissão em corrente contínua. Nesse caso, a potência gerada da turbina deve seguir em CC até um barramento para posteriormente juntamente com a da UFF ser invertida. Essa condição não é viável economicamente na implementação da eólica *offshore* devido à distância a ser considerada da costa para Fernando de Noronha, cerca de 16 km, eliminando o efeito visual.

O resultado do sistema híbrido foi desenvolvido através do controle entre carga e geração, principalmente no estudo de caso da Compesa, desde o tipo da carga até a injeção da potência. O *HOMER* chegou ao resultado considerando os momentos favoráveis para ativação da carga, bem como o montante de energia necessária para o seu atendimento. Isso pode ser implementado na ilha através de um sistema de controle, com a premissa de que as residências e/ou Compesa possuem uma capacidade de armazenamento de água por um dia.

Considerando o comportamento da carga no geral, segundo estudo de caso, na Tabela 6, os dados indicam uma configuração capaz de alimentar 50,5% do consumo total da ilha previsto para 2029 através do modelo híbrido eólico-FV com auxílio de 18 baterias, conforme a metodologia do tópico 3.3.2. Observa-se também que a planta híbrida dimensionada no estudo de caso da Compesa equivale a aproximadamente 28% para o sistema com demanda máxima. Os parâmetros adotados pelo desenvolvimento da carga total são estimativas para valores futuros, tendo previsão de ocorrência, de acordo com a Figura 2.

Visando uma maior fração para alimentação da carga futuramente por meio da planta híbrida foi inserido uma nova turbina na opção 3, onde obteve um retorno de aproximadamente 80% para a mesma configuração.

Tabela 6 - Resultados da planta *offshore* com demanda máxima.

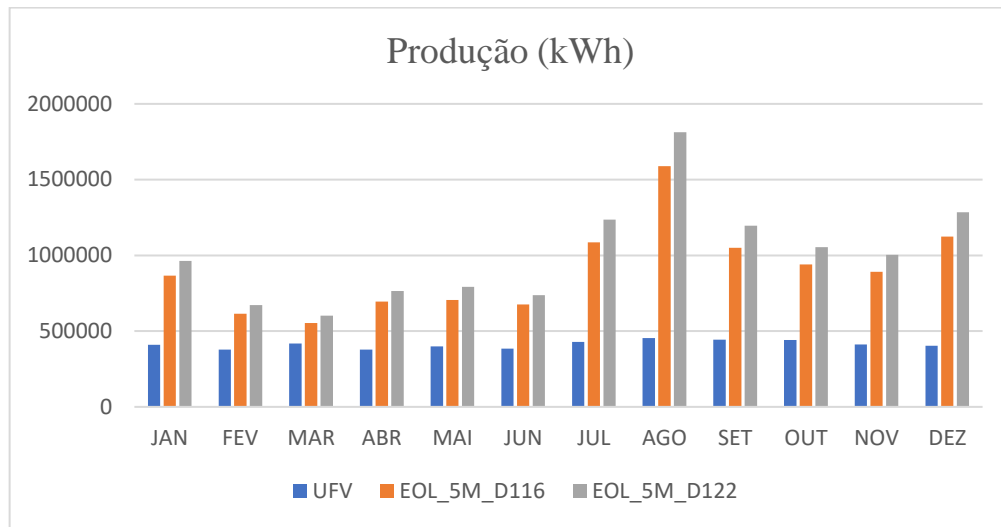
Opção	Fonte	Potência (kW)	Tempo (h)	Combustível (L/ano)	Produção/fonte (kWh/ano)	Produção (kWh/ano)	Geração (%)	Fração Renovável (%)	Excesso (%)
1	GER	6800	8760	8.548.653	32.523.964	34.197.490	95,1	4,8	0
	FV	950	4380		1.673.506		4,89		
2	GER 1	1000	8759	2.220.905	8.599.505	34.437.826	25	32,8	0,0191

	GER 2	1000	8149	1.882.901	7.249.241		21,1		
	GER 3	1000	5434	1.179.195	4.520.979		13,1		
	GER 4	1000	2915	564.189	2.144.997		6,23		
	GER 5	1000	797	118.006	437.903		1,27		
	GER 6	1000	0	0	0		0		
	FV	950	4380	-	1.673.506		4,86		
	EOL	2000	8636	-	8.701.898		25,3		
	UFF	630	4380	-	1.109.798		3,22		
	BESS	30000		-	121.738		-		
3	GER 1	1000	7239	1.754.828	6.776.568	35.568.440	19,1	50,5	2,87
	GER 2	1000	5.696	1.326.645	5.110.250		14,4		
	GER 3	1000	3.839	840.211	3.223.217		9,06		
	GER 4	1000	1.991	389.008	1.480.056		4,16		
	GER 5	1000	559	88.557	330.863		0,930		
	FV	950	4380	-	1.673.506		4,71		
	UFF	630	4380	-	1.109.798		3,12		
	FV Offshore	1900	4380	-	3.347.011		9,41		
	BESS	18000		-	150.470		-		
	EOL	5000	8636	-	12.571.171		35,2		

Fonte: próprio autor.

Apesar da metodologia não seguir o padrão adotado pela EPE para a análise do *Curtailment*, o estudo visa o comportamento da complementariedade energética para otimização em um ponto de conexão no sistema de distribuição. Algumas pesquisas utilizam os dados horários via satélite da NASA para análise da complementariedade [36]. A Figura 28 mostra a geração mensal correspondente ao segundo estudo de caso.

No caso da potência FV para a análise da complementariedade admitiu a instalação futura da UFF mais uma planta *offshore*. Nessa configuração os componentes utilizados para produção e/ou transmissão até costa podem ser compartilhados entre si.

Figura 28 - Geração mensal no SAM para planta *offshore*.

Fonte: próprio autor.

Os resultados da Tabela 7 indicam o comportamento do *curtailment* para usinas associadas, ou seja, o montante que ultrapassa em um certo ponto de conexão a potência limite do aerogerador. Tal comportamento varia com o diâmetro da turbina e da proporção entre as potências de cada fonte. Observa-se que a energia ultrapassada para ilha cresce com maior inserção FV e que o aumento do diâmetro influencia nesse crescimento. Isso se deve porque os aerogeradores com mesma curva de geração diminuem a capacidade ociosa para maiores diâmetros.

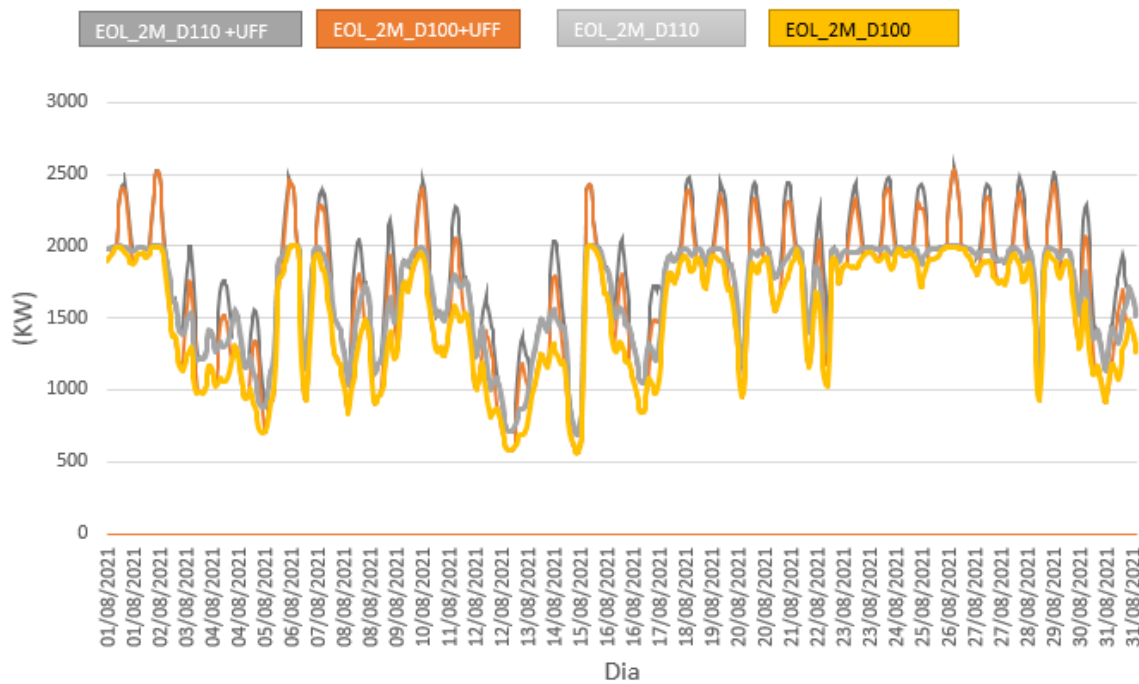
Tabela 7 - Comportamento do *Curtilment* para usinas associadas.

Eólica	UFV	Diâmetro	Nº de Ocorrência	Energia ultrapassada/ano (kWh)	Maior percentual ultrapassado/h (%)
2000	30%	100	450	83.043,19	26,9
		110	810	164.326,27	27,15
5000	12%	116	11	386,43	7,7
		122	16	402,192	8,04
	50%	116	46	33.904,545	34,60
		122	95	53.445,69	37,32

Fonte: próprio autor.

Grande parte do número de ocorrências da Tabela 7 possui alta concentração no mês de agosto, como previsto devido ao elevado índice de ventos no mês. A Figura 29 mostra o comportamento da geração conjunta da usina associada para o sistema com turbina de 2 MW referente a agosto.

Figura 29 - Comportamento da usina associada no SAM com turbina de 2 MW no mês de agosto.



Fonte: próprio autor.

A curva de potência da turbina de 2 MW melhor se adapta ao aproveitamento dos recursos primários comparada a de 5 MW, conforme os fatores de capacidades da Tabela 4 e Tabela 8. O conhecimento dos recursos primários torna-se importante na escolha do aerogerador de modo a obter um maior rendimento.

Tabela 8 - Métricas do sistema associado para turbina com 5 MW.

Métrica	Turbina D116	Turbina D122
Energia anual CA	10.792.854 kWh	12.118.198 kWh
Fator de capacidade em 1 ano	24,6 %	27,7%

Fonte: próprio autor.

4 CONCLUSÕES

O estudo analisou as possibilidades de implementação da fonte eólica e maior inserção da solar fotovoltaica visando a não expansão da geração termelétrica a óleo diesel para o suprimento do aumento da carga previsto nos próximos anos em Fernando de Noronha. O dimensionamento do sistema contou com a vantagem da complementariedade energética entre essas fontes ao longo do tempo, a qual foi avaliada a partir de base dados climáticos locais e via satélite.

A metodologia sugeriu dois estudos de caso para implementação do sistema eólico-FV com auxílio de armazenamento, seja na configuração híbrida ou associada. O primeiro, de menor potência, realizou-se por meio dos dados da carga e de uma usina fotovoltaica flutuante com previsão de instalação da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa), já o segundo considerou o consumo total a partir de estimativas futuras com acréscimo de uma planta *offshore*.

Os resultados mostraram que Fernando de Noronha possui bons indicativos para geração de energia eólica e FV com alto potencial a ser extraído no mar, o projeto indicado para o consumo da Compesa pode reduzir cerca de 2.554.000 litros de óleo diesel por ano, alcançando aproximadamente 28% da produção renovável prevista para 2029. Para tal, verificou-se a importância de manter uma fonte controlável seja o gerador e/ou baterias. O sistema mostra-se eficiente com um controle auxiliar entre carga e geração para o gerenciamento do consumo nos momentos favoráveis através do conceito de carga adiável, esse fator inclui o tipo de transmissão sendo preferível em corrente contínua devido ao maior controle do fluxo injetado.

A planta *offshore*, segundo estudo de caso, consegue suprir 50,5% da carga prevista para 2029, chegando até 80% com a utilização de duas turbinas. Esses valores podem ser maiores dependendo da escolha do diâmetro e da curva de potência do aerogerador, elevando o fator de capacidade e conseqüentemente o aproveitamento dos recursos primários.

Observa-se que a partir dos dados adotados a ilha apresenta uma alta complementariedade energética, com boa capacidade ociosa, para a configuração associada o maior montante de energia ultrapassado por hora tem predominância no mês de agosto devido à alta concentração de ventos. Esse valor atingiu 37,32% acima da potência da turbina de 5 MW, sendo complementada pela planta *offshore* correspondente a 50% da capacidade instalada. Nota-se que a energia ultrapassada para ilha cresce com maior inserção FV e que o aumento do diâmetro

influencia nesse crescimento. Isso ocorre porque as turbinas com mesma curva de geração diminuem a capacidade ociosa para maiores diâmetros.

4.1 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O estudo das usinas associadas se limitou a dados climáticos horários para o ano de 2021 e a modelagem da carga foi prevista por meios de estimativas no segundo estudo de caso. Tais análises são ideias com medições no local por minuto e de dados reais do consumo total. Assim, com o intuito de dar continuidade ao tema deste trabalho, seguem algumas propostas para pesquisas futuras:

- Análises com medições no local por minuto e dados reais de todo o consumo da ilha;
- Avaliações de configurações com outros modelos de turbina eólica;
- Avaliação econômica dos modelos híbridos;
- Análise da rede elétrica para a injeção da potência proveniente das fontes renováveis;
- Análise a partir de um sistema de controle entre geração e carga.

REFERÊNCIAS

1. EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Energia 2030**. Brasília. 2021.
2. CAMPOS, R. A.; NASCIMENTO, L. R. D.; RÜTHER, R. The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants. **Energy Conversion And Management**, 221, out 2020. 113160.
3. BAGATINI, M. et al. Complementarity in Time between Hydro, Wind and Solar Energy Resources in the State of Rio Grande do Sul, in Southern Brazil. **Energy And Power Engineering**, Brasília, 2017. 515-526. Acesso em: 2022.
4. VIVIESCAS, C. et al. Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: complementarity and climate change impacts on wind and solar resources. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, out 2019. 109232.
5. EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Avaliação Da Geração De Usinas Híbridas Eólico-Fotovoltaicas - Proposta Metodológica E Estudos De Caso**. [S.l.]. 2017.
6. EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento**. [S.l.]. 2018.
7. ONS-OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos Operacionais para previsão de carga e planejamento da operação dos Sistemas Isolados**. [S.l.]. 2017.
8. EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2022/2026 – Ciclo 2021**. Rio de Janeiro. 2022.
9. MME-MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **PORTARIA Nº 67, DE 1º DE MARÇO DE 2018**. Governo Federal. Brasília. 2018.
10. GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. NORONHA CARBONO ZERO – NCZ. , 2022. Disponível em: <<https://www.noronha.pe.gov.br/meio-ambiente/noronha-carbono-zero-ncz/>>. Acesso em: 13 agosto 2022.
11. EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fernando de Noronha: identificação das alternativas de suprimento - avaliação de médio e longo prazo**. Rio de Janeiro. 2021.
12. CELPE. Fernando de Noronha - Ilha de Inovação, 2019. Disponível em: <https://www.cinase.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Caso-Fernando-deNoronha_CELPE_compressed-2.pdf>. Acesso em: 13 agosto 2022.
13. EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fernando de Noronha: identificação das alternativas de suprimento - avaliação de médio e longo prazo**. Rio de Janeiro. 2021.
14. LIU, Y. et al. Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, fev 2018. 460-470.
15. WWF-BRASIL. **Geração de energia em Fernando de Noronha: Alternativas para a diminuição de emissões de CO2 no transporte e eletricidade**, 2020.
16. NAPOLEÃO, G.; CODECEIRA, N.A. Análise de Fluxo de Carga e Energia Gerada no Sistema Isolado da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista De Engenharia E Pesquisa Aplicada**, 2016.
17. ATLAS EÓLICO E SOLAR DE PERNAMBUCO. Fernando de Noronha, 2017. Disponível em: <<http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/>>. Acesso em: 20 agosto 2022.

18. IRENA-INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Transforming small-island power systems: Technical planning studies for the integration of variable renewables**, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. 2018.
19. VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2012.
20. PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. [S.l.]: CRESESB, 2014.
21. FORTES, R. R. A. PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICAS PRODUZIDAS POR INVERSORES FOTOVOLTAICOS E TRANSFORMADORES ASSIMETRICAMENTE MAGNETIZADOS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. **Tese (Doutorado)**, Ilha Solteira, 7 dez. 2018. 195.
22. SALIM, D. H. C. combination of UAV photogrammetry and GIS irradiation modeling to suggest scenarios of PV transition in Fernando de Noronha Island (PE, Brazil). **Dissertação de Mestrado**, Minas Gerais, 30 março 2021.
23. EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Solar Fotovoltaica Flutuante: Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao Planejamento**. Rio de Janeiro. 2020.
24. SACRAMENTO, E. M. D. et al. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. **Iet Renewable Power Generation**, 01 nov 2015. 1019-1024.
25. HAMMOUMI, A. E. et al. Design and construction of a test bench to investigate the potential of floating PV systems. **Journal Of Cleaner Production**, jan 2021. 123917.
26. CLAUS, R.; LÓPEZ, M. Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, ago 2022. 112502.
27. SAHU, A.; YADAV, N.; SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, dez 2016. 815-824.
28. OLIVEIRA-PINTO, S.; STOKKERMANS, J. Marine floating solar plants: an overview of potential, challenges and feasibility. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Maritime Engineering**, dez 2020. 120-135.
29. PINTO, M. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.
30. RODRIGUES, P. & A. G. J. B. & Y. Y. **Energia Eólica em Energias Renováveis**. [S.l.]: [s.n.], 2011.
31. CUSTÓDIO, R.D. S. **Energia Eólica para Produção de Energia**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.
32. EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Guia de Boas Práticas Estações Anemométricas**. [S.l.]. 2015.
33. ABEEÓLICA. Boletim anual 2021, 2022. Disponível em: <file:///C:/Users/Alberes.DESKTOP-NCGATQ6/Downloads/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf>. Acesso em: 15 set 2022.
34. BANK, W. **Expanding Offshore Wind To Emerging Markets**. Washington. 2019.
35. EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Roadmap Eólica Offshore Brasil: Perspectivas e caminhos para a engenharia eólica marítima**. Rio de Janeiro. 2022.
36. CAO, Y. et al. Complementarity assessment of wind-solar energy sources in Shandong province based on NASA. **The Journal Of Engineering**, jun 2019. 4996-5000.

APÊNDICES

APÊNDICE A– FORMATO DOS DADOS DE ENTRADA PARA O DIMENSIONAMENTO DA UFF

Source,Location ID,City,State,Region,Country,Latitude,Longitude,Time Zone,Elevation, WMO,-,Noronha,Pernambuco,Nordeste,Brasil,-3.855,-32.423,-2,59, Year,Month,Day,Hour,Minute,GHI,DHI,DNI,Tdry,Wspd,Wdir				
2059,1,1,0,30,0,0,0,26.000,6.00,130				
2059,1,1,1,30,0,0,0,26.000,6.00,140				
2059,1,1,2,30,0,0,0,26.000,6.00,140				
2059,1,1,3,30,0,0,0,26.000,6.00,150				
2059,1,1,4,30,0,0,0,26.000,5.00,150				
2059,1,1,5,30,0,0,0,26.000,7.00,150				
2059,1,1,6,30,132,46,383,26.000,7.00,150				
2059,1,1,7,30,348,85,573,26.000,6.00,150				
2059,1,1,8,30,587,111,748,27.000,5.00,140				
2059,1,1,9,30,744,141,767,28.000,6.00,140				
2059,1,1,10,30,856,151,789,29.000,7.00,140				
2059,1,1,11,30,919,151,821,29.000,6.00,140				
2059,1,1,12,30,842,160,741,30.000,6.00,150				
2059,1,1,13,30,712,148,671,29.000,6.00,150				
2059,1,1,14,30,603,126,674,29.000,7.00,160				
2059,1,1,15,30,449,101,656,29.000,6.00,160				
2059,1,1,16,30,244,66,528,29.000,6.00,160				
2059,1,1,17,30,69,26,211,28.000,6.00,150				
2059,1,1,18,30,3,2,0,27.000,6.00,150				
2059,1,1,19,30,0,0,0,27.000,6.00,150				

APÊNDICE B – FORMATO DOS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO DA TURBINA EÓLICA

```

loc_id,city,state,country,year,lat,lon,elevation,-2,,,
PowerNASA,FernandoNoronha,PE,BRA,2021,-3.855,-32.423,59,,,,
Temperature,Pressure,Direction,Speed,Direction,Speed,Temperature,Pressure,Temperature,Pressure,Speed,Direction
C,atm,degrees,m/s,degrees,m/s,C,atm,C,atm,m/s,degrees
10,10,10,10,50,50,50,50,100,100,100,100
27.27,1.0118,134.72,6.77,134.49,7.51,27.27,1.0118,27.27,1.0118,7.928814448,134.49
27.22,1.0111,136.1,6.65,135.9,7.35,27.22,1.0111,27.22,1.0111,7.759891637,135.9
27.12,1.0105,137.51,6.69,137.36,7.38,27.12,1.0105,27.12,1.0105,7.791564664,137.36
27.08,1.0105,138.32,6.87,138.21,7.59,27.08,1.0105,27.08,1.0105,8.013275854,138.21
27.09,1.0106,137.07,7.18,136.95,7.95,27.09,1.0106,27.09,1.0106,8.393352179,136.95
27.15,1.0109,134.23,7.41,134.12,8.24,27.15,1.0109,27.15,1.0109,8.699524774,134.12
27.27,1.0115,131.38,7.53,131.27,8.4,27.27,1.0115,27.27,1.0115,8.868447585,131.27
27.35,1.0122,129.49,7.53,129.31,8.41,27.35,1.0122,27.35,1.0122,8.879005261,129.31
27.37,1.0125,128.54,7.41,128.36,8.27,27.37,1.0125,27.37,1.0125,8.731197801,128.36
27.38,1.0125,128.45,7.21,128.33,08.04,27.38,1.0125,27.38,1.0125,8.48837126,128.33
27.4,1.0125,129.4,6.97,129.23,7.75,27.4,1.0125,27.4,1.0125,8.182198665,129.23
27.44,1.0124,130.41,6.7,130.23,7.44,27.44,1.0124,27.44,1.0124,7.854910719,130.23
27.48,1.0118,131.27,6.45,131.06,7.15,27.48,1.0118,27.48,1.0118,7.548738123,131.06
27.48,1.0112,132.54,6.31,132.33,6.98,27.48,1.0112,27.48,1.0112,7.369257636,132.33
27.48,1.0107,133.44,6.27,133.22,6.94,27.48,1.0107,27.48,1.0107,7.327026934,133.22
27.51,1.0105,133.54,6.28,133.36,6.95,27.51,1.0105,27.51,1.0105,7.337584609,133.36
27.55,1.0106,133.4,6.34,133.24,07.02,27.55,1.0106,27.55,1.0106,7.411488339,133.24
27.56,1.0109,133.03,6.41,132.91,7.11,27.56,1.0109,27.56,1.0109,7.506507421,132.91
27.55,1.0115,132.19,6.42,132.16,7.12,27.55,1.0115,27.55,1.0115,7.517065096,132.16
27.55,1.0122,131.18,6.3,131.1,6.98,27.55,1.0122,27.55,1.0122,7.369257636,131.1
27.56,1.0128,129.9,6.15,129.87,6.8,27.56,1.0128,27.56,1.0128,7.179219474,129.87
27.52,1.0131,129.18,06.05,129.15,6.67,27.52,1.0131,27.52,1.0131,7.04196969,129.15
27.45,1.013,129.16,06.03,129.12,6.64,27.45,1.013,27.45,1.013,7.010296663,129.12
27.34,1.0125,129.38,06.03,129.36,6.63,27.34,1.0125,27.34,1.0125,6.999738987,129.36
27.23,1.0117,129.47,06.07,129.43,6.66,27.23,1.0117,27.23,1.0117,7.031412014,129.43
27.12,1.0109,128.34,6.2,128.36,6.79,27.12,1.0109,27.12,1.0109,7.168661798,128.36
27.02,1.0104,126.32,6.33,126.39,6.94,27.02,1.0104,27.02,1.0104,7.327026934,126.39
26.99,1.0102,123.84,6.45,123.94,07.08,26.99,1.0102,26.99,1.0102,7.474834393,123.94
26.98,1.0104,121.06,6.6,121.15,7.25,26.98,1.0104,26.98,1.0104,7.65431488,121.15
27.01,1.0108,118.86,6.72,118.92,7.4,27.01,1.0108,27.01,1.0108,7.812680016,118.92
27.04,1.0114,117.31,6.76,117.37,7.44,27.04,1.0114,27.04,1.0114,7.854910719,117.37

```
