



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

SAYNARAH CRUZ NABUCO

**ESTUDO DE PARQUE EÓLICO OFFSHORE PARA SUPRIMENTO DE UMA USINA
DE HIDROGÊNIO VERDE: ANÁLISES TÉCNICA E ECONÔMICA**

FORTALEZA

2022

SAYNARAH CRUZ NABUCO

ESTUDO DE PARQUE EÓLICO OFFSHORE PARA SUPRIMENTO DE UMA USINA DE
HIDROGÊNIO VERDE: ANÁLISES TÉCNICA E ECONÔMICA

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

Orientador: Prof. Fernando Luiz Mar-
celo Antunes, PhD

Coorientador: Eng. Gabriel Marçal da
Cunha Pereira Carvalho

FORTALEZA

2022

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

N115e Nabuco, Saynarah Cruz.

Estudo de parque eólico offshore para suprimento de uma usina de hidrogênio verde : análises técnica e econômica / Saynarah Cruz Nabuco. – 2022.
169 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

Coorientação: Prof. Gabriel Marçal da Cunha Pereira Carvalho.

1. Hidrogênio verde. 2. Eólica offshore. 3. Análise econômica. 4. Análise técnica. 5. Eletrolisador. I. Título.

CDD 621.3

SAYNARAH CRUZ NABUCO

ESTUDO DE PARQUE EÓLICO OFFSHORE PARA SUPRIMENTO DE UMA USINA DE
HIDROGÊNIO VERDE: ANÁLISES TÉCNICA E ECONÔMICA

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

Aprovada em: 15 de Julho de 2022

BANCA EXAMINADORA

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

Eng. Gabriel Marçal da Cunha Pereira
Carvalho (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Levi Freitas Fernandes Távora
Qair Energy Brasil

MSc. Constantino Frate
Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Trabalho
- SEDET

Aos meus pais, familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar este trabalho às seguintes pessoas:

Aos meus pais, Salvanah Rocha e Fernando Nabuco, pelos inúmeros esforços que fizeram para garantir que eu teria acesso à uma boa educação e por me incentivarem a sempre agir com honestidade e humildade.

Aos meus irmãos Adson Cruz e Fernando Cruz pela companhia de sempre e por me incentivarem a ser sempre uma pessoa melhor.

Aos profissionais de saúde do Brasil que enfrentaram arduamente a pandemia de Covid 19 e, que pela dedicação em condições insalubres salvaram muitas vidas. Meu profundo respeito a todos e aos familiares que perderam parentes que eram profissionais da linha de frente, o legado deles não será esquecido.

Aos meus professores Márcio Costa e Washington Luís por serem minhas referências ao longo da minha trajetória escolar. Com as aulas de ambos, eu desenvolvi o amor pela matemática e pela educação. Em especial, agradeço ao Washington por tantas vezes estar disponível para me ajudar e tirar dúvidas do conteúdo, até mesmo após o horário de aula.

À plataforma de ensino Descomplica por me proporcionar aprendizados para além do vestibular, mas sim, ensinamentos para a vida. Agradeço por me fazerem sentir capaz e merecedora de acessar a universidade pública.

Aos meus amigos e parceiros de estudo da engenharia metalúrgica (Cesanildo Filho, Daniel Souza, Guilherme Carvalho, Lucas Gomes, Matheus Souza e Kaliary Silva) por todo o suporte e a companhia nos meus dois primeiros anos na universidade, sem vocês não teria sido fácil. Agradeço por me mostrarem a vida de uma perspectiva diferente.

Aos professores do curso de Engenharia Metalúrgica Igor Vaconcelos e Walney Araújo que me desafiaram e me mostraram que eu seria capaz de conquistar o que eu almejava. Em especial, Walney Araújo pelo convite a participar do Laboratório de Pesquisa e Corrosão, onde atuei durante 6 meses.

À minha família do Programa de Educação Tutorial de Engenharia Elétrica da UFC por me acolherem em um momento tão difícil de transição entre as graduações. Agradeço a todos os ensinamentos e por me tirarem da zona de conforto. Compartilhar cada projeto e cada viagem com vocês tornou tudo mais rico e prazeroso. Estar na sala do PET todas as manhãs para estar disponível em ajudar todos os alunos que entravam pedindo ajuda, me ensinou a ser cada vez mais solícita e preocupada em ajudar o próximo.

Aos meus companheiros do curso de engenharia elétrica e amigos para a vida toda (Bruno Faustino, Caio Braga, Danilo Meireles, Nathanael Vasconcelos, Pedro Tino, Wesley Bezerra e Wesley Barata) por não largarem a minha mão e me terem dado o suporte necessário nos momentos mais difíceis dessa jornada. Entre risos e lágrimas, a amizade de vocês me dava a certeza de que eu estava num ambiente seguro e de acolhimento.

A minha amiga Jéssica Aragão por ter me proporcionado boas risadas e reflexões sobre a mulher que eu gostaria de me tornar. Em um mundo ainda predominantemente masculino, você me motivou a acreditar em mim mesmo e ter convicção sobre o caminho que desejo trilhar.

Aos professores René Bascopé e Edilson Porfírio por me orientarem nas primeiras experiências com a pesquisa acadêmica dentro da universidade. Agradeço a atenção e a paciência que demonstraram. Sem esses passos iniciais, a trajetória de construção deste trabalho teria sido bem mais árdua. Carrego os ensinamentos de vocês sempre comigo.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica Dalton Honório, Fernando Antunes, Paulo Praça, René Bascopé, Ruth Leão e Wilkley Bezerra pelos ensinamentos e pela dedicação. Em especial, agradeço ao Wilkley Bezerra pela celeridade em assinar meus aproveitamentos de estudos mesmo com o prazo tão apertado e ter me proporcionado a chance de continuar com o fluxo de estudos junto dos meus colegas de turma, em especial, Bruno Faustino e Wesley Bezerra. Sem essa ajuda do Wilkley, eu poderia ter perdido muitos momentos e, por isso, serei eternamente grata.

Aos meus professores da casa de cultura alemã (Alexander Ribeiro, Giovanni Brayner e Susy Cabral) e da casa de cultura francesa (Adriana Colares, Arivalneide Mendonça e Roterdan Damasceno) por serem uma inspiração de didática, dedicação e acolhimento. Em diversos momentos, assistir a aula de vocês me fazia viajar para outra realidade e esquecer um pouco das preocupações e pressões da vida profissional e acadêmica.

Aos meus amigos e companheiros das aulas de dança por me fazer despertar um outro lado meu que ama a música e a dança. Em especial, Luciano Azevedo, que muitas vezes me acolheu e me mostrou como é possível equilibrar a vida social com a vida profissional. Um professor não, um verdadeiro mestre. Todas as histórias que ele compartilhou da sua trajetória ficaram guardadas como lições para mim.

Ao Now United por todas as composições e por me apresentarem à cultura de vários países ao redor do mundo através dos vídeos clipes.

Aos meus companheiros de trabalho Caio Mesquita, Joisilane Duarte e Levy Ivel

pela preocupação e atenção com o meu trabalho, sempre me puxando para cima e me motivando para que eu acreditasse que tudo daria certo. Parte desse trabalho foi com o apoio de vocês.

Ao Rufael Jucá que dedicou alguns momentos do seu horário de trabalho para me ajudar e tirar algumas dúvidas sobre o meu tema de pesquisa e ainda inspirar em alguns questionamentos.

Ao Professor Fernando Antunes pela orientação, abertura e o apoio durante a construção deste trabalho. Seus posicionamentos e questionamentos me abriram horizontes e oportunidades que eu não imaginava alcançar.

Ao meu amigo Gabriel Marçal, também meu coorientador, que me acolheu de uma forma inestimável. Serei eternamente grata por todo o acompanhamento e as reuniões entrando a madrugada para me ajudar a solucionar questões do trabalho. Além de conseguir me tranquilizar em diversos momentos que eu pensei que não conseguiria, mas segui acreditando por causa de você.

A todos os outros alunos de turma que, de alguma forma, contribuíram para a profissional e pessoa que eu me tornei hoje.

“Change will not come if we wait for some other person or if we wait for some other time. We are the ones we’ve been waiting for. We are the change that we seek.”

(Barack Obama)

RESUMO

Em vista da crescente demanda de energia para os próximos anos, principalmente de fontes primárias poluentes, foi assinado em 2016 um acordo internacional entre 195 países – o Acordo de Paris – com o objetivo de diminuir as emissões de carbono na atmosfera a partir de 2020. As principais ações para atingir essa meta é a promoção do uso de fontes renováveis de energia para o setor de eletricidade e o aproveitamento energético do hidrogênio para aplicações voltadas à indústria e aos transportes. Os métodos de produção de hidrogênio são diversos, mas aqueles que o produzem a partir de fontes renováveis são os mais quistos nessa transição devido a emissão zero de gases poluentes, o chamado hidrogênio verde. Além disso, a eletrólise da água ganha destaque por produzir hidrogênio através do eletrolisador, utilizando um recurso abundante em nosso planeta e sem produtos poluentes. Nesse sentido este trabalho tem como fim avaliar do ponto de vista técnico e econômico o suprimento de eletricidade por aerogeradores *offshore* para um eletrolisador. Para fins de comparação, foram levantados alguns cenários de sistemas possíveis com e sem o eletrolisador e conectados ou não à elétrica num software de simulação de sistemas - o Hybrid Optimization Model for Electric Renewable - Modelo de Otimização Híbrida para Energia Elétrica Renovável (HOMER). Alguns dos critérios de avaliação são: a sobreposição das curvas de geração, os impactos financeiros do armazenamento de energia e o fator de capacidade comparado com a eólica *onshore*. Os resultados evidenciam as vantagens dos sistemas conectados à rede, colocando em discussão as definições de certificação para obtenção do hidrogênio verde.

Keywords: Hidrogênio Verde. Eólica *Offshore*. Análise Econômica. Análise Técnica. Eletrolisador.

ABSTRACT

In view of the growing demand for energy in the coming years, mainly from polluting primary sources, an international agreement was signed in 2016 for 195 countries – the Paris Agreement – whose objective is reducing carbon emissions in the atmosphere from 2020. The main actions to achieve this goal are the promotion of alternative energy sources for the electricity sector and the energy use of hydrogen for applications aimed at industry and transport. Hydrogen production methods are diverse, but those that produce from renewable sources are the wanted in this transition due to zero emission of polluting gases, the so-called green hydrogen. In addition, electrolysis is highlighted because it requires water as a source for obtaining hydrogen through the electrolyser. In this sense, this work aims to evaluate, from a technical and economic point of view, the supply of electricity by *offshore* wind turbines to an electrolyser. For comparison purposes, some scenarios of possible systems with and without the electrolyser and connected or not to the grid were raised in a systems simulation software - HOMER. Some of the evaluation criteria are: the overlap of generation curves, the financial impacts of energy storage and the capacity factor compared to *onshore* wind. The results evidence a tendency of the systems for the resources connected to the grid, putting into question the certification definitions for obtaining green hydrogen.

Keywords: Green Hydrogen. Offshore Wind. Economic Analysis. Technical analysis. Electrolyzer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento da capacidade instalada no mundo em energia eólica de 2011 a 2021.	25
Figura 2 – Capacidade instalada de fonte eólica no Sistema Interligado Nacional.	27
Figura 3 – Geração de energia eólica para o subsistema Nordeste.	28
Figura 4 – Geração de energia elétrica acumulativa no subsistema Nordeste para o dia 15/05/2022 até às 21h25min.	29
Figura 5 – Dados Técnicos dos projetos de parques eólicos <i>offshore</i> em processo de licenciamento no IBAMA. Última atualização em 20 de abril de 2022.	30
Figura 6 – Sistema isolado com fonte solar fotovoltaica.	36
Figura 7 – Sistema isolado com fonte eólica com armazenamento por baterias com gerador CC.	36
Figura 8 – Sistema isolado com fonte eólica com armazenamento por baterias com gerador CA.	37
Figura 9 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador Corrente Contínua (CC)	37
Figura 10 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador Corrente Alternada (CA).	37
Figura 11 – Sistema isolado com fonte solar fotovoltaica sem armazenamento por baterias.	38
Figura 12 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CC.	38
Figura 13 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CA.	39
Figura 14 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CA.	39
Figura 15 – Setores envolvidos com a tecnologia <i>Power to X</i>	40
Figura 16 – Emissões de Gás Carbônico por queima de combustíveis fósseis.	42
Figura 17 – Participação crescente das energias renováveis.	43
Figura 18 – Classificação de hidrogênio em escada de cores.	44
Figura 19 – O intercâmbio do hidrogênio atrelado ao conceito <i>Power to X</i>	45
Figura 20 – Esquema simplificado de um eletrolisador.	47

Figura 21 – Esquema de implementação de um sistema autônomo de geração de energia com eletrolisador e célula a combustível.	49
Figura 22 – Representação Esquemática da eletrólise alcalina.	49
Figura 23 – Representação Esquemática da eletrólise PEM.	50
Figura 24 – Representação Esquemática da eletrólise de altas temperaturas.	51
Figura 25 – Visão geral de características das principais tecnologias de eletrólise da água.	51
Figura 26 – Visão geral das reações químicas de cada tecnologia de eletrólise da água.	52
Figura 27 – Principais pontos de desenvolvimento de cada pesquisa nos próximos anos.	52
Figura 28 – Tendência de custos para a bateria de Íon-Lítio.	53
Figura 29 – Evolução da demanda mundial por hidrogênio.	55
Figura 30 – A relação entre o consumo específico de energia em (kW/Nm ³) de acordo com a potência do eletrolisador.	59
Figura 31 – Os custos do equipamento e gerais em (Euro/kW) de acordo com a potência do eletrolisador.	60
Figura 32 – Parâmetros calculados na simulação do Hyjack para um eletrolisador com potência de 100kW.	60
Figura 33 – Parâmetros calculados na simulação do Hyjack para um eletrolisador com potência de 1MW.	61
Figura 34 – Mapa resumo da estrutura da ZPE Ceará.	62
Figura 35 – Velocidade média do vento no Pecém com medições a 50 metros da superfície da terra no período de janeiro de 1984 a dezembro de 2013.	64
Figura 36 – Velocidade média do vento no Pecém com medições ajustadas a altura de 135 metros do aerogerador.	65
Figura 37 – Esquemático dos componentes para o arranjo 1	69
Figura 38 – Esquemático dos componentes para o arranjo 2	70
Figura 39 – Esquemático dos componentes para o arranjo 3	71
Figura 40 – Esquemático dos componentes para o arranjo 4	73
Figura 41 – Esquemático dos componentes para o arranjo 5	75
Figura 42 – Esquemático dos componentes para o arranjo 5	75
Figura 43 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 1	78
Figura 44 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 3	79

Figura 45 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 3 - Ampliação de imagem	80
Figura 46 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 4	81
Figura 47 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 5	82
Figura 48 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 6 - Com suporte do banco de baterias	83
Figura 49 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 6 - Sem suporte do banco de baterias	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes necessários para diferentes configurações de sistemas isolados e não-isolados	34
Tabela 2 – Métodos de produção de hidrogênio verde.	46
Tabela 3 – Eficiências de componentes num gerador solar - H_2	47
Tabela 4 – Comparativo entre a compressão e a criogenia.	54
Tabela 5 – Insumos de água e eletricidade segundo a potência do eletrolisador.	58
Tabela 6 – Parâmetros comparativos entre os dados fornecidos pelo NASA POWER e o Atlas Eólico Solar Ceará.	65
Tabela 7 – Consumo de energia no prédio administrativo da Zona de Processamento de Exportação (ZPE) Pecém.	66
Tabela 8 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 1	70
Tabela 9 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 2	71
Tabela 10 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 3	72
Tabela 11 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 4	74
Tabela 12 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 5	76
Tabela 13 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 6	77
Tabela 14 – Características principais dos seis arranjos simulados	77
Tabela 15 – Informações técnicas do armazenamento de energia para os esquemáticos simulados	84
Tabela 16 – Informações econômicas do armazenamento de energia para os esquemáticos simulados	84
Tabela 17 – Parâmetros econômicos para a oferta de energia eólica <i>onshore</i>	85
Tabela 18 – Cálculo do LCOE dos arranjos e comparativo com o LCOE da eólica <i>onshore</i>	85
Tabela 19 – Cálculo do LCOH dos arranjos	86
Tabela 20 – Descritivo do fator de capacidade para os sistemas simulados	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Corrente Contínua
COP21	21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
GEE	Gases de Efeito Estufa
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewable - Modelo de Otimização Híbrida para Energia Elétrica Renovável
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IRENA	International Renewable Energy Agency - Agência Internacional para as Energias Renováveis
LCOE	Levelized cost of electricity - Custo nivelado da eletricidade
NPC	Net present cost - Custo Presente Líquido
ONS	Operador Nacional do Sistema
OPEX	Operational Expenditure
PDF	<i>Portable Document Format</i>
PMO	Programa Mensal de Operação
POWER	Prediction of Worldwide Energy Resource - Previsão de Recursos Energéticos Mundiais
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura
SIN	Sistema Interligado Nacional
Sindienergia-CE	Sindicato das Indústrias de Energia e de Serviços do Setor Elétrico no Ceará
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Watt - Unidade de potência
H_2	Gás Hidrogênio
Wh	Watt-hora - Unidade de energia
NH_3	Amônia
L	Litro - Unidade de capacidade
Nm_3	Normal metro cúbico
C_1	Consumo médio de energia em (kWh/dia)
C_2	Consumo específico do eletrolisador em (kWh/Nm ³)
v_{aero}	Velocidade do vento na altura do aerogerador
v_{anem}	Velocidade do vento na altura do anemômetro de medição
Z_{aero}	Altura da superfície até o aerogerador
Z_{anem}	Altura do anemômetro de medição
z_0	Rugosidade aerodinâmica
i	Taxa de desconto real
i'	Taxa de desconto nominal
f	Taxa de inflação esperada
$\$$	Dólar - moeda
G_e	Geração de energia em um ano
C_i	Capacidade instalada total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	22
1.2	Organização do trabalho	22
2	FUNDAMENTAÇÃO	24
2.1	Energia eólica	24
2.1.1	<i>Conceituação</i>	24
2.1.2	<i>Parques eólicos onshore e offshore</i>	25
2.1.3	<i>Cenário da Energia Eólica no Ceará</i>	28
2.1.4	<i>Funcionamento Parque Eólico Offshore</i>	31
2.2	Sistemas off-grid	32
2.2.1	<i>Conceituação: sistemas on-grid e off-grid</i>	32
2.2.2	<i>Princípio de funcionamento</i>	33
2.2.3	<i>Aproveitamento da energia dos ventos não conectado à rede</i>	34
2.2.4	<i>Parâmetros de conexão</i>	35
2.2.5	<i>Conexão com o eletrolisador</i>	39
2.3	O Hidrogênio Verde em discussão	41
2.3.1	<i>O Hidrogênio Verde como vetor energético</i>	41
2.3.2	<i>Produção de hidrogênio verde</i>	45
2.3.3	<i>Eletrólise da água</i>	47
2.3.3.1	<i>Célula a combustível</i>	48
2.3.4	<i>Tipos de eletrolisadores</i>	48
2.4	Armazenamento de energia	51
2.4.1	<i>Tipos de armazenamento</i>	53
3	ESTUDO DE CASO	57
3.1	Caracterização e dimensionamento do eletrolisador	57
3.1.1	<i>Simulando o eletrolisador no Hyjack</i>	57
3.1.1.1	<i>Parâmetros técnicos</i>	58
3.1.1.2	<i>Parâmetros econômicos</i>	59
3.1.2	<i>Caracterização e dimensionamento do parque eólico offshore</i>	61
3.1.2.1	<i>A escolha do local</i>	61

3.1.2.2	<i>Recurso eólico no Pecém</i>	63
3.1.2.3	<i>A escolha do aerogerador</i>	65
3.1.2.4	<i>Levantamento de cargas da ZPE</i>	66
3.1.3	<i>Integração entre usina eólica offshore e o eletrolisador</i>	67
3.1.3.1	<i>A teoria do NPC e do LCOE</i>	67
3.1.3.2	<i>A taxa de desconto real: Real discount rate</i>	68
3.1.4	<i>Sistemas propostos para simulação</i>	68
3.1.4.1	<i>Arranjo 1: Rede elétrica supre as cargas do prédio administrativo da ZPE</i> .	69
3.1.4.2	<i>Arranjo 2: Aerogeradores suprem as cargas do prédio administrativo da ZPE</i>	69
3.1.4.3	<i>Arranjo 3: Aerogeradores com suporte de bateriais suprem as cargas do prédio administrativo da ZPE</i>	70
3.1.4.4	<i>Arranjo 4: Aerogeradores com suporte de bateriais suprem as cargas do prédio administrativo da ZPE e do eletrolisador</i>	72
3.1.4.5	<i>Arranjo 5: Aerogeradores com suporte de bateriais suprem somente o eletro- lisador</i>	73
3.1.4.6	<i>Arranjo 6: Rede elétrica supre as cargas do eletrolisador</i>	75
4	ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1	Comportamento das curvas de geração e da demanda de carga	78
4.1.1	<i>Arranjo 1: Curva de geração e demanda de carga</i>	78
4.1.2	<i>Arranjo 2: Curva de geração e demanda de carga</i>	79
4.1.3	<i>Arranjo 3: Curva de geração e demanda de carga</i>	79
4.1.4	<i>Arranjo 4: Curva de geração e demanda de carga</i>	80
4.1.5	<i>Arranjo 5: Curva de geração e demanda de carga</i>	81
4.1.6	<i>Arranjo 6: Curva de geração e demanda de carga</i>	82
4.2	Impacto do armazenamento de energia elétrica	84
4.3	Comparativo financeiro com a eólica onshore	85
4.4	Comparativo entre o fator de capacidade real e teórico	86
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	88
5.1	Trabalhos futuros	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICES	95
	APÊNDICE A – Dados da simulação do Arranjo 1 com o Software HOMER©	95

APÊNDICE B	– Dados da simulação do Arranjo 2 com o Software HOMER©	101
APÊNDICE C	– Dados da simulação do Arranjo 3 com o Software HOMER©	103
APÊNDICE D	– Dados da simulação do Arranjo 4 com o Software HOMER©	110
APÊNDICE E	– Dados da simulação do Arranjo 5 com o Software HOMER©	117
APÊNDICE F	– Dados da simulação do Arranjo 6 com o Software HOMER©	124
ANEXOS	124
ANEXO A	– TERMO DE REFERÊNCIA Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/Rima.	130
ANEXO B	– Processos de licenciamento ambiental de eólicas offshore abertos no IBAMA até 20 de abril de 2022	161
ANEXO C	– Métodos de produção de hidrogênio verde	163
ANEXO D	– <i>Datasheet</i> Enercon E-126 [7.5MW]	165
ANEXO E	– Padrão de consumo horário no ano de 2021 para o Prédio Administrativo da ZPE	169

1 INTRODUÇÃO

No período de 2013 a 2050, espera-se um crescimento da demanda de energia primária em 2,2% ao ano - com referência ao ano de base 2013. Os três principais representantes dessa demanda no ano de 2050 serão as fontes de gás natural, de derivados de petróleo e de eletricidade. O gás natural e a eletricidade devem crescer sua inserção na matriz ao longo dos anos e atingir, respectivamente, 11,3% e 23,6% de participação da demanda total brasileira. Para energia provinda de derivados de petróleo existe uma queda de participação ao longo dos anos, mas a demanda por essa fonte ainda é prevista em 39% para 2050. (EPE, 2014)

Do ponto de vista ambiental, os derivados de petróleo e o gás natural são fontes que produzem um volume expressivo de Gases de Efeito Estufa (GEE)'s devido a queima dos combustíveis. No que tange à geração de eletricidade, as fontes que também utilizam a queima de combustíveis para gerar energia elétrica, como as termoelétricas, podem contribuir com a emissão dos GEE's. (JUNIOR, 2009) O principal impacto das emissões desses gases é a aceleração do aquecimento global. Dessa maneira, existe uma urgência em inserir na matriz fontes de energia mais limpas e renováveis.

Diante desse cenário, em abril de 2016 foi assinado na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP21) o Acordo de Paris com o objetivo de reduzir as emissões dos GEE's a partir de 2020. O documento foi aprovado por consenso pelos 195 países participantes, com a missão de estabelecer esforços para limitar o aumento da temperatura até 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. (MEIRELES, 2020). Nesse cenário, para atingir as metas estabelecidas até 2050, os países precisam investir na inserção de fontes de energia limpas. Na geração de eletricidade, as fontes hidráulicas, de biomassa, eólica e solar fotovoltaica são importantes aliadas, e para a substituição em outros setores, como transportes e a indústria, existem estudos que procuram avaliar a inserção e o aproveitamento do potencial energético do hidrogênio.

O hidrogênio é um elemento químico utilizado em muitos processos industriais, como mercado de fertilizantes e de refino. Com relevância econômica já considerável, o valor de mercado mundial do hidrogênio correspondeu à monta de USD 136 bilhões em 2020. No entanto, esse hidrogênio utilizado é considerado um hidrogênio cinza, pois a fonte primária de energia é o gás natural, ou seja, emissora de GEE's. Dessa forma, estudos reforçam a proposta de produção do hidrogênio para esses processos industriais citados, a partir de fontes renováveis, produzindo assim o hidrogênio verde. (EPE, 2021a)

Além desses processos, o hidrogênio pode ser desenvolvido para consumo nos setores de transporte, através das células a combustível, e para a geração elétrica através do suporte de armazenamento de energia. (EPE, 2021a) A produção do hidrogênio pode ocorrer por diversos métodos, mas a eletrolise da água é entendida como um dos métodos mais promissores, sendo importante uma compreensão sobre o funcionamento do eletrolisador. (DINCER, 2012)

A partir de água e energia elétrica, os eletrolisadores produzem os gases oxigênio e hidrogênio e, alinhado com a perspectiva de produzir o hidrogênio de "cor verde", o insumo de eletricidade para eletrolisador deve provir de uma fonte renovável de energia, com foco principal para a solar fotovoltaica e eólicas *onshore* e *offshore*.

Em suma, estudos que promovam uma análise mais profunda sobre o potencial do hidrogênio, em especial, a sua produção por meio da eletrólise com eletrolisador suprido por uma fonte renovável devem ser intensificados na literatura a fim de entender essa alternativa de transição energética sob diversos aspectos: técnicos, sociais, ambientais e econômicos.

1.1 Objetivos

Como objetivo principal, este trabalho avalia o suprimento de eletricidade por aerogeradores *offshore* a um eletrolisador. Como objetivos específicos:

- Aprofundar os conceitos que permeiam às tecnologias de produção do hidrogênio verde, desde a geração de eletricidade até a produção do hidrogênio;
- Descrever os componentes necessários aos sistemas de geração de energia;
- Levantamento de cenários e esquemáticos de simulação;
- Realizar a integração das informações de carga e de geração no HOMER© ; e
- Validação dos modelos e apresentação dos resultados obtidos.

1.2 Organização do trabalho

A partir da fundamentação teórica até os resultados obtidos, o trabalho está estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 1 é apresentado o contexto do tema a ser abordado, as justificativas de escolha e a relevância do estudo.

No Capítulo 2 é feita a fundamentação teórica dos conceitos e características que

permeiam a geração de eletricidade por fonte eólica, os sistemas não conectados à rede de energia, os métodos de produção de hidrogênio verde e os modelos de armazenamento de energia.

No Capítulo 3 é abordada a metodologia de construção do estudo de caso, com os dimensionamentos dos componentes, discretização dos esquemáticos simulados e apresentação dos ambientes de simulação.

No Capítulo 4 são ilustradas as análises técnicas de geração e dos parâmetros econômicos para cada esquemático simulado.

No Capítulo 5 são explicitadas as conclusões dos resultados obtidos, as interpretações da autora, as aprendizagens e sugestões para perpetuação do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Neste capítulo serão abordados os conceitos atrelados a energia eólica, o princípio de funcionamento dos sistemas *off-grid*, a tecnologia do hidrogênio verde e explicar sobre os tipos de armazenamento de energia atrelados ao hidrogênio e os excedentes de energia eólica.

2.1 Energia eólica

Para esta primeira seção serão abordados os conceitos de energia eólica, as características dos parques eólicos *onshore* e *offshore*, bem como o cenário dessa fonte de energia no Ceará, finalizando com uma explicação sobre o funcionamento de um parque eólico *offshore*.

2.1.1 Conceituação

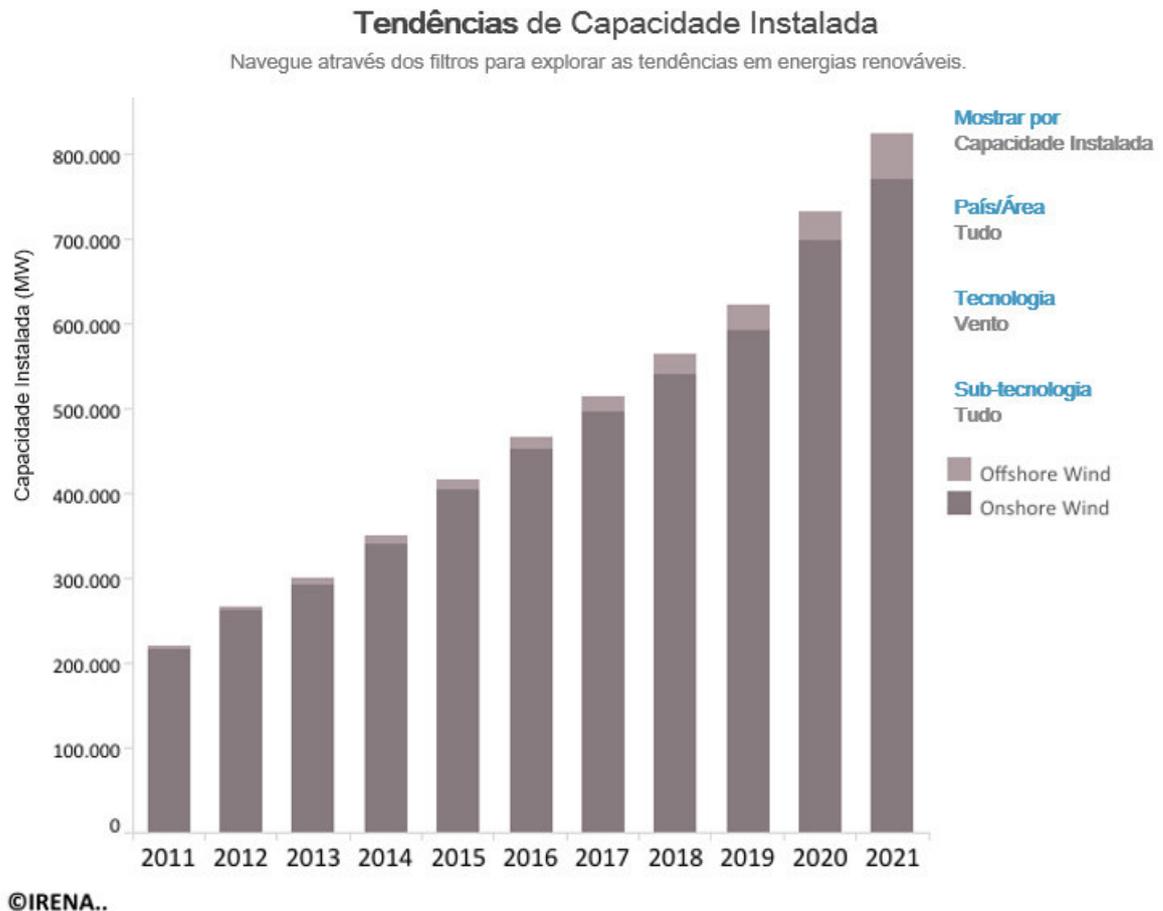
A irradiação solar incide no planeta de forma heterogênea, gerando zonas de baixa pressão e de alta pressão. A presença dessas zonas promove a circulação de massas de ar na atmosfera, o vento. A energia que advém da circulação dessas massas de ar (cinética do vento) é chamada de energia eólica. (IBERDROLA, c2022b) O aproveitamento dessa energia não é recente, pois a energia cinética atrelada ao vento pode ter permitido o deslocamento de grandes embarcações ao redor do mundo na idade média. (BRASILEIRO, 2001) Dessa maneira, pode-se afirmar que o homem conseguiu atravessar oceanos com essa fonte de energia.

Por meio do acoplamento de diversos componentes principalmente na figura do aerogerador, essa energia cinética pode ser transformada em energia elétrica, sendo essa um dos principais recursos para o desenvolvimento econômico de um país. (GRANGEIRO, 2012)

Segundo IRENA (c2022) da International Renewable Energy Agency -Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), a capacidade instalada mundial em energia eólica para a sub-tecnologia *onshore* aumentou de 216.346 MW em 2011 para 769.196 MW em 2021, um crescimento de 256% e para sub-tecnologia *offshore* aumentou de 3776 MW em 2011 para 55678 MW em 2021, um crescimento de 1375%. A figura 1 ilustra os dados para a capacidade instalada para todas as reuniões com dados disponíveis no mundo com filtro na tecnologia de cinética do vento.

Por ser uma das fontes de energia renovável em ascensão de capacidade instalada no mundo, ela é um importante vetor na transição energética mundial para um ambiente com menor índice de emissões de gases estufas - como o gás carbônico e o gás metano. (SILVA, 2019)

Figura 1 – Crescimento da capacidade instalada no mundo em energia eólica de 2011 a 2021.



Fonte: (IRENA, c2022) - Adaptada pela autora

Além disso, a forma de utilizar a energia eólica é por meio da sua conversão em energia elétrica e, para isso, é necessário uma estrutura que comporte todos os componentes que viabilize essa transformação de energia. Essas estruturas podem estar dispostas em terra através de um parque eólico *onshore* ou dispostas no mar através de um parque eólico *offshore*. Na próxima subseção traremos um pouco mais de detalhes sobre cada um desses parques, sendo o parque eólico *offshore* o objeto de estudo desse trabalho.

2.1.2 Parques eólicos onshore e offshore

As diferenças entre os parques eólicos terrestres e os parques com aerogeradores dispostos sobre o mar vão além da disposição espacial. A velocidade do vento, a rugosidade da superfície, a tecnologia das turbinas, os impactos ambientais, os investimentos financeiros pré e pós implementação e os critérios de implementação e de operação são alguns dos pontos que os diferem. (FILHO, 2011)

Para uma análise do recurso eólico no Brasil, Lima (2015) e Marinho (2020) afirmam que o comportamento do vento em áreas terrestres sofrem mais interferências do que em áreas marítimas, principalmente pelas influências das edificações e do terreno irregular, sendo a rugosidade do mar bem inferior à rugosidade em terra.

Sobre os impactos ambientais e sociais existem estudos mais aprofundados a esse tópico como é possível encontrar em STAUT (2011) e Grangeiro (2012). No entanto é possível sintetizar que os impactos ambientais de um parque eólico *onshore* estão atrelados principalmente a poluição sonora, ao sombreamento devido à movimentação das pás e a erosão de dunas influenciada pela dinâmica de ventos nos arredores das torres. No que tange aos impactos sociais, existe uma delicada questão fundiária acerca dos terrenos que abrigam essas torres, como abordado em STAUT (2011).

No Brasil ainda não existem parques eólicos *offshore* em operação, mas a partir de usinas em funcionamento na Europa e estudos de licenciamento ambiental feitos por projetos que buscam a autorização, hoje, pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). STAUT (2011) afirma que os impactos estão atrelados a intervenção na base do mar e Viterbo (2008) cita que a influência do movimento das pás pode afetar a migração de algumas espécies de pássaros. No anexo A consta o Termo de Referência para Estudo de Impacto Ambiental (EIA)/Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para o tipologia Complexos Eólicos Marítimos *offshore*. O documento traz as diretrizes para o EIA/RIMA e, especificamente, na seção 8 (Análise dos Impactos Ambientais) é possível destacar alguns dos impactos atrelados a empreendimentos desta topologia com o aspecto ambiental e seus efeitos.

Em relação aos investimentos pré e pós implementação, Trapp (2009) traz uma distribuição dos principais custos de um parque eólico onshore e offshore. Sendo a turbina o principal custo *onshore* com 75,6% de influência e *offshore*, a parcela da turbina diminui para 47%, pois os gastos com fundação, infraestrutura elétrica e planejamento de desenvolvimento são mais expressivos.

Para a implementação de um projeto eólico *offshore* é necessário obter o licenciamento ambiental do empreendimento, sendo necessário o estudo EIA/RIMA direcionado ao IBAMA.(TEIXEIRA, 2020)

Em ONS (2022b) do Operador Nacional do Sistema (ONS) com Programa Mensal de Operação (PMO) de 202206 com o ano de referência em 2021, o subsistema Nordeste tem a capacidade instalada em projetos eólicos de 18.255 MW, representando uma geração de energia

mensal média de 5.331 MWh que alimenta cargas tanto no nordeste quanto exporta para os subsistemas Sudeste/Centro-oeste e Norte. Na figura 2 é mostrado o cenário de capacidade instalada para o subsistema Nordeste e a figura 3 mostra a geração de energia mensal no subsistema Nordeste.

Figura 2 – Capacidade instalada de fonte eólica no Sistema Interligado Nacional.

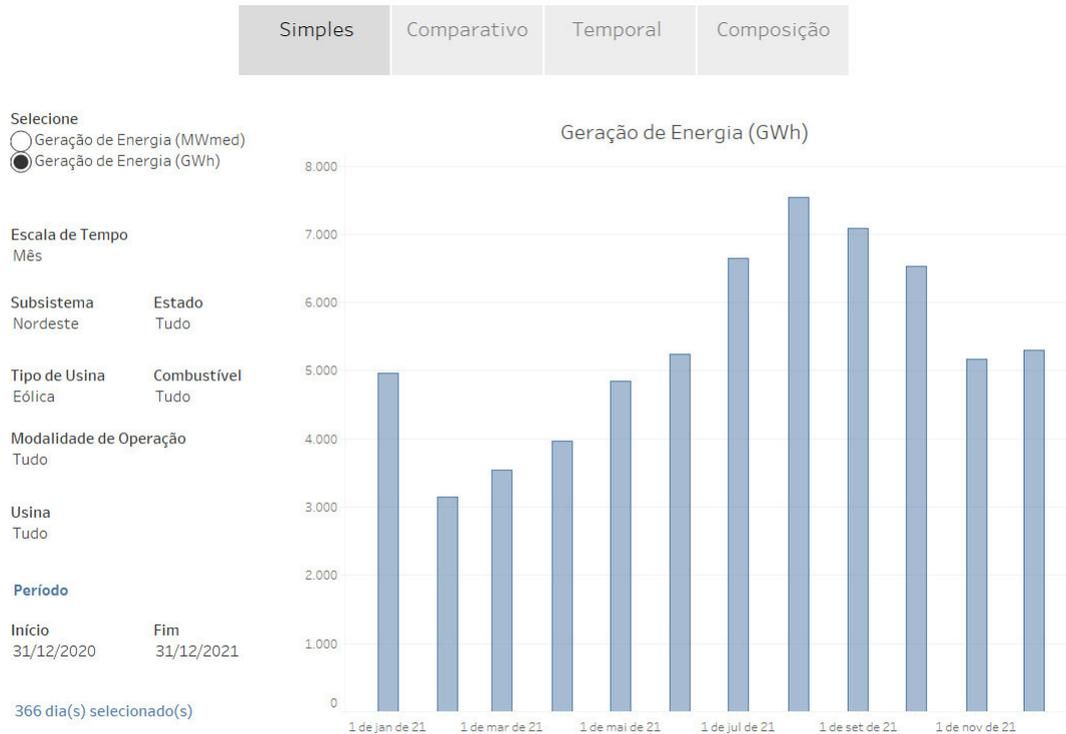


Fonte: (ONS, 2022b)

As diretrizes atuais no Brasil foram baseadas em experiências e em estudos com parques eólicos offshore no exterior, principalmente na Europa, o que leva a algumas discussões de incompatibilidade de localidades para tais inspirações, como afirma em EPE-EMPRESA (2020).

Depois desse breve contexto sobre os parques eólicos *onshore* e *offshore*, vale

Figura 3 – Geração de energia eólica para o subsistema Nordeste.



Fonte: (ONS, 2022a)

aprofundar mais sobre a posição do Ceará frente a essa importante fonte renovável de energia.

2.1.3 Cenário da Energia Eólica no Ceará

O Ceará é 3º estado da região nordeste em extensão territorial. Ocupa uma área de 148.286 quilômetros quadrados e faz divisa com os estados do Rio Grande do Norte, Piauí, Paraíba e Pernambuco. O clima é predominantemente tropical com temperaturas que variam entre 26 e 28 graus Celsius na maior parte do ano. (EDUCAÇÃO, c2022)

Analisando com mais detalhes a localidade do nosso parque de estudo com o auxílio do Atlas Eólico e Solar do Ceará em al. (2019a), é possível inferir que a velocidade do vento no Pecém, CE para uma altura de referência de 100 metros é de 8,0 m/s e de 8,5 m/s a 150 metros de altura. Como afirma Grangeiro (2012), o comportamento do vento no Ceará trouxe e traz investimentos em energia renovável para o estado. No cenário da energia eólica, outras características também fomentam os investimentos para o estado como:

- A boa infraestrutura portuária;
- Empresas estabelecidas no estado para a produção de pás eólicas como a Aeris e a Vestas;

- Empresas estabelecidas no estado para a instalação e gerenciamento de instalação como a Makro Engenharia.

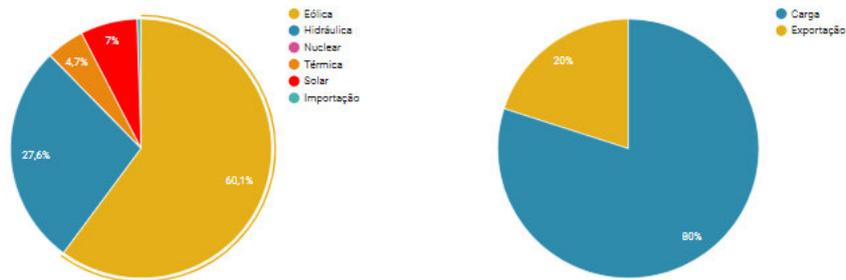
Os pontos listados acima estão contidos na apresentação Ceara (2021) intitulada como Potenciais do Estado do Ceará para Produção de Hidrogênio Verde.

A geração de energia elétrica no Nordeste e no Ceará se caracteriza por uma dominância da energia eólica. Na figura 4 é mostrado o retrato do Energia Agora disponível em ONS (2022a) para o acumulativo do dia 15/05/2022 até às 21h25min.

Figura 4 – Geração de energia elétrica acumulativa no subsistema Nordeste para o dia 15/05/2022 até às 21h25min.



Valores acumulados no dia em MWmed até: 21:25



Fonte: (ONS, 2022a)

Os gráficos mostram a predominância de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis. Em primeiro lugar, por energia eólica com 60,1 %, em seguida pelas hidrelétricas com 27,1 % e depois por solar com 7,0%. Além de conseguir suprir a sua demanda de carga, 20% da geração é exportada para o SIN.

O cenário da geração de energia eólica no Ceará *onshore* possui uma capacidade instalada de 2,5 GW, dispostos em 99 parques eólicos ligados ao SIN - Sistema Interligado

Nacional. A geração de energia eólica consegue suprir o consumo cearense e o excedente é utilizado em outras regiões brasileiras. Existem trabalhos acadêmicos como Magalhaes (2021) que avalia a utilização desses excedentes para alimentação de eletrolisadores em usinas de hidrogênio, sendo esse o hidrogênio verde.

Para a tecnologia dos parques *offshore* existem 11 projetos em licenciamento ambiental no IBAMA localizados no Ceará, sendo o Projeto BI Caucaia o mais antigo, iniciado em 2016, e os mais recentes foram instaurados depois do decreto nº 10.946/2022, de 25 de janeiro de 2022. O conjunto desses projetos resultam em uma capacidade instalada de 26942 MW. No entanto, os projetos se sobrepõem em algumas localidades, representando um confronto entre as donas dos projetos para utilização e exploração desses espaços. A relação atual dos projetos e suas principais características estão dispostos no Anexo B para maiores detalhes. Na figura 5 estão dispostas as informações dos parques eólicos *offshore* no Ceará e no anexo B é destacado o mapa dos processos de licenciamento ambiental de eólicas *offshore* abertos no IBAMA até 20 de abril de 2022. A data FCA destaca a data em que o projeto é parcial ou totalmente sobreposta à poligonal de empreendimento com FCA mais antiga.

Figura 5 – Dados Técnicos dos projetos de parques eólicos *offshore* em processo de licenciamento no IBAMA. Última atualização em 20 de abril de 2022.

Código	Empreendimento	Empreendedor	Processo	Data FCA	Aerogerador	Potência Unitária (MW)	Quantidade	Potência Total (MW)
CE-01	Caucaia - Bi Energia	Bi Energia Ltda	02001.003915/2016-68	10/08/2016	Haliade-X	12	48	576
CE-03	Jangada	Neoenergia Renováveis SA	02001.035371/2019-46	27/01/2020	WTG-15.0-246	15	200	3000
CE-04	Camocim	Camocim Eirelli	02001.015445/2020-61	06/07/2020	Haliade-X	12	100	1200
CE-05	Dragão do Mar	Qair Marine Brasil	02001.015184/2021-61	22/07/2021	MHI Vestas 174	9,5	128	1216
CE-06	Alpha	Alpha Wind Morro Branco	02001.018580/2021-40	01/09/2021	V236-15MW	15	400	6000
CE-07	Costa Nordeste	Geradora Eólica Brigadeiro I	02001.001545/2022-72	21/01/2022	V236-15.0MW	15	256	3840
CE-08	Asa Branca I	Eólica Brasil	02001.001606/2022-00	23/01/2022	VESTAS V236	15	72	1080
CE-09	Sopros do Ceará	Totalenergias Petroleo&Gas	02001.004068/2022-05	17/02/2022	V236-15.0 MW	15	200	3000
CE-10	Projeto Pecém	Shell Brasil	02001.006219/2022-51	16/03/2022	SG-14-222-DD	14	215	3010
CE-11	Projeto Colibri	Equinor Brasil Energia	02001.008207/2022-61	05/04/2022	Turbog.15 MW	15	134	2010
CE-12	Projeto Ibitucatu	Equinor Brasil Energia	02001.008209/2022-51	05/04/2022	Turbog.15 MW	15	134	2010

Fonte: Elaborado pela autora com dados do (IBAMA, 2022)

Na próxima subseção serão introduzidos os principais componentes dispostos num parque eólico *offshore* e como eles operam em conjunto para garantir a transformação da energia dos ventos em energia elétrica.

2.1.4 Funcionamento Parque Eólico Offshore

De modo análogo ao que ocorre com os parques eólicos *onshore*, o processo de conversão de energia num parque *offshore* inicia pela captação da cinética do vento pelas pás dispostas no topo das torres. O eixo das pás é acoplado junto a uma caixa multiplicadora de velocidade que transmite ao rotor da turbina uma velocidade de rotação significativa para gerar tensão elétrica. A tensão gerada pelas pás passa por um transformador elevador para reduzir as perdas na transmissão até a subestação. (PORTUGUÊS, c2022).

A subestação que recebe os cabos provindos da torre eólica pode ser do tipo marítima ou do tipo terrestre. Na subestação está o elemento responsável por elevar a tensão a ser transmitida. A escolha pela subestação marítima, normalmente, ocorre devido aos custos com cabos submarinos até a costa, uma tensão mais elevada faz necessário cabos com melhor isolamento, logo mais caros. A subestação terrestre, normalmente, é escolhida quando o custo com os cabos de transmissão até ela é mais vantajoso do que o custo com a construção de uma subestação marítima. Para a fase de Instalação e Descomissionamento, cerca de 41% dos custos dessa fase do projeto refere-se aos custos com os cabos e a subestação. (IOANNOU *et al.*, 2018)

Para introduzir a energia provinda geração renovável ao Sistema Interligado Nacional (SIN) é necessário alguns estudos de impactos dessa geração flutuante no sistema interligado nacional. Um dos principais impactos causados pelas turbinas eólicas são as elevadas componentes harmônicas e a injeção delas no sistema é indesejável. (EPE-EMPRESA, 2020)

Para colocar um parque eólico tanto *onshore* quanto *offshore* em operação, alguns passos de implementação são necessários. Eles são sintetizados abaixo: (SILVA, 2016)

1. Um estudo sobre o recurso eólico da região é o primeiro passo para que possa ser escolhido o local com melhor aproveitamento do vento. Importante ressaltar que a análise deve abranger diferentes períodos do ano;
2. A seleção de um aerogerador adequado a sua aplicação;
3. Estudos de impactos ambientais e sociais nas localidades candidatas. O IBAMA exige os estudos EIA/RIMA para avaliar as influências na região e dar um parecer sobre autorização ou não de realização das atividades;

4. Receber as autorizações do IBAMA para a implementação e a operação do empreendimento;
5. Estudo do melhor ponto de conexão com o SIN;
6. Estudos sobre o investimento e o retorno financeiro do empreendimento;e
7. Estudo de impactos ao SIN e o levantamento das possibilidades de transmissão e de conexão as subestações da rede, para os sistemas *on-grid*.

Com a expansão das energias renováveis na rede de energia, a conexão com o Sistema Interligado se torna um estudo singular e de muita relevância. No entanto, o aprofundamento desses impactos não será realizado no escopo deste trabalho. Na próxima seção será abordado com mais detalhes sobre os sistemas não conectados a rede ou sistemas *off-grid*.

2.2 Sistemas *off-grid*

Para esta segunda seção serão abordados o funcionamento dos sistemas (*on-grid* e *off-grid*), as principais características e os componentes para cada conexão, os parâmetros de conexão entre a geração e a carga, sendo a nossa carga ilustrada pelo eletrolisador, principalmente.

2.2.1 Conceituação: sistemas *on-grid* e *off-grid*

Na tradução literal do termo, um sistema *on-grid* é um sistema conectado à rede de energia elétrica, em especial no Brasil, é um sistema conectado ao SIN. Por outro lado, um sistema *off-grid* é um sistema que não está conectado à rede de energia elétrica, podendo ser colocado na literatura como um sistema isolado. Essas duas terminologias ganharam mais visibilidade no vocabulário técnico do mundo das energias renováveis a medida que a geração distribuída ganhou mais espaço no mercado. Segundo Silva *et al.* (2020), a geração distribuída se caracteriza pela produção de energia elétrica aquém dos centros de geração e de distribuição. A produção ocorre mais próximo das cargas e, muitas vezes, nos telhados das residências com o uso da energia solar fotovoltaica.

2.2.2 Princípio de funcionamento

O uso de sistemas isolados ou não conectados a rede são utilizados, principalmente, em áreas mais remotas, onde os custos atrelados a extensão das linhas de transmissão são altos ou pela inviabilidade de acesso à rede nessas localidades. Em alternativa, a energia elétrica chega a esses locais por meio de geradores a diesel instalados localmente. Essas máquinas utilizam a queima de um combustível fóssil para gerar energia elétrica, semelhante ao motor de um carro. Segundo Olatomiwa *et al.* (2015) e Acharya e Dutta (2013), sistemas *off-grids* em locais mais distantes requerem manutenção regular, alto consumo de combustível e custos elevados com operação e com transporte. A ilha de Fernando de Noronha é um grande exemplo em que se utilizava somente geradores a diesel antes da implementação do primeiro gerador eólico no Brasil em 1992. Em Brasil (2021) é mostrado um pouco do histórico da implementação dos primeiros aerogeradores na ilha para complementar os geradores a diesel e em Iberdrola (c2022a) é mostrado que 10% da energia do arquipélago, hoje, provêm de fontes solar fotovoltaica com economia de cerca de 12000 litros de diesel consumidos ao mês.

Ao observar o Atlas Brasileiro de Energia Solar em al. (2019b) e o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro al. (2019c), é possível afirmar que existem mais localidades propensas ao aproveitamento do potencial solar do que ao potencial eólico. Sendo esse um dos motivos que justifica a expansão dos sistemas *off-grid* ser mais acentuada com a utilização da energia solar fotovoltaica como fonte de energia (exclusiva ou em sistemas híbridos que utilizam a energia solar fotovoltaica em conjunto com geradores eólicos) do que a utilização somente da energia eólica como fonte. Sendo ligado ou não à rede de energia, sempre vale considerar quais são os critérios que tornam ou não viável técnico e economicamente a utilização de um dos sistemas. Existem *softwares* como o HOMER, que simula cenários de modelos de fonte híbrida de energia e avalia parâmetros técnicos e econômicos que direcionam para o melhor arranjo do ponto de vista econômico.

No que tange a componentes necessários para o funcionamento de um sistema isolado e não-isolado com fonte de energia renovável, na tabela 1 são ilustrados os principais equipamentos e componentes para diferentes configurações de sistema.

Os módulos fotovoltaicos e os geradores eólicos são os equipamentos que transformam a energia do recurso renovável em energia elétrica. Os módulos transformam a energia da radiação solar em energia elétrica e os geradores eólicos utilizam a cinética do vento para tal. Os inversores são utilizados, principalmente, em conjunto com os módulos fotovoltaicos,

Tabela 1 – Componentes necessários para diferentes configurações de sistemas isolados e não-isolados

Configuração do sistema	Subdivisão	Componentes necessários
Sistema isolado com fonte solar fotovoltaica.	-	Módulo fotovoltaico, inversor, controlador de carga e banco de baterias.
Sistema isolado com fonte eólica (com armazenamento).	Gerador eólico CC	Inversor, controlador de carga e banco de baterias.
	Gerador eólico CA	Retificador, controlador de carga e banco de baterias.
Sistema isolado com fonte eólica (sem armazenamento)	Gerador eólico CC	Inversor
	Gerador eólico CA	-
Sistema não-isolado com fonte solar fotovoltaica.	-	Módulo fotovoltaico e inversor.
Sistema não-isolado com fonte eólica.	Gerador eólico CC	Inversor.
	Gerador eólico CA	Retificador, controlador de carga e banco de baterias.

Fonte: Elaborada pela autora

pois como a corrente gerada é contínua e as cargas são alimentadas, normalmente, em corrente alternada, faz-se necessário a utilização desse conversor. Os geradores eólicos trabalham em corrente alternada, mas o armazenamento por baterias requer um suprimento em corrente contínua, necessitando do acoplamento de um retificador. (BOSO *et al.*, 2015)

Os controladores de carga são equipamentos utilizados para monitorar tanto as cargas e descargas da bateria, garantindo uma maior vida útil para elas como também são responsáveis por evitar a sobrecarga do sistema autônomo. Esse equipamento não se faz necessário em sistemas *on-grid* pois o armazenamento é feito por meio de créditos na rede elétrica, sem uso de baterias.(BOSO *et al.*, 2015)

Para finalizar existe o banco de baterias como um importante componente num sistema isolado, principalmente, para compensar as variações da fonte renovável. O dimensionamento dos bancos de baterias levam em consideração a autonomia que se deve ter mesmo em baixa produção do sistema, atentando que quanto maior a autonomia do banco de baterias para suprir as cargas prioritárias, maior é o custo de investimento para esse banco de baterias. Na seção 2.4. serão explorados algumas formas de armazenamento de energia elétrica.

Na próxima subseção deste capítulo será mostrado uma breve ilustração do cenário da energia eólica frente a um sistema *off-grid*.

2.2.3 Aproveitamento da energia dos ventos não conectado à rede

A utilização da energia eólica num sistema *off-grid* é menos incidente do que a utilização dela num conjunto híbrido ou num sistema puramente alimentado por uma fonte

solar fotovoltaica. O texto escrito por Livia Carvalho intitulado *Energia eólica em casa: como produzir e quanto custa a instalação* traz os seguintes dados:

De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) fornecidos pelo Sindicato das Indústrias de Energia e de Serviços do Setor Elétrico no Ceará (Sindienergia-CE), de 2008 a 2021 o Ceará conta com 27 mini usinas em oito municípios, as quais abastecem 90 unidades, já que uma usina pode fornecer energia para mais de uma residência.

No mesmo texto, algumas percepções do Professor entrevistado Raphael Amaral do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará apontam a adaptabilidade da eólica aos espaços urbanos, os ruídos das hélices e o custos com manutenção como alguns fatores que dificultam a expansão da produção em casa de energia elétrica por meio da energia eólica. (CARVALHO HOWPUBLISHED=Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/energia-eolica-em-casa-como-produzir-e-quanto-custa-a-instalacao-1.3140180>>. Acesso em: 22 de maio 2022,)

Diante de um cenário ainda escasso de aplicação da energia eólica não híbrida em sistemas isolados, a literatura também encarece de estudos sobre a utilização de parques eólicos *off-shore* para sistemas autônomos. Para o Brasil, alguns projetos ainda se encontram em fases iniciais de licenciamento ambiental e colocar esse tema em foco ainda é um desafio.

Em meio a procura por fontes alternativas de energia, o aproveitamento do potencial energético do hidrogênio vem se destacando nas discussões, principalmente, a avaliação de produção do hidrogênio verde - produção do hidrogênio a partir de fontes limpas de energia. Esse elemento químico é muito necessário em processos industriais e no transporte pode, a substituição do hidrogênio cinza pelo hidrogênio verde pode ajudar a descarbonizar uma importante da demanda mundial de energia.

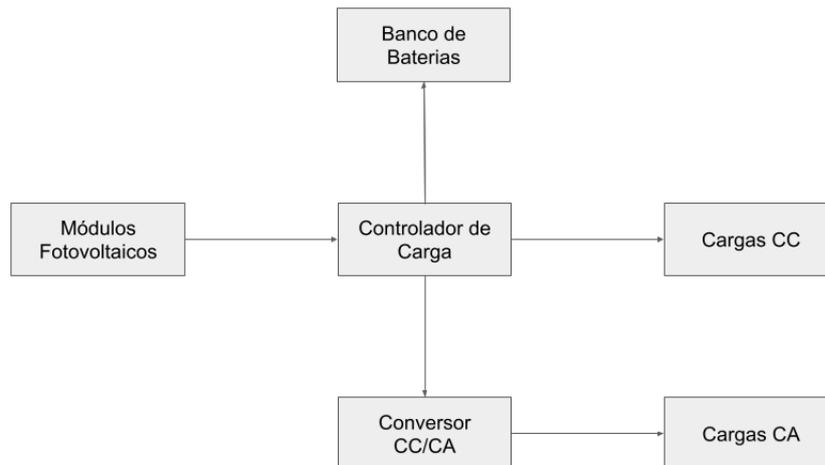
2.2.4 Parâmetros de conexão

Em subseção anterior foi possível conhecer um pouco dos componentes necessários e qual o papel deles em cada configuração. Nessa subseção serão mostradas os arranjos de conexão e algumas características deles.

A figura 6 ilustra um sistema isolado completo, pois contempla todos os componentes necessários para geração e armazenamento fora da rede da concessionária de distribuição.

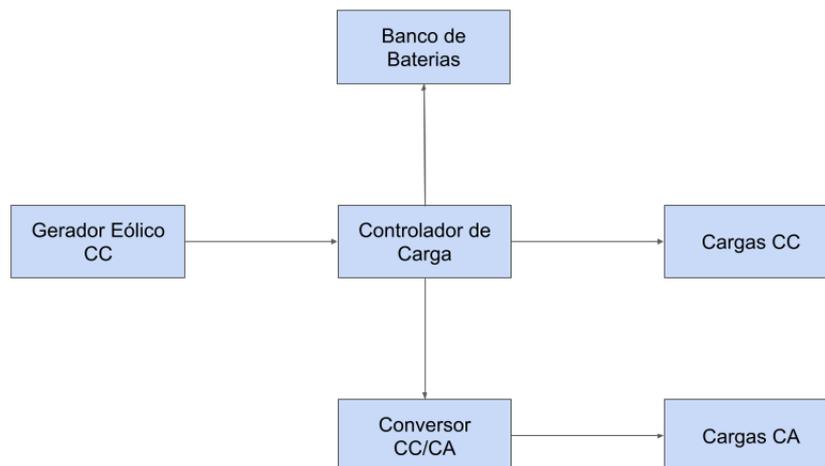
A figura 7 ilustra um sistema isolado completo, pois contempla todos os componentes necessários para geração e armazenamento fora da rede da concessionária de distribuição. Em

Figura 6 – Sistema isolado com fonte solar fotovoltaica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7 – Sistema isolado com fonte eólica com armazenamento por baterias com gerador CC.



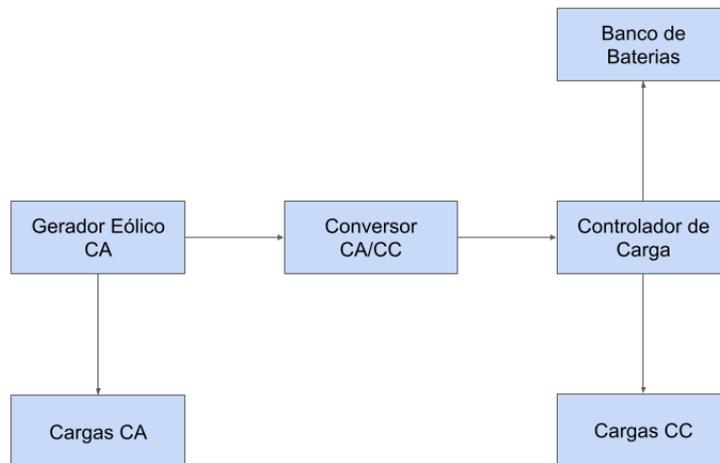
Fonte: Elaborado pela autora.

especial, essa configuração se assemelha ao primeiro arranjo pela presença de um gerador eólico em corrente contínua.

A figura 8 ilustra um sistema isolado com gerador eólico em corrente alternada, onde é possível já suprir cargas de corrente alternada, mas para o armazenamento em baterias é necessária fazer a conversão CA/CC.

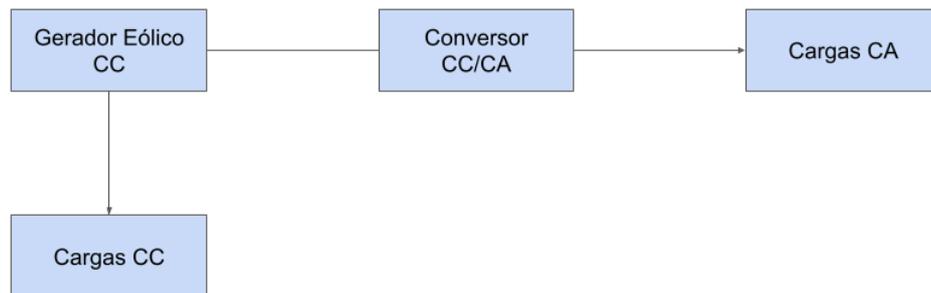
A figura 9 ilustra um sistema isolado sem armazenamento, seu funcionamento depende das condições de geração no momento de utilizar a energia gerada. Como é um gerador eólico CC, é necessário fazer a conversão CC/CA para suprir cargas CA.

Figura 8 – Sistema isolado com fonte eólica com armazenamento por baterias com gerador CA.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CC



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CA.

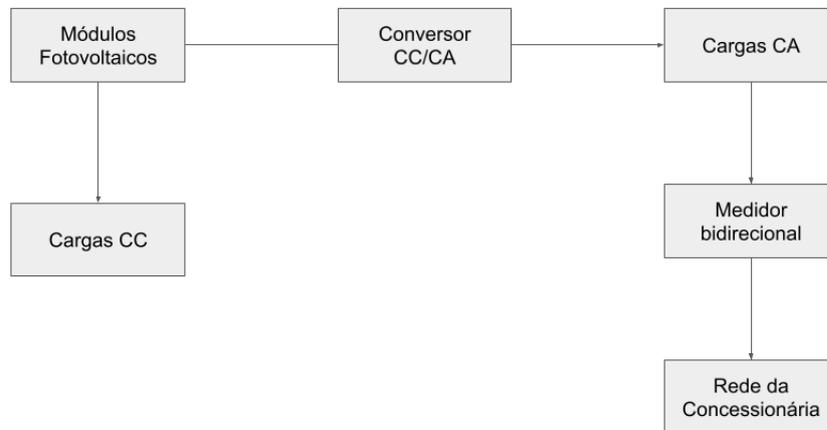


Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 10 ilustra um sistema isolado sem armazenamento, seu funcionamento depende das condições de geração no momento de utilizar a energia gerada.

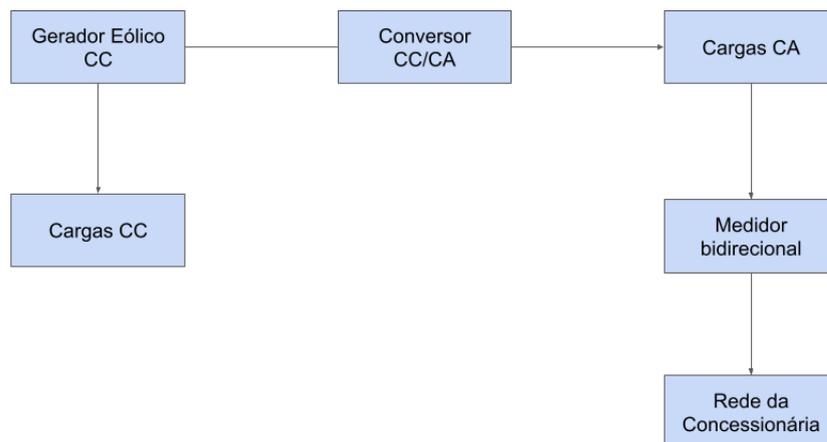
A figura 11 ilustra um sistema isolado sem armazenamento por baterias, seu funcionamento depende das condições de geração no momento de utilizar a energia gerada, podendo alimentar cargas CC ou alimentar cargas CA com o auxílio de um conversor. Os excedentes são armazenados como créditos na rede da concessionária.

Figura 11 – Sistema isolado com fonte solar fotovoltaica sem armazenamento por baterias.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CC.



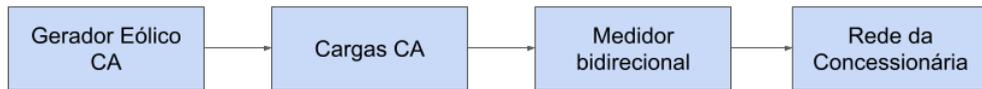
Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 12 ilustra um sistema isolado sem armazenamento, seu funcionamento depende das condições de geração no momento de utilizar a energia gerada. Seu funcionamento é semelhante ao arranjo anterior devido a utilização de um gerador eólico CC. Os excedentes são armazenados como créditos na rede da concessionária.

A figura 13 ilustra um sistema isolado sem armazenamento, seu funcionamento depende das condições de geração no momento de utilizar a energia gerada. Os excedentes são armazenados como créditos na rede da concessionária.

Existe um último arranjo bastante citado na literatura, o sistema híbrido solar eólico.

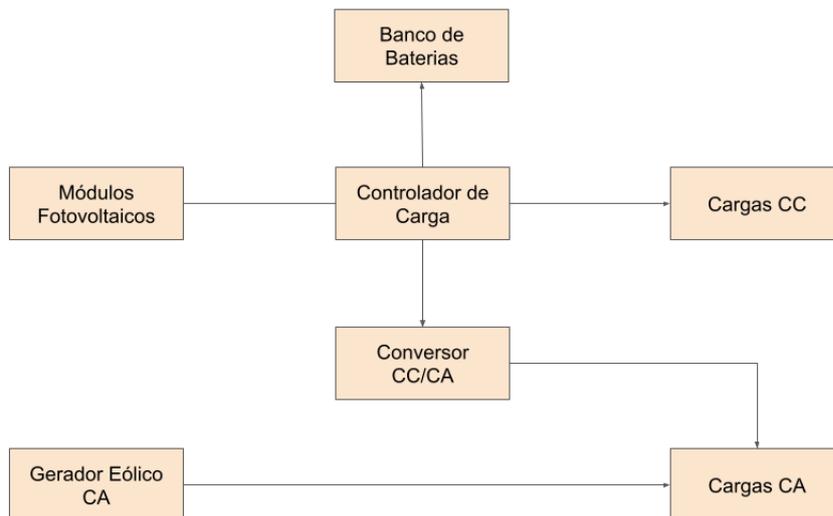
Figura 13 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CA.



Fonte: Elaborado pela autora.

A aplicabilidade desse sistema visa garantir melhores índices de geração diários através da complementariedade dessas duas fontes renováveis e melhorar a confiabilidade do sistema. A figura 14 ilustra um sistema híbrido solar fotovoltaico e seus componentes.

Figura 14 – Sistema isolado com fonte eólica sem armazenamento por baterias com gerador CA.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao apresentar os diferentes arranjos acima, vale entender um pouco mais sobre a carga que será objeto de estudo nesse trabalho, o eletrolisador.

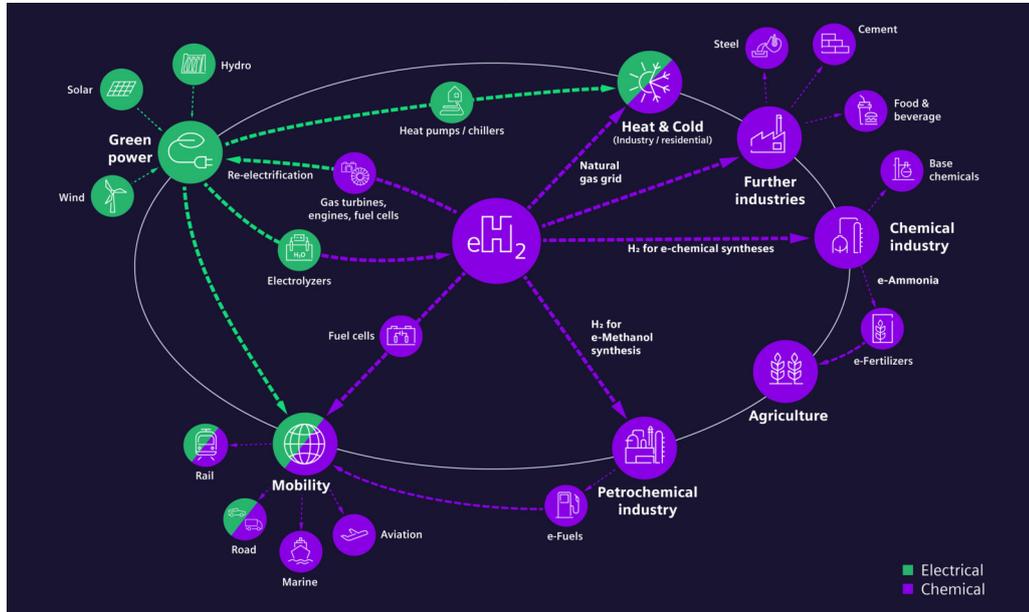
2.2.5 Conexão com o eletrolisador

Ao falar sobre transição energética mundial, o hidrogênio entra em cena como um importante vetor do processo, sendo capaz de acoplar diferentes mercados. (EPE, 2021a)

A utilização do hidrogênio perpassa diferentes setores e é atrelado ao conceito *Power to X*. Esse termo refere-se a transformação da energia para diversas aplicações. Na eletrólise, a molécula de água é quebrada e o gás hidrogênio é armazenado. O hidrogênio armazenado

pode ter diferentes usos, desde a sua utilização em reações químicas industriais ou para produzir energia elétrica através das células a combustível. Na figura 15 é ilustrado o conceito *Power to X* e suas aplicações.

Figura 15 – Setores envolvidos com a tecnologia *Power to X*



Fonte: (SIEMENS, c2022)

O eletrolisador é o dispositivo responsável por receber os recursos que torna possível a eletrólise. Os dois principais recursos nesse processo são a água e a energia elétrica. Em suma, a eletrólise é o processo eletroquímico de conversão de energia elétrica em energia química. A utilização da água entra como uma solução para se obter o hidrogênio sem resíduos de gases estufas para o meio ambiente. O processo consiste em fornecer energia elétrica para quebrar as ligações covalentes da molécula de água e liberar gás oxigênio e gás hidrogênio por meio da equação global abaixo (2.1).



Para o hidrogênio é possível aplicar a tecnologia *Power to X* e para o gás oxigênio é possível o utilizar em diversas aplicações também, inclusive em cilindros de oxigênio transportados para hospitais e até como comburente em reações de combustão industriais.

O fornecimento de energia elétrica a partir de fonte renovável para um banco de eletrolisadores será objeto de estudo nesse trabalho. A energia elétrica deve chegar com tensão constante e em corrente contínua para garantir que o eletrolisador funcione corretamente, mesmo

que a fonte de energia primária tenha variações na geração. Dessa forma, vale entender um pouco mais sobre as possibilidades de armazenamento de energia elétrica por meio de baterias.

2.3 O Hidrogênio Verde em discussão

Para esta terceira seção serão abordadas as discussões em torno da utilização do hidrogênio como vetor de energia, como se caracteriza as principais formas de produção de hidrogênio - com maiores detalhes para a eletrólise da água - e finalizar com os tipos de eletrolisadores comumente encontrados na literatura.

2.3.1 O Hidrogênio Verde como vetor energético

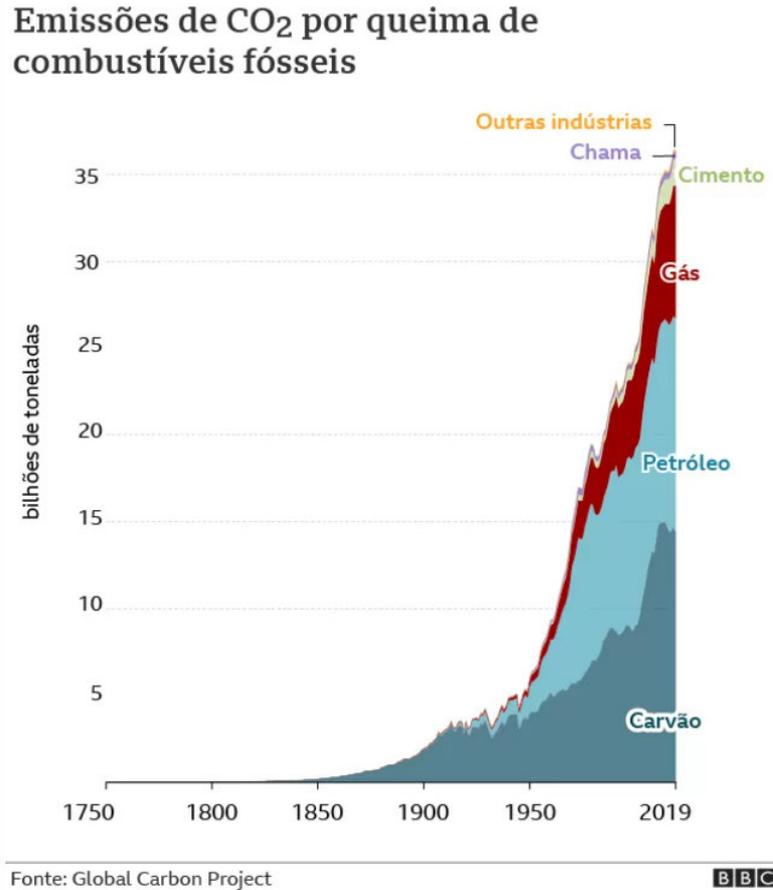
Para acompanhar o desenvolvimento tecnológico ao redor mundo, existe uma crescente demanda por energia - tanto fontes primárias quanto às fontes secundárias. Entre 2013 e 2050, espera-se um crescimento da demanda de energia em 2,2% ao ano. No que tange à eletricidade, o crescimento é de 40%.

A eletricidade é fundamental para promover o desenvolvimento econômico e tecnológico de um país. (GRANGEIRO, 2012). Nesse sentido, existe uma crescente demanda por energia que possa atender às necessidades impostas pela inserção de novos processos e novas tecnologias implementadas.

A revolução industrial marcou o início da inserção de combustíveis fósseis como fonte de energia primária. Uma fonte de energia primária é utilizada para que uma outra fonte de energia seja transformada e utilizada diretamente, por exemplo, as termelétricas funcionam sob a queima de algum combustível para gerar energia elétrica. Desde 1850 passaram cerca de 250 anos de intensa e crescente utilização desses combustíveis, como se observa na figura 16 com o aumento acentuado de emissões de CO₂.

Apesar de ser competitivamente atrativo, de possuir um grande poder calorífico e de garantir uma alta disponibilidade de energia para os consumidores, os impactos ambientais e o esgotamento das reservas de combustíveis fósseis são os principais pontos sensíveis sobre a utilização deles. No que tange aos impactos ambientais, existe um destaque para a emissão de gases, produtos do processo de queima, que aceleram o efeito estufa e o aumento da temperatura do planeta terra, o que pode dificultar a vida em gerações futuras. Sobre o esgotamento das reservas, já existem estudos que afirmam que as reservas devem durar somente 200 anos e uma

Figura 16 – Emissões de Gás Carbônico por queima de combustíveis fósseis.



Fonte: (BRASIL, 2021)

mudança dessa ser tomada o quanto antes. (SILVA; DANTAS, 2016) e (CARDOSO, 2014).

Diante desse cenário, após a COP21 que ocorreu em 2015 foi assinado, em 2016, o Acordo de Paris entre 195 países com os seguintes objetivos (MAGALHÃES, c2022):

O Acordo de Paris tem como principal objetivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa para limitar o aumento médio de temperatura global a 2°C, quando comparado a níveis pré-industriais. Mas há várias metas e orientações que também são elencadas no acordo, tais como:

esforços para limitar o aumento de temperatura a 1,5°C;

recomendações quanto à adaptação dos países signatários às mudanças climáticas, em especial para os países menos desenvolvidos, de modo a reduzir a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos;

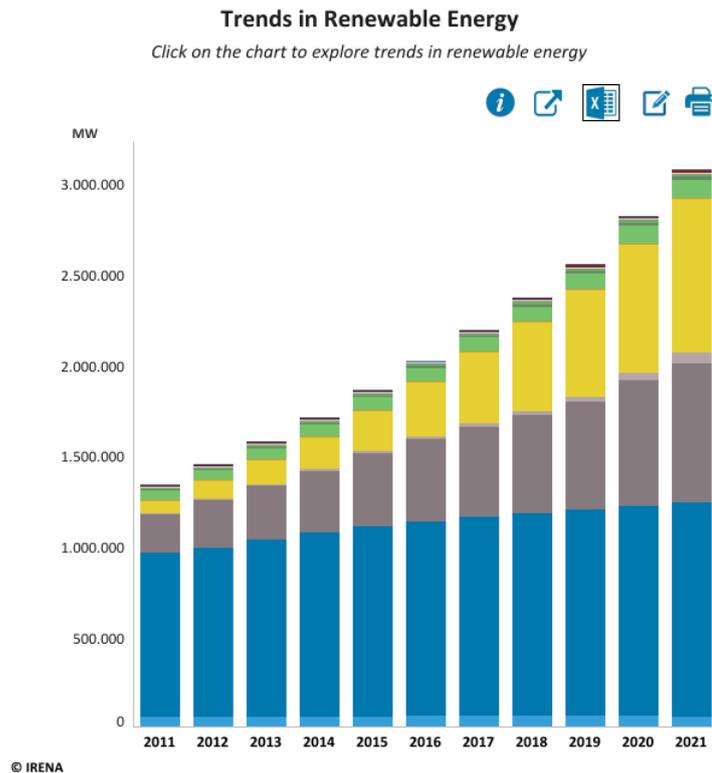
estimular o suporte financeiro e tecnológico por parte dos países desenvolvidos para ampliar as ações que levam ao cumprimento das metas para 2020 dos países menos desenvolvidos;

promover o desenvolvimento tecnológico e transferência de tecnologia e capacitação para adaptação às mudanças climáticas;

proporcionar a cooperação entre a sociedade civil, o setor privado, instituições financeiras, cidades, comunidades e povos indígenas para ampliar e fortalecer ações de mitigação do aquecimento global.

As fontes de energias renováveis ganham cada vez mais espaço para conseguir substituir uma demanda predominantemente não-renovável, pois o recurso natural é renovável e não gera poluentes ao meio ambiente. Na figura 17 é observado um aumento de capacidade instalada e da geração de energia por meio de fontes como: hidroelétricas (tons de azul), solar (amarelo), bioenergia (verde) e a as eólicas *on* (cinza mais escuro) e *offshore* (cinza mais claro).

Figura 17 – Participação crescente das energias renováveis.



Fonte: (IRENA)

Em meio a esse cenário, surge o hidrogênio como um vetor de transição energética, ou seja, sua participação vai representar um forte concorrente para as fontes não-renováveis. Isso será promovido pelas características inerentes ao elemento “hidrogênio” e a capacidade de armazená-lo. O armazenamento é feito através da produção de hidrogênio em momentos de pico de geração com os excedentes de energia para utilizar em momentos de picos de demanda, ajudando na confiabilidade do sistema elétrico, por exemplo. Alguns detalhes sobre o armazenamento do hidrogênio serão abordados na próxima seção.(SILVA; DANTAS, 2016)

Além da utilização do hidrogênio como “armazenador de energia”, ele é utilizado em outros setores como: transporte de cargas, avião, na indústria como componente em processos industriais e através de compostos como amônia que serve de base para fertilizantes na agricultura.

O hidrogênio pode ser classificado em cores, de acordo com o processo de produção. A figura 18 ilustra as cores existentes, em destaque são mostrados o hidrogênio azul e o hidrogênio verde.

Figura 18 – Classificação de hidrogênio em escada de cores.

Cor	Classificação	Descrição
■	hidrogênio preto	produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS
■	hidrogênio marrom	produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	hidrogênio cinza	produzido do gás natural sem CCUS
■	hidrogênio azul	produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis) com CCUS
■	hidrogênio verde	produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água.
□	hidrogênio branco	hidrogênio natural ou geológico
■	hidrogênio turquesa	produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO ₂
■	hidrogênio musgo	produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica

Fonte: EPE (2021a)

O hidrogênio azul se caracteriza pelo resgate de carbono através de tecnologias que resguardem esse carbono já liberado em processos industriais. No entanto, o hidrogênio verde é aquele que é obtido diretamente por uma fonte de energia renovável, ou seja, a emissão de carbono é zero. Apesar de parecer simples, as nuances entre as cores do hidrogênio levam a importantes e complexas discussões sobre a certificação do hidrogênio produzido.

Vale ressaltar que existem algumas empresas na Europa que afirmam que a promoção de desenvolvimentos tecnológicos voltados para o hidrogênio azul antes do hidrogênio verde pode dar ganho de escala a utilização do hidrogênio como combustível. (ERBACH; JENSEN, 2021)

A terminologia *Power to X* refere-se, principalmente, a versatilidade de utilização do hidrogênio, podendo ser utilizado: diretamente em processos industriais ou em compostos químicos, como combustível para os transportes de carga, de aviação e domésticos através do uso das células a combustível; como armazenador de energia elétrica, podendo ser exportado e convertido de volta para energia elétrica. Apesar de todas essas aplicações, a análise de perdas de potência e os custos atrelados devem ser avaliados antes da substituição dentro de um setor. Na imagem 19 está ilustrada esse conceito do *Power to X* e o intercâmbio do hidrogênio.

Figura 19 – O intercâmbio do hidrogênio atrelado ao conceito *Power to X*.



Fonte: (VERDE, c2022)

Na próxima subseção será abordada um pouco mais sobre os principais processos de geração de hidrogênio verde e dar mais detalhes sobre a evidência da eletrólise da água nas discussões.

2.3.2 Produção de hidrogênio verde

Com o contexto de inserção do hidrogênio como vetor de transição energética apresentado, o estudo é aqui continuado para entender um pouco mais sobre os métodos de produção de hidrogênio verde. A tabela 2 é retirada do trabalho Dincer (2012) e apresenta métodos de produção de hidrogênio verde por eletrólise, especificando a fonte de energia verde e uma descrição do processo de conversão. Para outros métodos de produção, consultar o anexo C.

O processo de eletrólise da água e a reforma do etanol são os principais meios de produção considerável e sustentável de hidrogênio. (SILVA; DANTAS, 2016) No que tange ao processo de eletrólise da água, algumas vantagens com os produtos do processo são evidenciadas como: os gases de hidrogênio e de oxigênio produzidos são livres de carbono e com ampla utilização em diversos setores.

A reforma do etanol é fomentada, principalmente, no Brasil pois já existe uma vasta

Tabela 2 – Métodos de produção de hidrogênio verde.

Métodos de produção e processos de conversão de energia para gerar “Hidrogênio Verde”.		
Método de produção de Hidrogênio	Fonte de energia verde	Processo de conversão
Eletrólise (Energia verde com eletricidade gerada por eletrólise da água) ou decomposição de arco de plasma	Solar	Usina fotovoltaica ou usina solar concentrada para gerar eletricidade.
	Geotérmica	Usina (Ciclo de Rankine Orgânico, Ciclo Flash etc).
	Biomassa	Usina de biomassa, máquinas de combustão interna, plantas de célula a combustível.
	Vento	Usina de energia eólica (conectada à rede ou autônoma).
	Calor do oceano	Plantas de conversão de energia termal dos oceanos.
	Outras renováveis	Marés, correntes no oceano e energia das ondas convertidas em eletricidade.
	Nuclear	Usinas nucleares.
Módulos fotovoltaicos - Eletrólise	Reforma	Gás de aterros queimados em geradores a diesel. Industrial/outra reforma térmica usada para ciclo Rankine ou outras máquinas térmicas. Incineração com poluentes capturados da usina de Rankine.
	Solar	A radiação solar gera eletricidade através de painéis fotovoltaicos.
Eletrólise de altas temperaturas	Solar	A energia solar concentrada gera alta temperatura, calor e eletricidade.
	Geotérmica	Eletricidade geotérmica acoplada a bombas de calor de alta temperatura.
	Biomassa	A combustão de biomassa gera energia e calor de alta temperatura.
	Nuclear	Energia nuclear usada para gerar eletricidade e calor de alta temperatura.
Foto eletrólise	Reforma	A energia recuperada gera eletricidade e calor de alta temperatura.
	Solar	Módulos fotovoltaicos ou usinas solares concentradas + eletrólise imersas com foto eletrodos.

Fonte: Adaptado pela autora

rede de distribuição do etanol pelo país, o que facilitaria, em alguns aspectos, a distribuição e a transmissão do hidrogênio.(SILVA; DANTAS, 2016)

Dentre as desvantagens da eletrólise da água existe o elevado consumo de energia em comparação a outros métodos de obtenção do hidrogênio, as necessidades da água ser desmineralizada e a disponibilidade de eletricidade. A desmineralização da água e o custo da eletricidade incrementam significativos custos de operação, o que dificulta a sua ascensão como uma opção economicamente viável. (HOSSEINI; WAHID, 2016) Por tal, o estudo SILVA e DANTAS (2016) aponta um benefício mais econômico investindo em projetos híbridos do que em projetos de somente de geração de energia elétrica ou somente produção de hidrogênio.

O trabalho SILVA e DANTAS (2016) faz uma análise técnica de um sistema de produção de hidrogênio a partir de módulos fotovoltaicos e demonstra numa forma de tabela (Tabela 3) a eficiência de cada um dos componentes num sistema com módulos fotovoltaicos fixos e móveis. Segue a tabela com a descrição de cada uma das eficiências no processo.

A água e a energia elétrica, recursos anteriormente citados, são levados até o o eletrolisador. Existem diversos modelos em desenvolvimento na literatura, mas o seu funcionamento se baseia pela entrada dos dois recursos, produzindo gases hidrogênio e oxigênio. Segue abaixo (Figura 20) o esquema que ilustra esse processo.

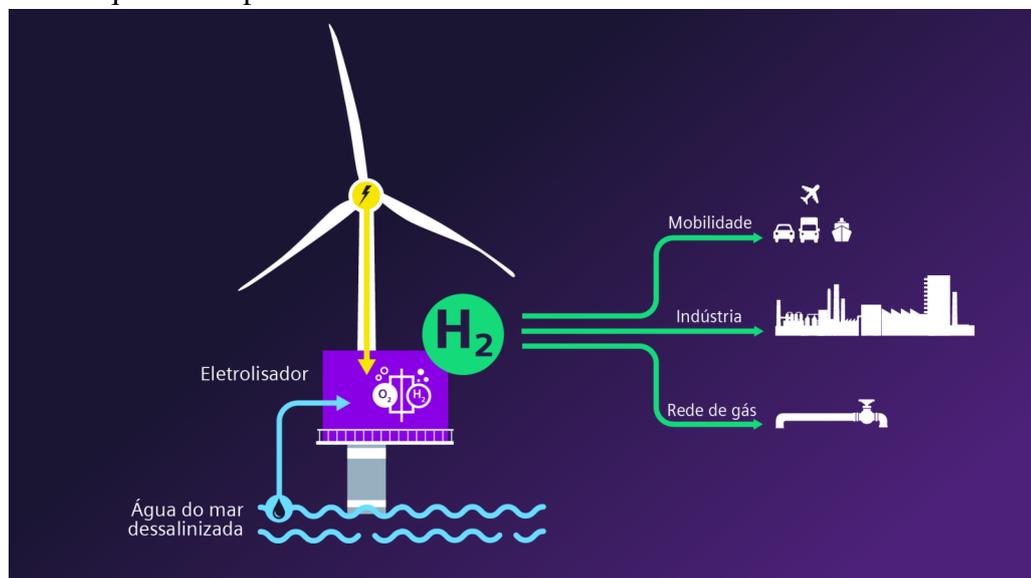
Além do processo de geração de energia elétrica, o restante da cadeia do hidrogênio deve ser estudado, principalmente no que tange ao transporte e ao armazenamento desse combustível, para evitar a necessidade de elevados investimentos a curto prazo.(ELIZIÁRIO *et al.*, 2020)

Tabela 3 – Eficiências de componentes num gerador solar - H_2 .

Componentes	Eficiência energética (%)
Módulos fotovoltaicos	11,2 - 11,4
Controladores de carga	85 - 90
Baterias	80 - 85
Primeiro inversor	85 - 90
Eletrolisador	56
Tanques de hidrogênio	100
Células a combustível	30 - 44
Segundo inversor	85 - 90

Fonte: Adaptado pela autora com dados de (SILVA; DANTAS, 2016)

Figura 20 – Esquema simplificado de um eletrolisador.



Fonte: (SIEMENS, 2021)

Na próxima subseção será abordado com mais detalhes o processo de eletrólise da água, mostrando as principais reações químicas e a interligação renovável - eletrolisador.

2.3.3 Eletrólise da água

O processo de eletrólise se caracteriza pela conversão de energia elétrica em energia química. Em especial, a eletrólise da molécula de água ocorre com o fornecimento de uma corrente contínua por uma solução aquosa de sal para quebrar as ligações covalentes da água liberando os gases hidrogênio e oxigênio. Com o fornecimento de energia elétrica sendo feito a partir de uma fonte renovável, o hidrogênio produzido pode ser denominado hidrogênio verde.

Vale acrescentar, a partir da equação 2.2, que a ionização da molécula de água não produz gases de efeito estufa. Apesar da necessidade de ser desmineralizada, esse recurso é

abundante em nosso planeta. Além disso, o trabalho de Hosseini e Wahid (2016) afirma que, comparado ao valor da eletricidade, a água tem um custo irrelevante no processo.



2.3.3.1 Célula a combustível

A célula a combustível é um conversor que faz o processo inverso ao eletrolisador, ela converte a energia química em energia elétrica e térmica. No contexto apresentado, ela pode utilizar o hidrogênio armazenado para gerar eletricidade e água. (LINARDI, c2022).

A difusão da célula a combustível vem crescendo com projetos no setor de transportes, pois é um setor muito dependente dos combustíveis fósseis e necessita de uma fonte de energia mais limpa e mais eficiente. Para tais pontos, Vural *et al.* (2010) aponta que a eletricidade gerada numa célula a combustível não emite gases de escape nocivos e Junior (2009) afirma que o rendimento da célula a combustível é superior ao acionamento de um motor a combustão interna.

Apesar das vantagens em relação a eficiência, os tanques de armazenamento para o hidrogênio são mais robustos e pesados, necessitando uma reestruturação mecânica dos automóveis para aportar esses tanques de armazenamento, como foi feito com o projeto Ônibus híbrido a hidrogênio, uma tecnologia do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) apresentada na Rio+20 - Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável.

De forma geral, é possível combinar, em algumas aplicações, o uso do eletrolisador e da célula a combustível para dar mais confiabilidade ao sistema. Na figura 21 é mostrado um esquema proposto no trabalho de Bezerra *et al.* (2019).

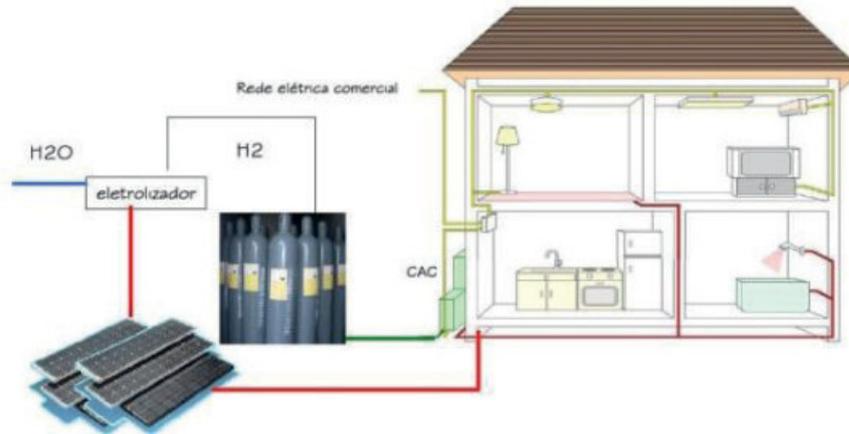
Na próxima subseção serão abordados mais detalhes sobre as tecnologias de eletrolisadores mais difundidos na literatura.

2.3.4 Tipos de eletrolisadores

Na literatura existem três principais tipos de eletrolisadores e eles são classificados a partir do eletrólito utilizado:

1. Eletrólise Alcalina (AEL);
2. Eletrólise de Óxido Sólido (SOE);

Figura 21 – Esquema de implementação de um sistema autônomo de geração de energia com eletrolisador e célula a combustível.

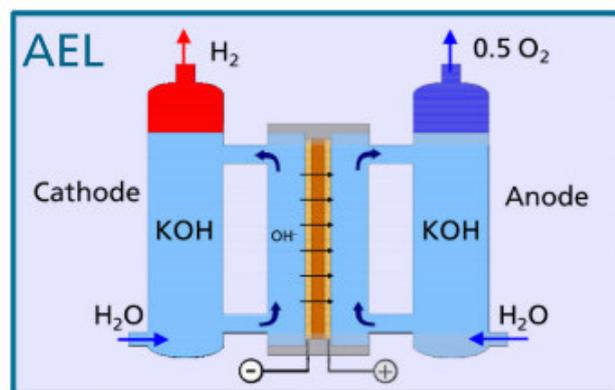


Fonte: (BEZERRA *et al.*, 2019)

3. Eletrólise com Membrana de Polímeros (PEM).

A eletrólise alcalina se caracteriza por possuir maior robustez, uma tecnologia mais madura e estar presente no mercado a custos relativamente mais baratos. Sua aplicação é feita em produções de hidrogênio em larga escala, com eletrodos imersos num eletrólito líquido separados, por meio de um diafragma. Sua eficiência de operação varia de 47% - 82%, atingindo mais de 15 anos de vida útil e capacidade de produção de 1 a 500 Nm³/h (URSUA *et al.*, 2011). Na figura 22 existe uma ilustração da estrutura de um eletrolisador por eletrólise alcalina.

Figura 22 – Representação Esquemática da eletrólise alcalina.

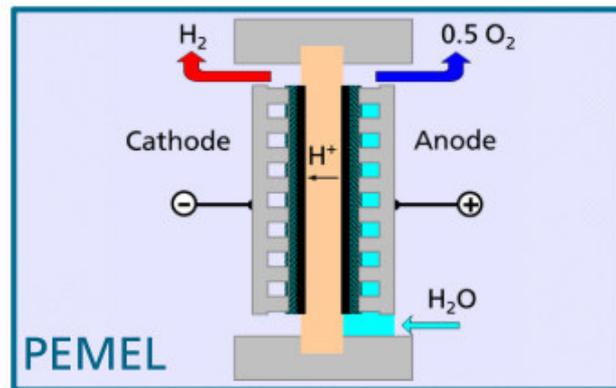


Fonte: (SMOLINKA, 2014)

A eletrólise por membrana de prótons (PEM) surgiu como proposta de melhorar algumas dificuldades da eletrólise alcalina. Sua estrutura consiste de uma membrana feita com um polímero específico para condução dos prótons, separando os gases do hidrogênio e do oxigênio, resolvendo a questão com baixa densidade que o eletrolisador alcalino possui. Além

disso, esse tipo de eletrólise é pouco sensível aos efeitos da variação de energia, ao contrário da alcalina, dessa forma ratifica o seu uso em aplicações com as fontes renováveis de energia como a solar fotovoltaica e a eólica. (GAZEY *et al.*, 2006). O tempo de vida das células e pilhas de eletrólise por tecnologia PEM está entre 5 e 10 anos. (SMOLINKA, 2014). Na figura 23 é mostrado o esquema da tecnologia PEM.

Figura 23 – Representação Esquemática da eletrólise PEM.

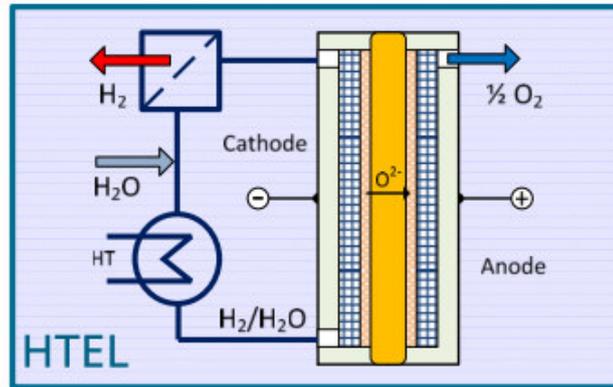


Fonte: (SMOLINKA, 2014)

A eletrólise de óxido sólido é uma tecnologia ainda em desenvolvimento laboratorial. Seu funcionamento ocorre à base do vapor de água em altas temperaturas (entre 800 a 1000 graus Celsius). Com essas altas temperaturas, o equilíbrio de tensão é controlado e a demanda por energia elétrica é menor, em contraponto à demanda por calor aumentada. Seu tempo de vida, limitado pela degradação do material e as condições térmicas, é pouco mais de 1000 horas com taxa de decaimento menor que 1% para cada 1000 horas de uso. Além disso, como o produto do processo será uma mistura de oxigênio e vapor, ainda exige um tratamento especial incrementando nos custos. Na figura 24 existe uma ilustração da estrutura de um eletrolisador por eletrólise de óxido sólido (altas temperaturas) .

Além das informações acima evidenciadas, a curva de resposta do eletrolisador e a produção de hidrogênio são dois importantes parâmetros para a resposta de uma determinada tecnologia de eletrólise a ser aplicada, essas características não são evidenciadas no escopo desse trabalho. No entanto, nas figuras 25, 26 e 27 são evidenciados alguns parâmetros técnicos dessas tecnologias proposto por Smolinka (2014) para comparar e evidenciar as características dessas tecnologias. A figura 25 mostra as condições de operação de cada tecnologia, a figura 26 mostra as reações químicas que ocorrem em cada tecnologia e a figura 27 evidencia os pontos de desenvolvimento de cada tecnologia.

Figura 24 – Representação Esquemática da eletrólise de altas temperaturas.



Fonte: (SMOLINKA, 2014)

Figura 25 – Visão geral de características das principais tecnologias de eletrólise da água.

Eletrólise da água

Características principais – Visão geral

	Eletrólise Alcalina	Eletrólise de Membrana	Eletrólise de Óxido Sólido
Eletrólito	KOH Alcalino líquido	Polímero de ácido sólido	Composto de metal cerâmico
Eletrodos	Ni/Fe eletrodos	Metais nobres (Pt,Ir,...)	Cerâmica dopada Ni
Temperatura	50 – 80 ° C	RT – 90 ° C	700 – 1000 ° C
Pressão	< 30 bar	< 200 bar	Atm.
Tamanho do módulo (Comercial)	Max. 760 Nm ³ H ₂ /h ~ 3,2 MW _{el}	Max. 30 Nm ³ H ₂ /h ~ 170 kW _{el}	~ 1 Nm ³ H ₂ /h Na faixa de kW



Fonte: (SMOLINKA, 2014) - Adptado e traduzido pela autora.

Na última seção deste capítulo de fundamentação teórica serão tragos alguns aspectos importantes sobre o armazenamento de energia elétrica.

2.4 Armazenamento de energia

Para esta quarta seção serão abordadas as discussões em torno dos conceitos relacionados ao armazenamento de energia e as principais características de alguns tipos de armazenamento de energia envolvidos com a produção do hidrogênio.

Figura 26 – Visão geral das reações químicas de cada tecnologia de eletrolise da água.

Eletrólise da água

Três formas para produção de hidrogênio e oxigênio

Tecnologia	Faixa de Temp.	Reação catódica	Portador de carga	Reação anódica
Eletrólise alcalina	40 – 90 ° C	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	OH^-	$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$
Eletrólise de membrana	20 – 100 ° C	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	H^+	$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$
Eletrólise alta temperatura	700 – 1000 ° C	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$	O^{2-}	$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$

Os diagramas mostram os componentes e o fluxo de materiais para cada tecnologia. AEL utiliza eletrolitos alcalinos (KOH) e produz H₂ e 0,5 O₂. PEMEL utiliza uma membrana de troca iônica e produz H₂ e 0,5 O₂. HTEL utiliza um eletrólito sólido e produz H₂ e 1/2 O₂. Cada diagrama indica a direção do fluxo de água, hidrogênio, oxigênio e íons.

Fonte: (SMOLINKA, 2014) - Adptado e traduzido pela autora.

Figura 27 – Principais pontos de desenvolvimento de cada pesquisa nos próximos anos.

Onde nós temos demandas de P&D para os próximos anos?

AEL	PEMEL	HTEL
<ul style="list-style-type: none"> Aumentar a densidade de corrente; Aumentar a estanqueidade; Dinâmica mais rápida do sistema completo; Maior faixa de carga parcial; Diminuir os custos de produtos através de economias de escala. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumentar a vida útil dos materiais/pilha; Comprovar os conceitos de escala para a pilha; Diminuir os custos pela substituição ou redução de materiais mais caros; Diminuir os custos de produtos através de economias de escala. 	<ul style="list-style-type: none"> Desenvolvimento de eletrodos e eletrólitos adaptáveis para a eletrólise de óxido sólido; Design de células e pilhas; Comprovar tempo de vida; Aumentar a estanqueidade; Estabilidade cíclica.

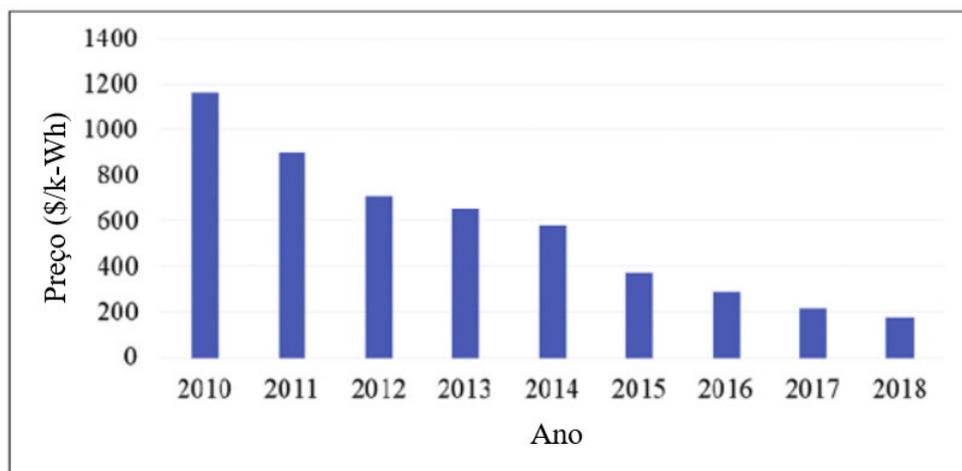
Fonte: (SMOLINKA, 2014) - Adptado e traduzido pela autora.

2.4.1 Tipos de armazenamento

O trabalho de Siddique e Thakur (2020) traz que um sistema efetivo de armazenamento deve, idealmente, ter a capacidade de acumular toda a energia renovável que não pode ser injetada na rede e que é desperdiçada. Ou seja, um bom sistema de armazenamento armazena a energia no horário de pico de produção e injeta na rede no pico de demanda, dando uma maior confiabilidade ao sistema.

Os acumuladores de energia representam ainda um alto custo dentro de um projeto onde há necessidade de armazenar energia para suprir o funcionamento de cargas especiais. No entanto, falando das baterias de íon-lítio, as baterias com maior penetração e interesse no mercado, seu valor caiu de 1200 dólares por kWh em 2010 para pouco menos de 200 dólares por kWh em 2018, com previsão de atingir 62 dólares por kWh em 2030, como mostra a figura 28. Isso ratifica que o custo do acumulador pode tornar sistemas isolados mais baratos e competitivos.(SIDDIQUE; THAKUR, 2020)

Figura 28 – Tendência de custos para a bateria de Íon-Lítio.



Fonte: (SIDDIQUE; THAKUR, 2020) - Adptado e traduzido pela autora.

Além do acúmulo de energia por meio de tecnologias de armazenamento eletroquímico, existem estudos em relação ao armazenamento do próprio hidrogênio produzido, principalmente, no contexto deste trabalho, pela eletrólise da água. No entanto, esse tipo de armazenamento para quantidades expressivas requer um custo adicional que pode comprometer a eficiência dos sistemas baseados nessa tecnologia. (MONTEIRO, 2021) Algumas possibilidades são avaliadas como:

1. Armazenamento de hidrogênio na forma líquido;

2. Armazenamento de hidrogênio em forma de gás;
3. Armazenamento por sintetização de compostos químicos.

Tanto para o armazenamento no estado gasoso quanto no estado líquido, é necessário aumentar a densidade do hidrogênio por compressão ou por criogenia, devido o hidrogênio possuir uma baixíssima densidade. (MONTEIRO, 2021). Na tabela criada por Monteiro (2021) é colocado alguns principais pontos para o armazenamento nessas duas modalidades.

Tabela 4 – Comparativo entre a compressão e a criogenia.

Compressão	Criogenia
O gás é comprimido até cerca de 790 atm em relação à pressão atmosférica. No entanto este método requer bastante energia (cerca de 13 % da energia contida no hidrogênio).	O gás é convertido para o estado líquido, sendo arrefecido a cerca de -252,9°C. Uma das vantagens deste método é que possui um tanque que armazena hidrogênio arrefecido criogenicamente, que é bastante mais leve que um tanque que armazena hidrogênio comprimido. No entanto, este processo envolve perdas de eficiência na ordem dos 40%.

Fonte: (SIDDIQUE; THAKUR, 2020)

Um ponto importante a considerar é que o armazenamento em tanques pressurizados tem uma tecnologia mais consolidada e difundida no mundo. (PINHO, 2017).

Vale destacar que existem muitos aspectos que limitam a aplicação do hidrogênio, em especial a questão da segurança desse combustível. (EPE, 2021a).

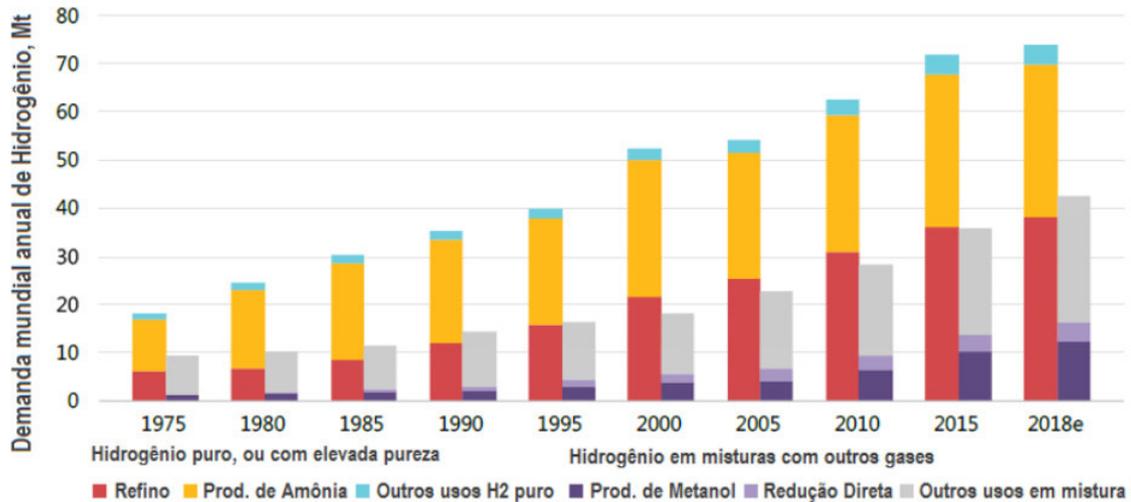
Um outro método de armazenamento é por meio de sintetização de compostos químicos como a amônia e o metanol. Em EPE (2021a) mostra que 96% da demanda por hidrogênio puro foi destinado para a produção de amônia e para o refino do petróleo. Dessa maneira, o hidrogênio a ser produzido poderia ser destinado para esses mercados.

A produção de amônia (NH₃), um importante componente para a produção de fertilizantes nitrogenados, é feita a partir do processo de *Haber-Bosch* que utiliza o nitrogênio do ar e hidrogênio oriundo de reformas a vapor do metano. (EPE, 2021a). A destinação

do hidrogênio para a produção de amônia pode ajudar no processo de descarbonização pela substituição do metano.

Segue abaixo (Figura 29) uma ilustração da evolução da demanda mundial por hidrogênio, em destaque para a demanda de refino e produção de amônia.

Figura 29 – Evolução da demanda mundial por hidrogênio.



Fonte: (EPE, 2021a)

Nesse contexto vale ressaltar um trecho do documento Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio (EPE, 2021a):

Boa parte do foco é no desenvolvimento de projetos para exportação do hidrogênio, diretamente ou indiretamente, na forma de amônia e metanol.

Nesse contexto, ressalte-se a recente parceria do Governo do Ceará com a Federação das Indústrias do Estado Ceará (FIEC), com a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Complexo do Pecém (CIPP S/A). Para isso, foi assinado, no dia 19 de fevereiro de 2021, um Decreto para constituir o Grupo de Trabalho com a finalidade de desenvolver políticas públicas de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável e para a configuração do HUB de Hidrogênio Verde no Estado do Ceará.

Além da escolha do armazenamento mais viável, existe um paralelo quanto a produção de hidrogênio ser feita em locais mais centralizados e em locais mais descentralizados. Para os locais mais centralizados, os custos do hidrogênio podem ser repassados a um menor custo pela maior quantidade que será produzida, no entanto o custo com o transporte até o uso final pode ser bem expressivo. Para produções mais descentralizadas, o custo com o transporte vai ser diminuído por estar mais perto dos centros de carga, mas o custo do hidrogênio será maior pela produção em quantidades inferiores. (MONTEIRO, 2021).

No caso deste trabalho, optou-se por aproveitar o potencial de energia eólica no município de São Gonçalo do Amarante, no Ceará, para suprir eletrolisadores no local para a produção de hidrogênio.

3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo serão descritos os métodos de dimensionamento das cargas do sistema, caracterizar o parque de geração eólico *offshore* e apresentar os ambientes de simulação utilizados - *Hyjack* e *HOMER*.

3.1 Caracterização e dimensionamento do eletrolisador

Para o desenvolvimento desse trabalho será avaliado aspectos técnicos e econômicos para a implementação de uma planta de hidrogênio verde suprida por um parque eólico offshore localizado nas proximidades do Porto do Pecém e da ZPE Ceará. Como explicado no capítulo 2, o método de produção de hidrogênio escolhido para viabilizar esse projeto será através da eletrólise da água, necessitando, dessa maneira, de um eletrolisador.

Os parâmetros e características desse eletrolisador foram levantados a partir do simulador *Hyjack*. Esse simulador é uma solução proposta pela startup HyjackTech, criada em 2021. Com esse simulador, a empresa procura proporcionar a disseminação do conhecimento sobre as soluções voltadas ao mercado do hidrogênio. Além disso, empresas do ramo podem, inclusive, inserir suas soluções na plataforma para que os usuários possam conhecer as soluções, até mesmo aquelas em estágio de desenvolvimento de tecnologia.

3.1.1 Simulando o eletrolisador no *Hyjack*

Apesar de estar disponível no idioma inglês, a interface desse simulador é bem simples e intuitiva. O usuário atribui um valor de potência ao eletrolisador, seleciona a tecnologia praticada (AEL, PEM ou SOE) e o simulador fornece tanto a quantidade de água quanto a demanda de energia elétrica necessárias, de acordo, com o fator de capacidade da máquina. Na tabela 5 consta as quantidades de água e de energia elétrica para diferentes potências nominais de eletrolisador com tecnologia PEM e fator de capacidade em 100%.

As saídas do sistema são divididas em informações técnicas e em informações econômicas. Dentre as informações técnicas, o simulador fornece: o fluxo nominal de hidrogênio na saída, o fluxo de oxigênio na saída, a recuperação de calor na saída e a produção, em média, de H_2 . As informações econômicas são centradas no custo individual do equipamento e uma faixa de custos gerais de implementação (trabalho civil, transportes e outros). (HYJACK, 2021).

Tabela 5 – Insumos de água e eletricidade segundo a potência do eletrolisador.

Potência do Eletrolisador (kW)	Fluxo de água (litros/dia)	Consumo médio de Energia elétrica (kWh/dia)
100	360	2.4
200	720	4.8
500	1.824	12
1	3.72	24
2	7.584	48
5	19.44	120
1	39.624	24
25	101.616	600
50	207.24	1.200.000
100	422.592	2.400.000

Fonte: (Hyjack,2021)

3.1.1.1 Parâmetros técnicos

Para dimensionar o fluxo nominal de hidrogênio na saída do eletrolisador (em Nm^3 /hora) são necessárias duas variáveis:

- I. C_1 = Consumo médio de energia em (kWh/dia)
- II. C_2 = Consumo específico do eletrolisador em (kWh/ Nm^3)

Para cálculo do consumo médio de energia, é utilizado a equação 3.1:

$$C_1 = (Potencia_{eletrolisador}) \cdot 24 \quad (3.1)$$

Segundo Hyjack (2021), o consumo específico de energia em (kW/ Nm^3) para a tecnologia PEM é obtido com a equação 3.2:

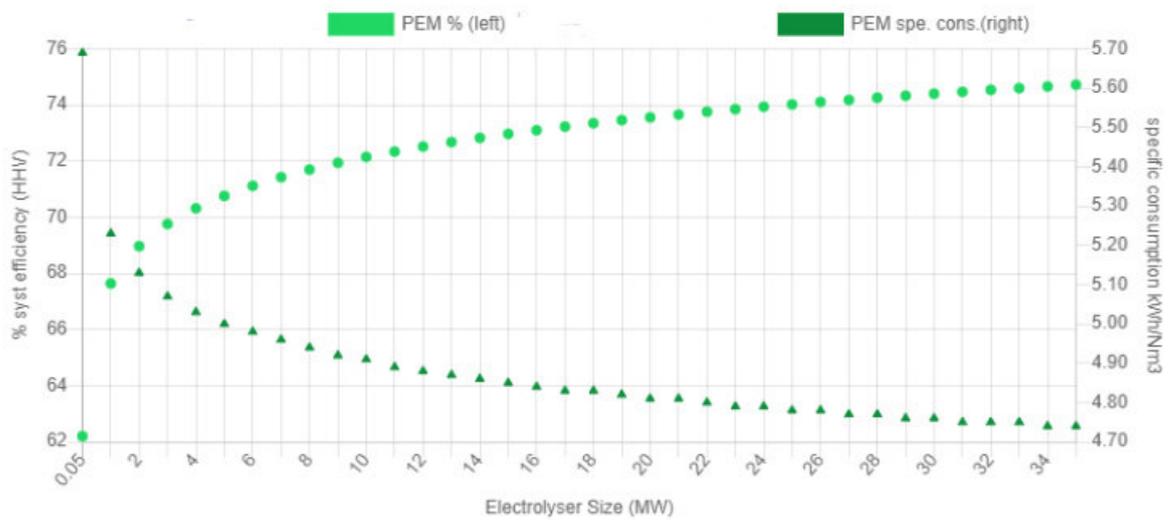
$$C_2 = 6,35 \cdot (Potencia_{eletrolisador})^{-0,028} \quad (3.2)$$

O fluxo nominal de hidrogênio se relaciona com as duas variáveis acima pela equação 3.3.

$$Fluxo_{nominal} = \frac{C_1}{C_2} \quad (3.3)$$

Na figura 30 são evidenciados os valores dos consumos específicos calculados pela equação 3.2 para diferentes tamanhos/potências do eletrolisador. A atenção é observar o eixo da direita no gráfico.

Figura 30 – A relação entre o consumo específico de energia em (kW/Nm³) de acordo com a potência do eletrolisador.



Fonte: (HYJACK, 2021)

3.1.1.2 Parâmetros econômicos

De acordo com Hyjack (2021), o custo do equipamento em (Euro/kW) para a tecnologia PEM é obtido pela equação 3.4.

$$Custo_{equipamento} = 7200 \cdot (Potencia_{eletrolisador})^{-0,202} \quad (3.4)$$

Os custos gerais estimam o trabalho civil de construção, o transporte, a instrumentação e os dutos. Esses custos são expressos numa faixa com um extremo inferior e um extremo superior. O extremo inferior, representado na equação 3.5, é estimado como o valor do custo individual do equipamento acrescido em 70%.

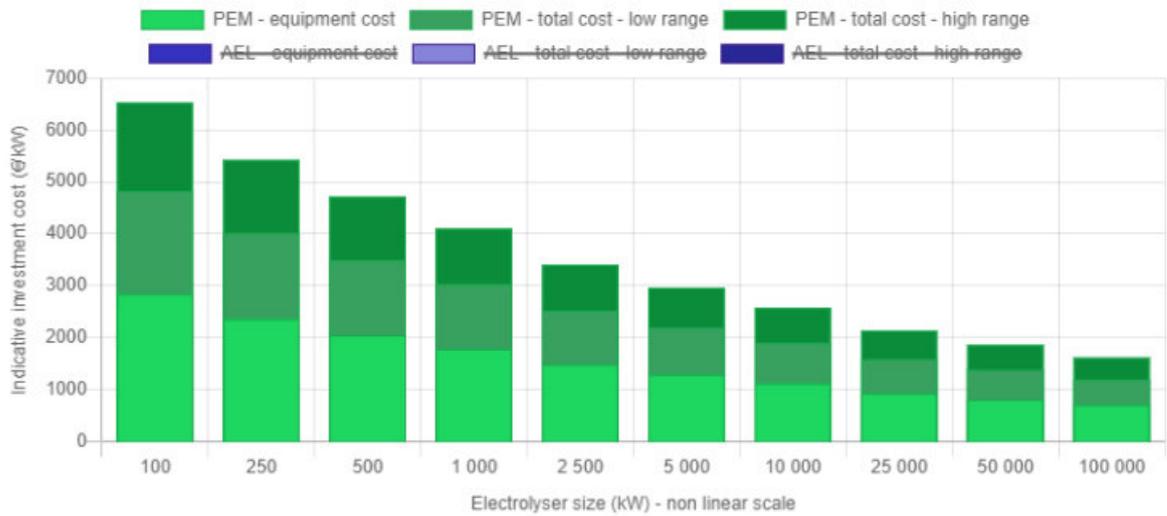
$$Custo_{geralinferior} = 1,7 \cdot Custo_{equipamento} \quad (3.5)$$

O extremo superior, representado na equação 3.6, é estimado como o valor do custo individual do equipamento acrescido em 130%.

$$Custo_{geralsuperior} = 2,3 \cdot Custo_{equipamento} \quad (3.6)$$

Na figura 31 é mostrado um gráfico que relaciona a potência do eletrolisador ao seu custo individual e a faixa de custos totais.

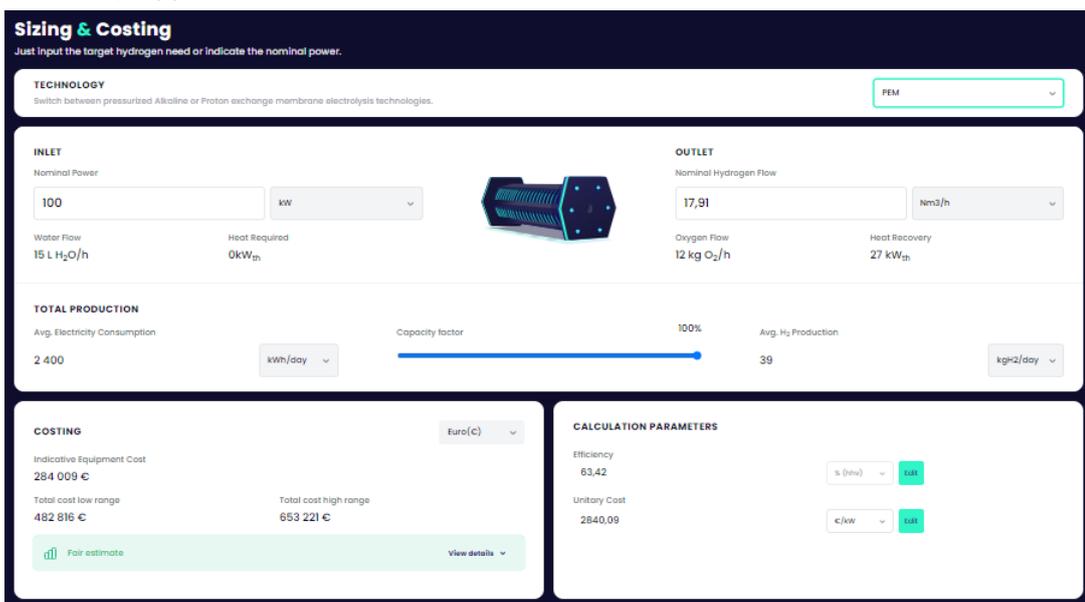
Figura 31 – Os custos do equipamento e gerais em (Euro/kW) de acordo com a potência do eletrolisador.



Fonte: (HYJACK, 2021)

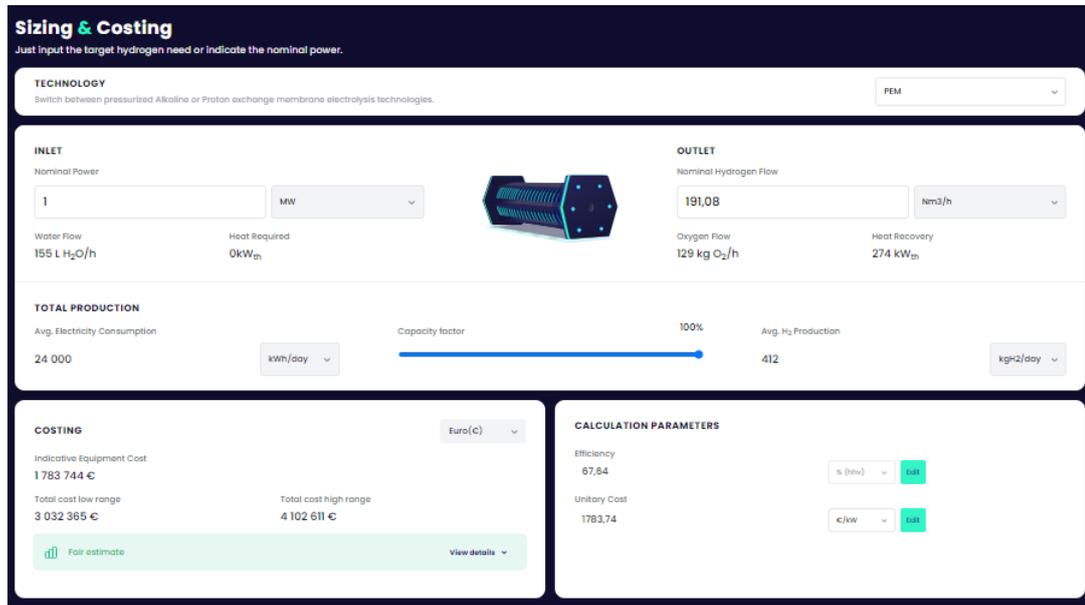
Segundo os parâmetros desejados, ao final dos cálculos realizados pelo simulador, há uma sugestão de um possível modelo de eletrolisador cadastrado na plataforma, onde é possível obter mais detalhes e até entrar em contato com os desenvolvedores da tecnologia. Nas figuras 32 e 33 são dispostas as principais informações para um eletrolisador de 100 kW PEM e um eletrolisador de 1 MW PEM, respectivamente.

Figura 32 – Parâmetros calculados na simulação do Hyjack para um eletrolisador com potência de 100kW.



Fonte: (HYJACK, 2021)

Figura 33 – Parâmetros calculados na simulação do Hyjack para um eletrolisador com potência de 1MW.



Fonte: (HYJACK, 2021)

A utilização do software para dimensionar o eletrolisador é uma consideração inicial para estudos de funcionamento e de dimensionamento deste componente. Segundo Hyjack (2021), as curvas plotadas são aproximações justas para os custos envolvidos no projeto, mas ainda existe uma grande diversidade de projetos em estados iniciais, o que pode levar a uma significativa variação de preços entre os fornecedores e os projetos.

Em Agency (2020a) é colocado que o fornecimento dos dados dos eletrolisadores são dificultados pela confiabilidade natural dos projetos e pela retenção da vantagem competitiva dos desenvolvedores. Além disso, as fronteiras de custos ainda são bem inconsistentes, o que torna um comparativo de estudos mais difícil.

3.1.2 Caracterização e dimensionamento do parque eólico offshore

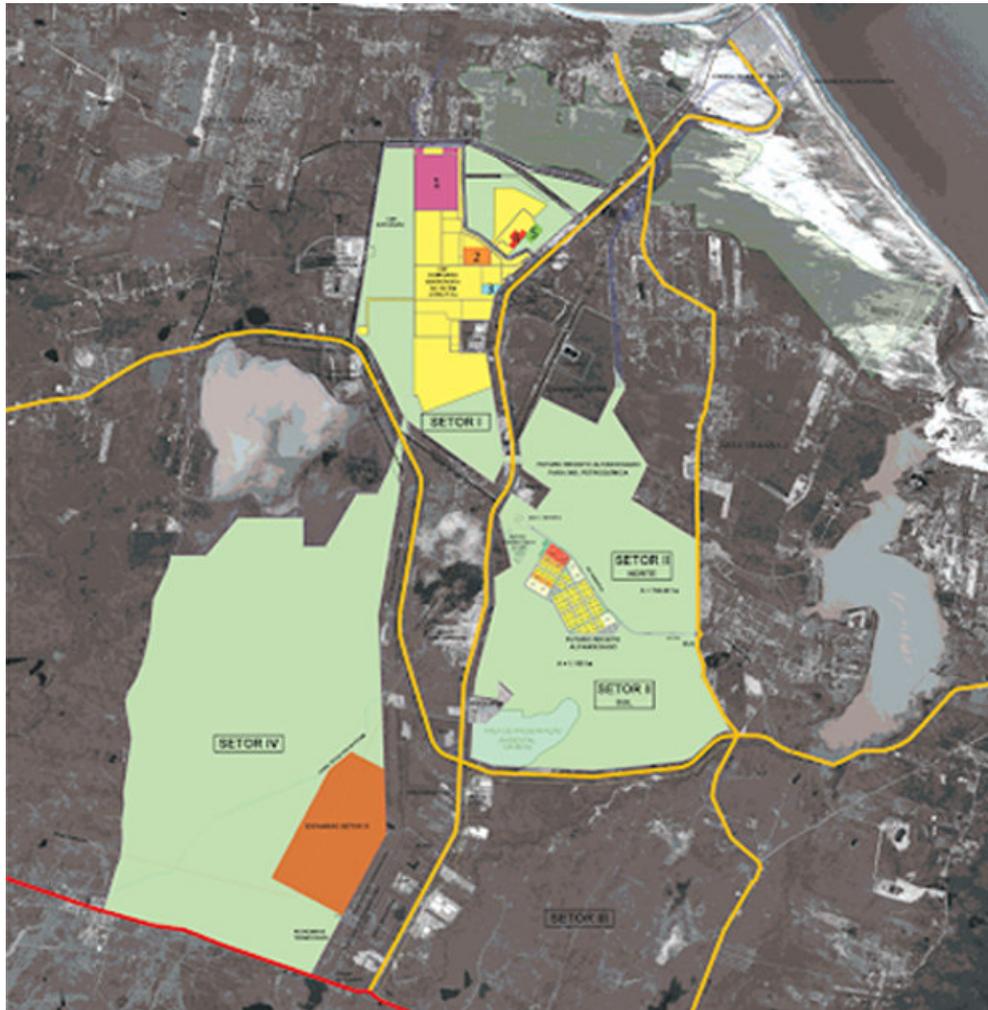
3.1.2.1 A escolha do local

No que tange ao recurso eólico, o Ceará possui uma vasta área propensa a abarcar uma usina eólica tanto *onshore* quanto *offshore*, como evidenciado em al. (2019a) para o cenário *onshore* e em al. (2019a) para o cenário *offshore*. No entanto, a implementação de uma tecnologia ainda pouco madura no mercado, como a produção de hidrogênio verde, requer alguns incentivos que facilitem nesse processo, principalmente monetários e fiscais. Dessa maneira, uma ZPE, no caso a ZPE do Pecém, se mostra uma alternativa bastante atrativa pois proporciona esses e

outros benefícios para a implementação de um empreendimento com foco na transição energética brasileira.

A ZPE Ceará presta serviços às empresas instaladas na área da zona franca, promovendo infraestrutura às atividades das autoridades aduaneiras. Sua área de abrangência é de 6182 hectares, sendo 1.251 hectares no setor I, 1.911 hectares no setor II e o restante é dedicado a futuras expansões. Na figura 34 é mostrado um breve resumo da estrutura da ZPE Ceará. (CEARa, c2022)

Figura 34 – Mapa resumo da estrutura da ZPE Ceará.



Fonte: (CEARa, c2022)

Segundo Ceara (c2022), os benefícios gerais ao instalar uma empresa na zona franca são:

I. Liberdade cambial: As empresas podem manter no exterior, permanentemente, 100% das divisas obtidas nas suas exportações; fora de uma ZPE, essa faculdade não é garantida em lei, dependendo da resolução do Conselho Monetário Nacional. A possibilidade de realização de investimentos, aplicações

financeiras ou pagamento de obrigações do exportador com recursos mantidos no exterior. Redução do impacto da variação cambial das operações realizadas com empresas do exterior.

II. Dispensa de licenças: Dispensa de licenças ou autorizações de órgãos federais nas operações de comércio exterior, que não sejam associadas aos controles de ordem sanitária, de interesse da segurança nacional ou de proteção ao meio ambiente.

III. Segurança jurídica: Os benefícios concedidos são garantidos pelo período de 20 anos (prorrogável), independentemente de alterações futuras na legislação ou mudanças políticas e econômicas a que o País estiver suscetível.

IV. Fim do compromisso exportador: Extinção do compromisso exportador que limitava o faturamento para o mercado interno a 20%. Na venda para o mercado interno, será necessário pagamento de todos os tributos suspensos na aquisição dos seus respectivos insumos, o que não implicará na renúncia ao regime.

Além dos benefícios gerais de uma ZPE, o documento EPE (2021a) aponta que o foco para essa transição energética é o desenvolvimento de projetos voltados à exportação do hidrogênio, diretamente ou indiretamente, na forma de amônia e metanol.

No texto da Lei Nº 11.508, de 20 de JULHO de 2007, as ZPEs são destinadas à instalação de empresas direcionadas para a produção de bens a serem comercializados no exterior e caracterizadas como áreas de livre comércio com o exterior. Dito isso um estudo para implementação do projeto nessa zona franca é ratificado.

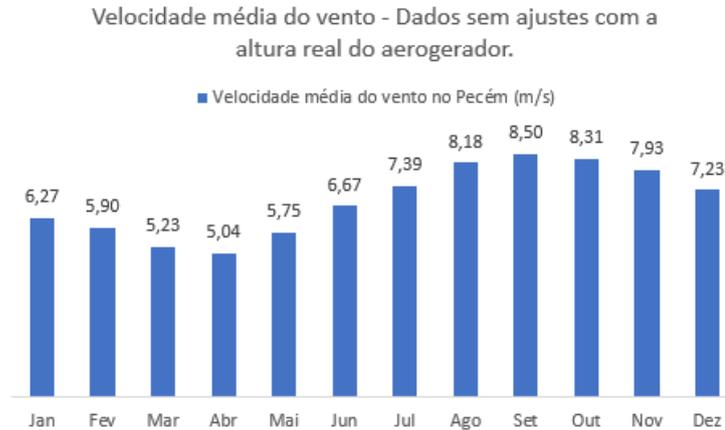
Por último, como existem empreendedores e parceiros internacionais interessados em desenvolver o hidrogênio verde no Brasil, a posição estratégica do Porto do Pecém com os principais portos nos Estados Unidos, Europa e Oriente Médio acrescentam como mais um ponto positivo num estudo de viabilidade de produção nas proximidades da ZPE Pecém. Vale ressaltar que a escolha foi centrada, principalmente, em aspectos técnicos e de atratividade econômica. Os estudos EIA/RIMA e impactos sociais são outros pontos a serem considerados para uma plena escolha, não estando no escopo deste trabalho.

3.1.2.2 *Recurso eólico no Pecém*

As informações do recurso eólico na região do Pecém são disponibilizadas pelo NASA Prediction of Worldwide Energy Resource - Previsão de Recursos Energéticos Mundiais (POWER), ajustadas por parâmetros levantados no al. (2019a) e integradas dentro do simulador HOMER - a ser apresentado em seções posteriores.

A figura 35 mostra as medições de velocidade média a 50 metros da superfície da terra no período de janeiro de 1984 a dezembro de 2013 disponibilizadas pelo NASA POWER.

Figura 35 – Velocidade média do vento no Pecém com medições a 50 metros da superfície da terra no período de janeiro de 1984 a dezembro de 2013.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do HOMER

Para a obtenção da velocidade média do vento para a altura do aerogerador selecionado é preciso utilizar a equação 3.7 descrita em Moreira (2017) para os devidos ajustes.

$$v_{aero} = v_{anem} \cdot \frac{(\ln \frac{z_{aero}}{z_0})}{(\ln \frac{z_{anem}}{z_0})} \quad (3.7)$$

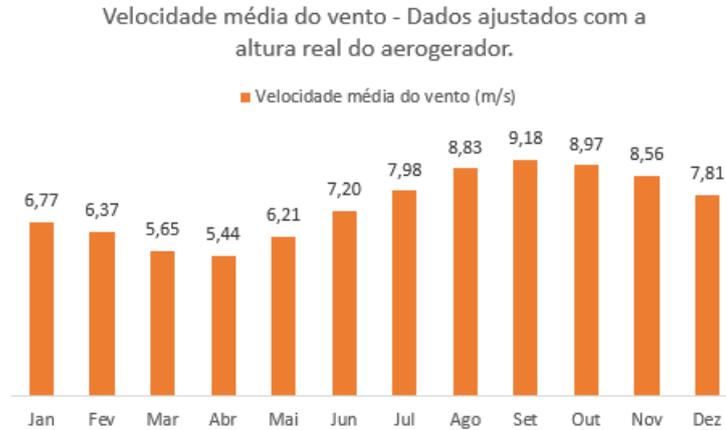
Sendo v_{aero} a velocidade do vento na altura do aerogerador; v_{anem} representa a velocidade do vento na altura do anemômetro de medição, ou seja, são os valores encontrados na figura 35; z_{aero} é a altura da superfície até o aerogerador, nesse caso, o aerogerador escolhido está disposto a 135 metros de altura da superfície; z_{anem} é a altura do anemômetro de medição, ou seja, 30 metros de altura; z_0 é a rugosidade aerodinâmica. Segundo Cabral (2021), a rugosidade aerodinâmica sobre o mar é de 0,0002 metros.

Na figura 36 são dispostos os valores das velocidades do vento ajustadas segundo a equação 3.7.

Apesar de apresentar um período de 30 anos de medições, os dados fornecidos pelo NASA POWER precisam de ajustes nos parâmetros. Esses ajustes foram motivados pelas informações mais atualizadas contidas no al. (2019a), publicado em 2019. Segue a tabela 6 que ilustra os parâmetros ajustados para o recurso eólico deste estudo de caso.

Após ajustar os parâmetros, o simulador realiza os cálculos com os parâmetros editados pelo usuário.

Figura 36 – Velocidade média do vento no Pecém com medições ajustadas a altura de 135 metros do aerogerador.



Fonte: Elaborado pela autora com dados do HOMER

Tabela 6 – Parâmetros comparativos entre os dados fornecidos pelo NASA POWER e o Atlas Eólico Solar Ceará.

Parâmetros	HOMER - NASA POWER	Atlas Eólico e Solar
Altitude de referência (m)	135	150
Fator de escala da distribuição de Weibull (m/s)	6.87	8.5
Fator de forma da distribuição de Weibull	2	3.3
Horário da velocidade de pico (h)	15	10

Fonte: Elaborado pela autora com dados do HOMER e al. (2019a)

3.1.2.3 A escolha do aerogerador

No contexto de Ceará, os projetos de parques eólicos offshore em processo de licenciamento no IBAMA estão dispostos na figura 5. Na figura 5 é possível visualizar algumas preferências por aerogeradores e fornecedores. Os aerogeradores da Vestas são encontrados em 8 dos 11 projetos. São eles: CE-03, CE-05, CE-06, CE-07, CE-08, CE-09, CE-11 e CE-12. Depois o aerogerador Halide X da General Electric é encontrado em 2 projetos (CE-01 e CE-04) e o projeto CE-10 com aerogerador da Siemens.

No entanto, a escolha do aerogerador a ser utilizado no projeto do parque eólico deste trabalho será limitada às opções disponibilizadas dentro do simulador que fará a integração com o eletrolisador. O critério considerado dentro da lista disponibilizada foi a potência do eletrolisador, a altura da torre e a opção com mais informações técnicas disponíveis.

Com a potência individual de cada um dos 11 projetos, a média foi calculada e usada como referência. A potência individual média é de 13,9 MW. A potência individual de

aerogerador mais próxima da referência foi o aerogerador Wobben Enercon E-126 [7.5MW] de 7,5 MW, sendo esse o utilizado para o projeto deste trabalho. O simulador não possui aerogeradores cadastrados para a tecnologia *offshore*, mas os dados financeiros foram ajustados à realidade de um aerogerador em torre sobre o mar. Mais detalhes deste aerogerador é encontrado no Anexo E.

3.1.2.4 Levantamento de cargas da ZPE

Dentre os arranjos de sistemas que serão abordados no escopo deste trabalho, existe um que considera a utilização de cargas CA para um modelo comparativo para as análises técnica e econômica dos arranjos que utilizam o eletrolisador. As cargas CA selecionadas provêm do prédio administrativo da ZPE. Na tabela 7 consta o consumo mensal no ano de 2021.

Tabela 7 – Consumo de energia no prédio administrativo da ZPE Pecém.

Mês/Ano	Total de Energia (kWh)
jan/21	52.226,00
fev/21	63.589,00
mar/21	57.215,00
abr/21	60.603,00
mai/21	62.095,00
jun/21	59.147,00
jul/21	59.555,00
ago/21	61.421,00
set/21	63.243,00
out/21	63.722,00
nov/21	63.318,00
dez/21	61.592,00
Média	60.643,83

Fonte: Elaborado pela autora com dados da Secretaria da Infraestrutura (SEINFRA)

O padrão de consumo horário é dividido em consumos na ponta (NP) e no fora ponta (FP). O período na ponta considerado é de 17h30 às 20h30 e o restante está na fora ponta. Apesar do padrão de consumo obtido pela SEINFRA ser dividido entre consumo NP e FP, os dados não são horários, mas sim mensais. Dessa maneira, uma média de cada um desses consumos foi distribuída entre os horários do dia, respeitando as variações de cada mês.

Vale ressaltar que o simulador permite a atribuição de variações randômicas para a construção do padrão de consumo das cargas. Com um passo de 60 minutos, foi considerado

uma variação de 10% para cada passo e de 20% entre dias consecutivos.

No anexo E é possível encontrar o padrão de consumo do prédio administrativo da ZPE, respectivamente inserido no HOMER.

3.1.3 Integração entre usina eólica offshore e o eletrolisador

A integração entre a usina eólica *offshore* e as cargas do eletrolisador e do prédio administrativo da ZPE será feita através de um software de simulação que testa diversos cenários possíveis a fim de encontrar as melhores soluções de acordo com as especificações dadas pelo usuário - HOMER Pro®. Originalmente desenvolvido no National Renewable Energy Laboratory - Laboratório Nacional de Energia Renovável e aprimorado e distribuído pela HOMER Energy, o HOMER reúne as ferramentas necessárias para uma análise técnica-econômica do seu projeto.

Para que o simulador teste os diversos cenários, é necessário que algumas entradas sejam inseridas no ambiente de simulação, como:

- I. Seleção do local de estudo. A seleção do local permite a busca de dados de vento, de irradiação solar e de temperaturas locais;
- II. Ajustes dos parâmetros solares e de vento;
- III. Inserção e caracterização das cargas a serem atendidas em cada sistema. Nessa etapa é inserido o comportamento mensal da carga e o tipo de carga (CC ou CA); e
- IV. Inserção dos demais componentes do sistema como: a representação da rede elétrica, os aerogeradores, os conversores e as baterias.

3.1.3.1 A teoria do NPC e do LCOE

Os resultados dos cenários simulados são classificados e dispostos em ordem decrescente do valor do Net present cost - Custo Presente Líquido (NPC). O custo presente líquido total de um projeto é o valor presente de todos os custos que o sistema incorre ao longo de sua vida, menos o valor presente de todas as receitas que ele ganha ao longo de sua vida. Os custos incluem custos de capital, custos de substituição, custos de O&M, custos de combustível, multas por emissões e os custos de compra de energia da rede. As receitas incluem valor residual e receita de vendas da rede. O HOMER calcula o NPC total somando os fluxos de caixa descontados totais em cada ano da vida útil do projeto. (HOMER, c2022).

Um outro aspecto considerado para efeitos comparativos financeiros entre projetos de geração de eletricidade é o Levelized cost of electricity - Custo nivelado da eletricidade

(LCOE).

O LCOE permite a comparação do custo por unidade de energia, não considerando os custos relacionados ao equilíbrio entre oferta e demanda. (CATAPULT, c2022)

3.1.3.2 *A taxa de desconto real: Real discount rate*

A taxa de desconto real é usada para converter entre custos únicos e custos anualizados. O HOMER calcula a taxa de desconto real anual (também chamada de taxa de juros real ou taxa de juros) a partir das entradas "Taxa de desconto nominal" e "Taxa de inflação esperada". O HOMER usa a taxa de desconto real para calcular os fatores de desconto e os custos anualizados a partir dos custos presentes líquidos. (HOMER, c2022)

A taxa de desconto real i' é calculada a partir da equação 3.8, onde i' representa a taxa nominal de desconto e f refere-se a taxa esperada da inflação.

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (3.8)$$

Para a taxa nominal de desconto é considerada a taxa básica de juros, a SELIC. Em 27 de junho de 2022, a meta da SELIC era 13,25 %. (BRASIL, 2022)

Para a taxa esperada da inflação é considerada o acumulado do IPCA nos últimos 12 meses. Em 27 de junho de 2022, a taxa da inflação era 11,73 %. (IBGE, 2022)

Dessa maneira, com a aplicação da equação 3.8, o valor da taxa real de desconto é 1,36 %.

3.1.4 *Sistemas propostos para simulação*

Para o estudo deste trabalho são selecionados seis arranjos de projetos. Todos serão caracterizados com seus respectivos valores de geração de energia, o fator de capacidade, o NPC, o LCOE, os custos anualizados e uma estimativa de emissões de gases de efeito estufa.

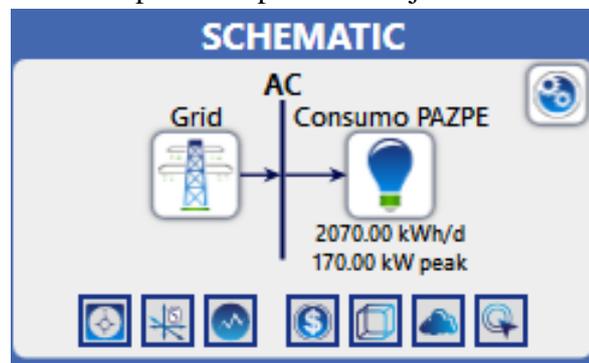
Com essas informações dispostas, os projetos serão analisados e classificados em três vertentes: técnica, econômica e o fomento à transição energética com a produção de hidrogênio verde.

3.1.4.1 Arranjo 1: Rede elétrica supre as cargas do prédio administrativo da ZPE

O arranjo 1 é o mais simples e o mais comum pois busca representar o suprimento de cargas ligadas diretamente à rede elétrica. Para essa simulação é necessário inserir alguns parâmetros da rede como: o preço da energia da rede (\$/kWh) e o preço de venda da energia da rede (\$/kWh). Para o primeiro foi considerado 0,1 (\$/kWh) e o segundo foi considerado 0,05 (\$/kWh). Os dados complementares de al. (2019a) para as medições de vento não fornece dados em *offshore*. Dessa maneira, foi considerado a região costeira do Pecém com a altitude do aerogerador *offshore*.

A figura 37 mostra o esquemático dos componentes para o arranjo 1.

Figura 37 – Esquemático dos componentes para o arranjo 1



Fonte: Elaborado pela autora

A tabela 8 destaca todos os parâmetros ajustados dos componentes utilizados no esquemático do arranjo 1. Os demais parâmetros foram deixados com os valores *default* do simulador.

3.1.4.2 Arranjo 2: Aerogeradores suprem as cargas do prédio administrativo da ZPE

O arranjo 2 é um sistema *offgrid* com geração eólica renovável. Esse arranjo busca representar o suprimento de cargas ligadas diretamente a um parque eólico *offshore*.

A figura 38 mostra o esquemático dos componentes para o arranjo 2.

A tabela 9 destaca todos os parâmetros ajustados dos componentes utilizados no esquemático do arranjo 2. Os demais parâmetros foram deixados com os valores *default* do simulador. Para a tabela 9 foram acrescentadas as informações sobre a turbina eólica.

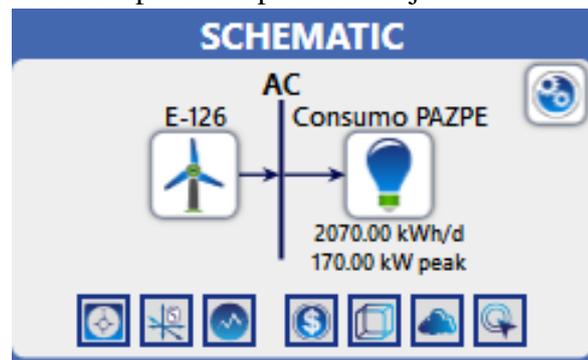
Os custos da turbina eólica são obtidos do Plano Decenal de 2030 da EPE (2021b). Nesses custos foi incluído, não somente os custos do aerogerador, mas o Capital Expenditure (CAPEX)

Tabela 8 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 1

Local	Porto do Pecém - Distrito do Pecém, São Gonçalo do Amarante	
Recurso eólico	Altitude acima do nível do mar	135.00 m
	Altura do anemômetro	50.00 m
	Rugosidade da superfície	0.0002 m
	Fator de forma da distribuição de Weibull	3.30
	Horário da velocidade de pico	10 h
	Velocidade Média Anual	8.5 m/s
Rede elétrica	Preço da energia da rede	0.10 (\$/kWh)
	Preço de venda da energia da rede	0.050 (\$/kWh)
Carga CA	Tempo do passo	60 minutos
	Variação randômica dia após dia	20.0%
	Variação randômica do passo	10.0%
	Consumo Médio Anual	2070 (KWh/dia)
Parâmetros econômicos	Taxa de desconto nominal	13.3%
	Taxa de inflação esperada	11.7%
	Tempo de vida do projeto	25 anos

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 38 – Esquemático dos componentes para o arranjo 2



Fonte: Elaborado pela autora

da geração de energia *offshore*. Vale lembrar que o CAPEX inclui todos os custos diretos e indiretos do empreendimento.

Para a geração eólica *offshore*, o CAPEX de referência é \$2500,00 por kW e \$100,00 anual por KW para os custos de Operational Expenditure (OPEX). Para fins de comparação, os valores para a geração eólica *onshore* são \$918,00 e \$ 18,37, respectivamente.

3.1.4.3 Arranjo 3: Aerogeradores com suporte de baterias suprem as cargas do prédio administrativo da ZPE

O arranjo 3 é um sistema também *offgrid* com geração eólica renovável. Esse arranjo busca representar o suprimento de cargas ligadas ao parque eólico *offshore*, mas com o suporte de um banco de baterias. Diante dos resultados simulados para o arranjo 2, o arranjo 3 fez-se necessário.

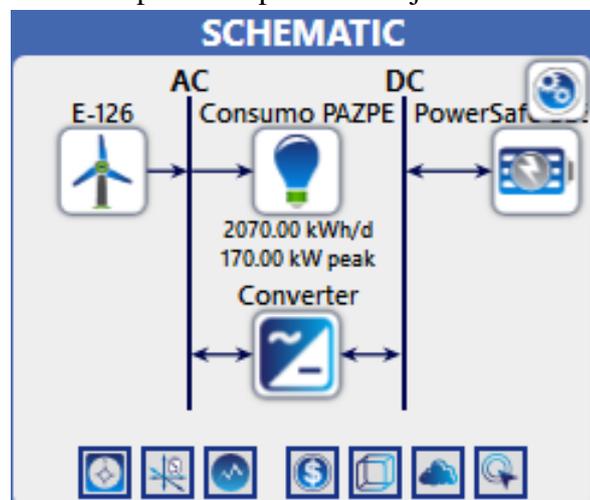
Tabela 9 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 2

Local	Porto do Pecém - Distrito do Pecém, São Gonçalo do Amarante	
	Altitude acima do nível do mar	135.00 m
	Altura do anemômetro	50.00 m
	Rugosidade da superfície	0.0002 m
Recurso eólico	Fator de forma da distribuição de Weibull	3.30
	Horário da velocidade de pico	10 h
	Velocidade Média Anual	8.5 m/s
	Modelo	Enercon E-126 [7.5MW]
	Potência unitária	7.5 MW
	Capital	\$18,357,000.00
	Custo de substituição	\$18,357,000.00
Turbina eólica	Custo de Operação e Manutenção	1% do custo de substituição \$183.570
	Vida útil	20 anos
	Altura da torre	135.00 m
	Tempo do passo	60 minutos
Carga CA	Varição randômica dia após dia	20.0%
	Varição randômica do passo	10.0%
	Consumo Médio Anual	2070 (KWh/dia)
	Taxa de desconto nominal	13.3%
Parâmetros econômicos	Taxa de inflação esperada	11.7%
	Tempo de vida do projeto	25 anos

Fonte: Fonte: Elaborado pela autora

A figura 39 mostra o esquemático dos componentes para o arranjo 3.

Figura 39 – Esquemático dos componentes para o arranjo 3



Fonte: Elaborado pela autora

A tabela 10 destaca todos os parâmetros ajustados dos componentes utilizados no esquemático do arranjo 3. Os demais parâmetros foram deixados com os valores *default* do simulador. Para a tabela 10 foram acrescentadas as informações sobre a bateria e o conversor.

Os parâmetros para a bateria são inspirados pelo modelo utilizado por Yeshalem e Khan (2017), diferindo apenas no tamanho da *string*. A *string* igual a 10 busca aumentar a potência de saída para 120 V e diminuir custos no conversor.

Tabela 10 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 3

Local	Porto do Pecém - Distrito do Pecém, São Gonçalo do Amarante	
Recurso eólico	Altitude acima do nível do mar	135.00 m
	Altura do anemômetro	50.00 m
	Rugosidade da superfície	0.0002 m
	Fator de forma da distribuição de Weibull	3.30
	Horário da velocidade de pico	10 h
	Velocidade Média Anual	8.5 m/s
Turbina eólica	Modelo	Enercon E-126 [7.5MW]
	Potência unitária	7.5 MW
	Capital	\$18,357,000.00
	Custo de substituição	\$18,357,000.00
	Custo de Operação e Manutenção	1% do custo de substituição \$183.570
	Vida útil	20 anos
	Altura da torre	135.00 m
Carga CA	Tempo do passo	60 minutos
	Variação randômica dia após dia	20.0%
	Variação randômica do passo	10.0%
	Consumo Médio Anual	2070 (KWh/dia)
Parâmetros econômicos	Taxa de desconto nominal	13.3%
	Taxa de inflação esperada	11.7%
	Tempo de vida do projeto	25 anos
Conversor	Modelo	Conversor genérico
	Vida útil do inversor	15 anos
	Eficiência do inversor	95.0%
	Capacidade relativa do retificador	100.0%
	Eficiência do retificador	95.0%
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
	Custo de Operação e Manutenção	\$ 10.00
Bateria	Modelo	EnerSys PowerSafe SBS 190F
	Tamanho da string	10
	Estado inicial de carga	100.0%
	Mínimo estado de carga	30.0%
	Capacidade nominal	2.57 kW
	Vida útil	15 anos
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
	Custo de Operação e Manutenção	\$ 10.00

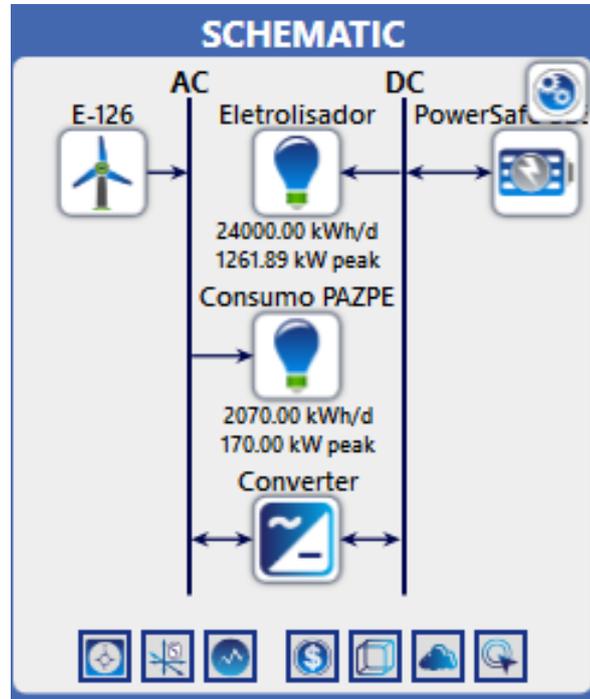
Fonte: Elaborado pela autora

3.1.4.4 Arranjo 4: Aerogeradores com suporte de baterias suprem as cargas do prédio administrativo da ZPE e do eletrolisador

O arranjo 4 é um sistema *offgrid* com geração eólica renovável, suprindo as cargas ligadas diretamente ao parque eólico *offshore* quanto cargas supridas diretamente pelo sistema de baterias, no caso, o eletrolisador.

A figura 40 mostra o esquemático dos componentes para o arranjo 4.

Figura 40 – Esquemático dos componentes para o arranjo 4



Fonte: Elaborado pela autora

A tabela 11 destaca todos os parâmetros ajustados dos componentes utilizados no esquemático do arranjo 4. Os demais parâmetros foram mantidos com os valores *default* do simulador. Para a tabela 11 foram acrescentadas as informações sobre o eletrolisador.

As variações randômicas atribuídas para a carga CC do Eletrolisador foram reduzidas, para fins de se aproximar ao comportamento de uma carga em corrente contínua.

O eletrolisador selecionado para a análise tem potência de 1000 kW e, como descrito na tabela 5, o insumo de energia necessário para a produção de hidrogênio para essa potência é de 24000 kWh.

3.1.4.5 Arranjo 5: Aerogeradores com suporte de bateriais suprem somente o eletrolisador

O arranjo 5 é um sistema *offgrid* com geração eólica renovável, suprimindo somente as cargas supridas diretamente pelo sistema de baterias, no caso, o eletrolisador.

A figura 41 mostra o esquemático dos componentes para o arranjo 5.

A tabela 12 destaca todos os parâmetros ajustados dos componentes utilizados no esquemático do arranjo 5. Os demais parâmetros foram deixados com os valores *default* do simulador. Para a tabela 11 foram retiradas as informações sobre as cargas do prédio

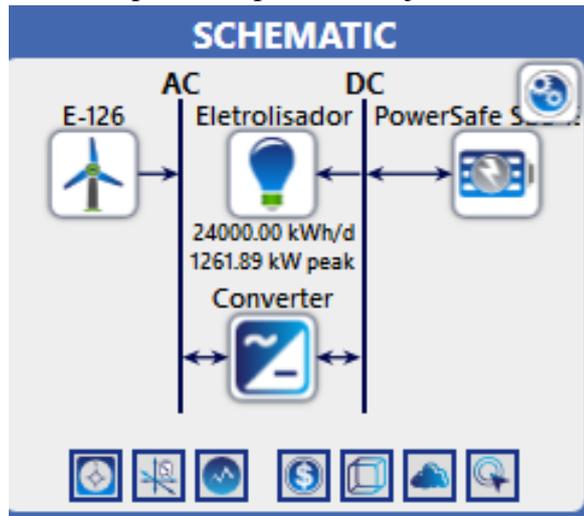
Tabela 11 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 4

Local	Porto do Pecém - Distrito do Pecém, São Gonçalo do Amarante	
Recurso eólico	Altitude acima do nível do mar	135.00 m
	Altura do anemômetro	50.00 m
	Rugosidade da superfície	0.0002 m
	Fator de forma da distribuição de Weibull	3.30
	Horário da velocidade de pico	10 h
	Velocidade Média Anual	8.5 m/s
Turbina eólica	Modelo	Enercon E-126 [7.5MW]
	Potência unitária	7.5 MW
	Capital	\$18,357,000.00
	Custo de substituição	\$18,357,000.00
	Custo de Operação e Manutenção	1% do custo de substituição \$183.570
	Vida útil	20 anos
	Altura da torre	135.00 m
Carga CA	Tempo do passo	60 minutos
	Varição randômica dia após dia	20.0%
	Varição randômica do passo	10.0%
	Consumo Médio Anual	2070 (KWh/dia)
Parâmetros econômicos	Taxa de desconto nominal	13.3%
	Taxa de inflação esperada	11.7%
	Tempo de vida do projeto	25 anos
Conversor	Modelo	Conversor genérico
	Vida útil do inversor	15 anos
	Eficiência do inversor	95.0%
	Capacidade relativa do retificador	100.0%
	Eficiência do retificador	95.0%
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
	Custo de Operação e Manutenção	\$ 10.00
Bateria	Modelo	EnerSys PowerSafe SBS 190F
	Tamanho da string	10
	Estado inicial de carga	100.0%
	Mínimo estado de carga	30.0%
	Capacidade nominal	2.57 kW
	Vida útil	15 anos
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
	Custo de Operação e Manutenção	\$ 10.00
Carga CC - Eletrolisador	Tempo do passo	60 minutos
	Varição randômica dia após dia	5.0%
	Varição randômica do passo	5.0%
	Consumo Médio Anual	24000 (KWh/dia)

Fonte: Elaborado pela autora

administrativo da ZPE.

Figura 41 – Esquemático dos componentes para o arranjo 5



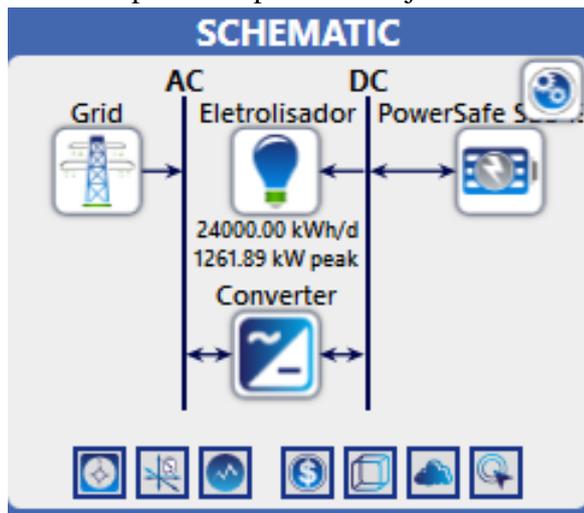
Fonte: Elaborado pela autora

3.1.4.6 Arranjo 6: Rede elétrica supre as cargas do eletrolisador

O arranjo 6 é semelhante ao arranjo 5, mas a diferença é que a eletricidade que supre o eletrolisador provém da rede elétrica e não do parque eólico *offgrid*. Esse arranjo busca representar o suprimento do eletrolisador sendo suprido pela rede elétrica, com intermédio do banco de baterias.

A figura 42 mostra o esquemático dos componentes para o arranjo 6.

Figura 42 – Esquemático dos componentes para o arranjo 5



Fonte: Elaborado pela autora

A tabela 13 destaca todos os parâmetros ajustados dos componentes utilizados no esquemático do arranjo 6. Os demais parâmetros foram deixados com os valores *default* do simulador. Para a tabela 13 foram retiradas as informações sobre a turbina eólica.

Tabela 12 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 5

Local	Porto do Pecém - Distrito do Pecém, São Gonçalo do Amarante	
Recurso eólico	Altitude acima do nível do mar	135.00 m
	Altura do anemômetro	50.00 m
	Rugosidade da superfície	0.0002 m
	Fator de forma da distribuição de Weibull	3.30
	Horário da velocidade de pico	10 h
	Velocidade Média Anual	8.5 m/s
Turbina eólica	Modelo	Enercon E-126 [7.5MW]
	Potência unitária	7.5 MW
	Capital	\$18,357,000.00
	Custo de substituição	\$18,357,000.00
	Custo de Operação e Manutenção	1% do custo de substituição \$183.570
	Vida útil	20 anos
Parâmetros econômicos	Altura da torre	135.00 m
	Taxa de desconto nominal	13.3%
	Taxa de inflação esperada	11.7%
Conversor	Tempo de vida do projeto	25 anos
	Modelo	Conversor genérico
	Vida útil do inversor	15 anos
	Eficiência do inversor	95.0%
	Capacidade relativa do retificador	100.0%
	Eficiência do retificador	95.0%
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
Custo de Operação e Manutenção	\$ 10.00	
Bateria	Modelo	EnerSys PowerSafe SBS 190F
	Tamanho da string	10
	Estado inicial de carga	100.0%
	Mínimo estado de carga	30.0%
	Capacidade nominal	2.57 kW
	Vida útil	15 anos
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
Custo de Operação e Manutenção	\$ 10.00	
Carga CC - Eletrolisador	Tempo do passo	60 minutos
	Varição randômica dia após dia	5.0%
	Varição randômica do passo	5.0%
	Consumo Médio Anual	24000 (KWh/dia)

Fonte: Elaborado pela autora

Mediante os seis esquemáticos e os parâmetros acima descritos, o próximo capítulo traz análises técnica e econômica para cada um dos arranjos. A finalidade é evidenciar os arranjos mais favoráveis para cada vertente e encontrar uma solução de implementação para o nosso estudo de caso.

Na tabela 14 é destacado um compilado dos seis arranjos e suas características

Tabela 13 – Parâmetros ajustados para o esquemático do arranjo 6

Local	Porto do Pecém - Distrito do Pecém, São Gonçalo do Amarante	
Recurso eólico	Altitude acima do nível do mar	135.00 m
	Altura do anemômetro	50.00 m
	Rugosidade da superfície	0.0002 m
	Fator de forma da distribuição de Weibull	3.30
	Horário da velocidade de pico	10 h
	Velocidade Média Anual	8.5 m/s
Rede elétrica	Preço da energia da rede	0.10 (\$/kWh)
	Preço de venda da energia da rede	0.050 (\$/kWh)
Parâmetros econômicos	Taxa de desconto nominal	13.3%
	Taxa de inflação esperada	11.7%
	Tempo de vida do projeto	25 anos
Conversor	Modelo	Conversor genérico
	Vida útil do inversor	15 anos
	Eficiência do inversor	95.0%
	Capacidade relativa do retificador	100.0%
	Eficiência do retificador	95.0%
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
Custo de Operação e Manutenç.	\$ 10.00	
Bateria	Modelo	EnerSys PowerSafe SBS 190F
	Tamanho da string	10
	Estado inicial de carga	100.0%
	Mínimo estado de carga	30.0%
	Capacidade nominal	2.57 kW
	Vida útil	15 anos
	Capital	\$ 300.00
	Custo de substituição	\$ 300.00
Custo de Operação e Manutenç.	\$ 10.00	
Carga CC - Eletrolisador	Tempo do passo	60 minutos
	Variação randômica dia após dia	5.0%
	Variação randômica do passo	5.0%
	Consumo Médio Anual	24000 (KWh/dia)

Fonte: Elaborado pela autora

principais.

Tabela 14 – Características principais dos seis arranjos simulados

	Conectado à rede elétrica	Presença de aerogeradores	Suporte de baterias	Presença de conversor	Supre Cargas CA	Supre Cargas CC	Produz H2
Arranjo 1	X	-	-	-	X	-	-
Arranjo 2	-	X	-	-	X	-	-
Arranjo 3	-	X	X	X	X	-	-
Arranjo 4	-	X	X	X	X	X	X
Arranjo 5	-	X	X	X	-	X	X
Arranjo 6	X	-	X	X	-	X	X

Fonte: Elaborado pela autora

4 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são evidenciados os principais resultados obtidos nas simulações dos esquemáticos descritos no capítulo 3 e, em seguida, aspectos técnicos e econômicos são utilizados para destacar os arranjos mais favoráveis à implementação.

4.1 Comportamento das curvas de geração e da demanda de carga

A relação entre a geração e a carga é algo diretamente conectado com a eficiência do sistema proposto. Nesse sentido, a sobreposição das curvas de geração de cada esquemático e das respectivas cargas que são atendidas é um importante parâmetro para avaliar os arranjos que melhor aproveitam a eletricidade.

4.1.1 Arranjo 1: Curva de geração e demanda de carga

No arranjo 1, o suprimento de eletricidade é feito diretamente pela rede elétrica, onde essa se caracteriza por fornecer a quantidade exata que a carga demanda. Dessa maneira, as curvas de geração e de carga na figura 43 são coincidentes e não há excessos de eletricidade. O gráfico superior ilustra a curva da carga e o gráfico inferior ilustra a geração de eletricidade.

Figura 43 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 1



Fonte: (HOMER)

4.1.2 Arranjo 2: Curva de geração e demanda de carga

No arranjo 2, o suprimento de eletricidade é feito diretamente por turbinas eólicas *offshore*. A simulação não foi concretizada para esse arranjo devido à incapacidade dessa geração atender à demanda. A intermitência da geração de energia a partir dos ventos e a ausência de um suporte por baterias impedem o suprimento das cargas do sistema em toda linha de base simulada.

Para aprofundar nos detalhes é interessante uma discretização do padrão de consumo horário real, assim as variações ao longo do dia ficam mais evidentes.

4.1.3 Arranjo 3: Curva de geração e demanda de carga

No arranjo 3, o suprimento de eletricidade é feito diretamente por turbinas eólicas *offshore* com suporte de um banco de baterias. A partir dos resultados na figura 44 é possível observar os instantes de baixa geração de energia sendo compensados pelo banco de baterias para garantir o suprimento das cargas. A imagem 45 amplifica a visualização dessa compensação pela bateria na madrugada do dia 21/junho para o dia 22/junho. A curva em roxo ilustra a geração, a curva em verde ilustra as baterias e a curva em azul ilustra a carga a ser atendida.

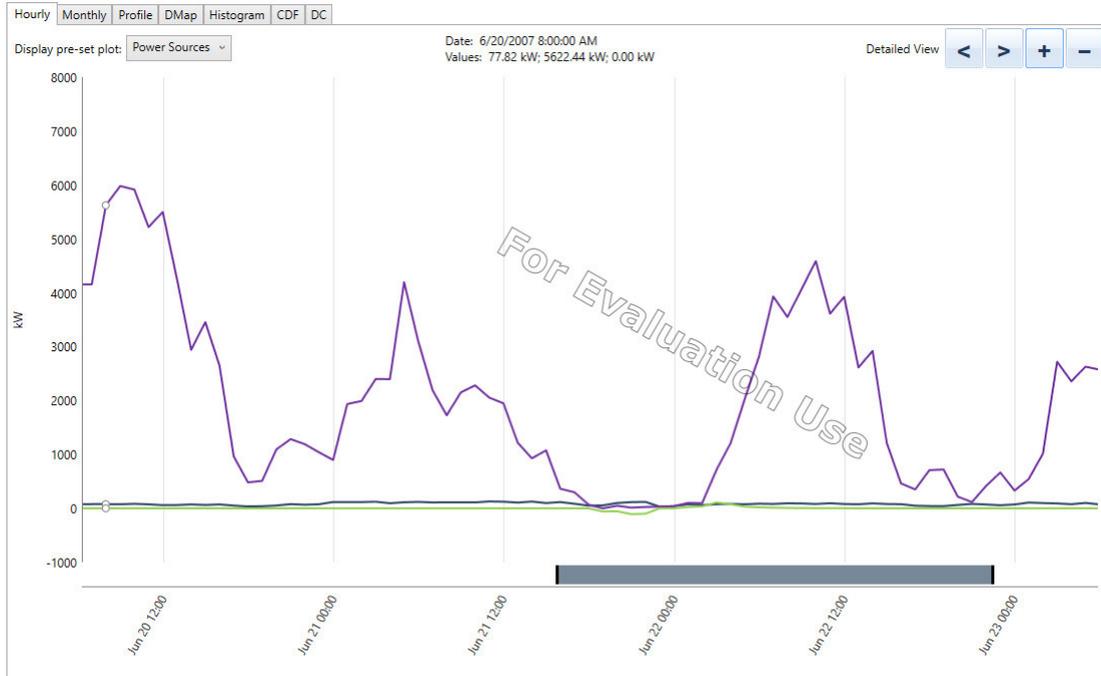
Figura 44 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 3



Fonte: (HOMER)

Um ponto a considerar nesse arranjo é o elevado excesso de eletricidade gerado, em

Figura 45 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 3 - Ampliação de imagem



Fonte: (HOMER)

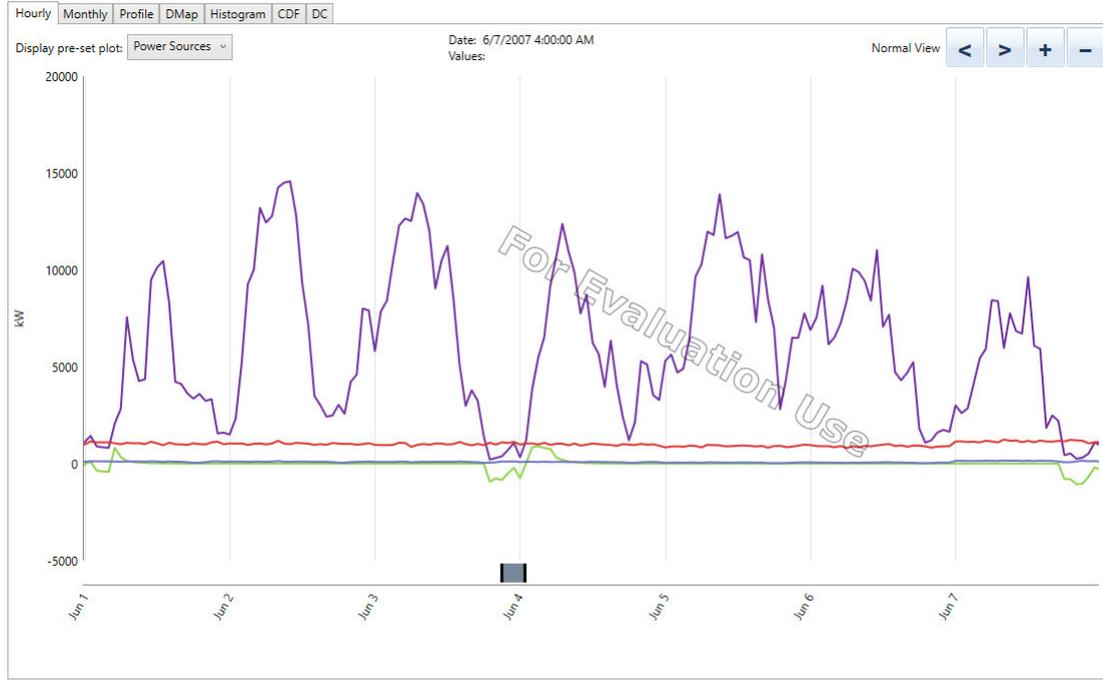
torno de 26.778.639 kWh/ano de excedente. A alternativa seria a inclusão de uma carga que aproveite esses excedentes eólicos, como o eletrolisador, para produzir hidrogênio. No entanto, foi considerado um comportamento de consumo linear para o eletrolisador e, essa análise pode não representar a realidade de funcionamento.

4.1.4 Arranjo 4: Curva de geração e demanda de carga

No arranjo 4, o suprimento de eletricidade é feito tanto diretamente por turbinas eólicas *off-shore* para as cargas em corrente alternada quanto pelo banco de baterias para as cargas em corrente contínua. A partir dos resultados na figura 46 é possível observar tanto um aumento no pico da geração quanto a compensação feita pela bateria em instantes de geração insuficiente. O pico na geração deve-se à necessidade de dois aerogeradores para suprir a carga. A curva em roxo ilustra a geração pelos aerogeradores, a curva em vermelho ilustra o eletrolisador, a curva em azul ilustra as cargas do prédio da ZPE e a curva em verde ilustra o comportamento do banco de baterias.

Para fins de ilustração, esse esquemático tem 45.081.650 kWh/ano de energia em excedente. A quantidade de energia excedente aumentou em relação ao arranjo passado, justamente pela inclusão não estratégica da carga do eletrolisador. Com as informações horárias

Figura 46 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 4



Fonte: (HOMER)

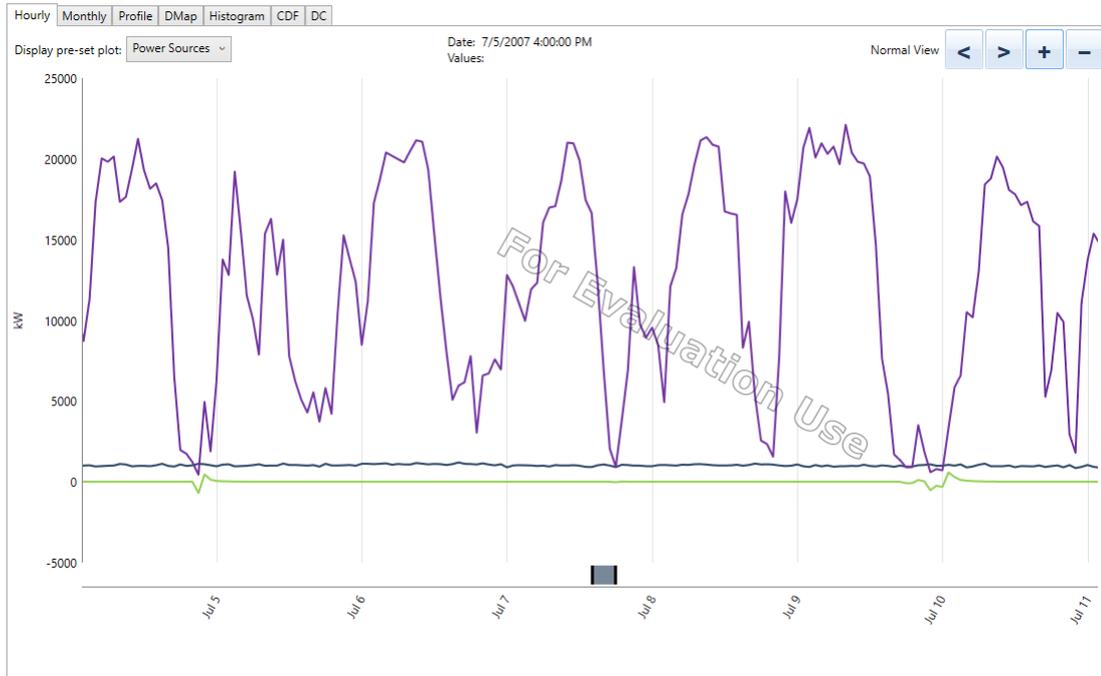
seria possível ajustar o seu funcionamento nos momentos de pico de geração. Essa sugestão não considera se o funcionamento do eletrolisador pode ser tão intermitente, ou seja, ligar ou desligar de acordo com a necessidade.

4.1.5 Arranjo 5: Curva de geração e demanda de carga

No arranjo 5, o suprimento de eletricidade é feito pelo banco de bateriais para o uso exclusivo das cargas em corrente contínua - o eletrolisador. A partir dos resultados na figura 47 é possível observar tanto um aumento no pico da geração quanto a compensação feita pela bateria em instantes de geração insuficiente. O pico na geração deve-se a necessidade de três aerogeradores para suprir a carga. A curva em roxo ilustra a geração eólica, a curva em azul ilustra as cargas do prédio da ZPE e a curva em verde ilustra o comportamento do banco de bateriais.

Para fins de ilustração, esse esquemático tem 73.379.069 kWh/ano de energia em excedente. A quantidade de energia excedente aumentou em relação ao arranjo passado, justamente pela inclusão não estratégica da carga do eletrolisador. Com as informações mais horárias seria possível ajustar o seu funcionamento nos momentos de pico de geração. Ademais, o valor médio da carga do eletrolisador é mais alto que a cargas da ZPE e, por isso, há necessidade de mais geração e, conseqüentemente, mais excedente de energia.

Figura 47 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 5



Fonte: (HOMER)

4.1.6 Arranjo 6: Curva de geração e demanda de carga

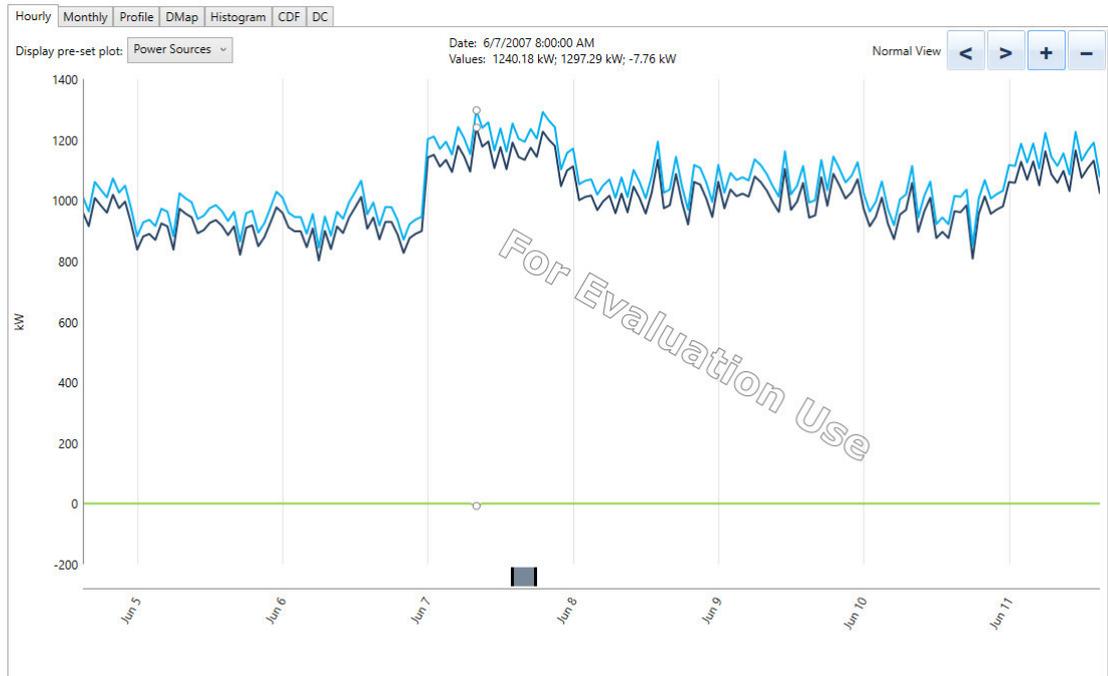
No arranjo 6, o suprimento de eletricidade é feito pela rede elétrica para o uso exclusivo das cargas em corrente contínua - o eletrolisador. Os resultados da simulação desse esquemático retornaram dois sistemas possíveis: com e sem suporte do banco de baterias. Nas figuras 48 e 49 são ilustrados as curvas de geração com e sem suporte do banco de baterias, respectivamente.

A partir dos resultados nas figuras 48 e 49 é possível observar que a curva de geração acompanha a curva de demanda, mas existe um *gap* entre elas devido às perdas no processo de conversão CA/CC. A curva em azul ilustra a geração e a curva em roxo ilustra a demanda de carga. Foi preferível a escolha pelo sistema com suporte de baterias, pois, segundo Agency (2020a), o armazenamento pode ajudar significativamente a dissociar a oferta variável da demanda de hidrogênio, podendo vir na forma de armazenamento eletroquímico para flutuações de curto prazo.

Para fins de ilustração, esse esquemático não tem energia em excedente.

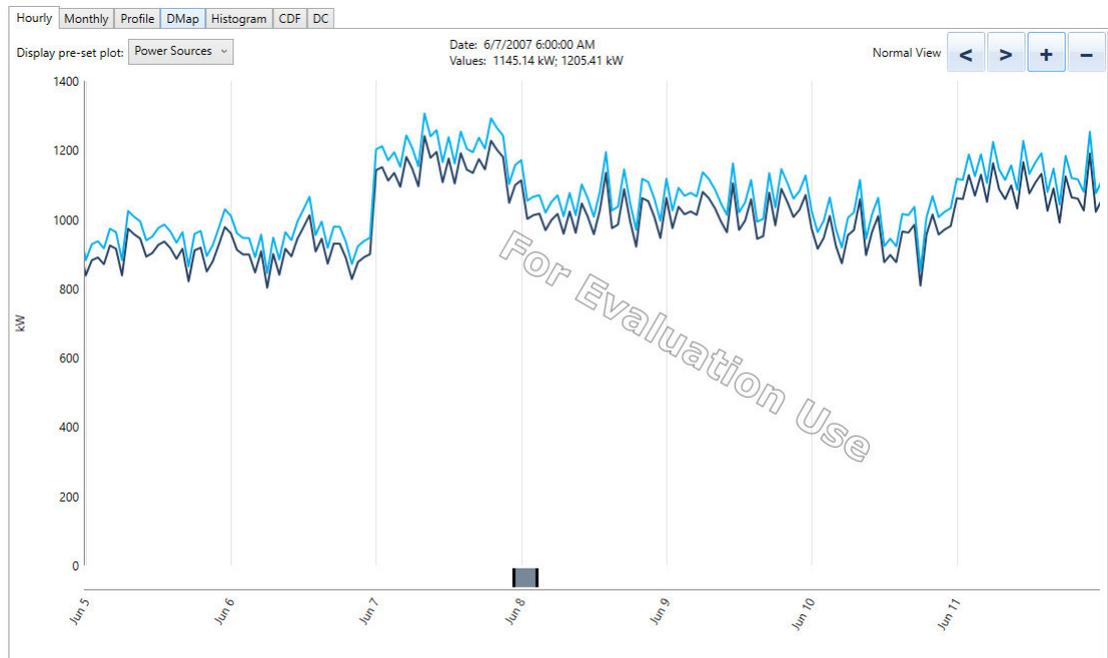
Avaliando pelo aspecto de atendimento de geração sem excedentes de energia, os arranjos 1 e 6, ambos ligados à rede elétrica, são os que apresentam melhor resultado para evitar excedentes de energia. No entanto, dentre esses, o arranjo 6 é o que supre o eletrolisador, responsável pela produção de hidrogênio. A implementação desse arranjo resultaria numa

Figura 48 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 6 - Com suporte do banco de baterias



Fonte: (HOMER)

Figura 49 – Sobreposição de curvas de geração e de carga para o arranjo 6 - Sem suporte do banco de baterias



Fonte: (HOMER)

produção de 412 kg de gás hidrogênio por dia, como evidenciado na Figura 33. A afirmação sobre esse hidrogênio ser certificado como verde ou não é um trâmite ainda em discussão, pois há incertezas quanto a certificação de origem da energia.

4.2 Impacto do armazenamento de energia elétrica

Para dar suporte a geração, o armazenamento de energia do nosso sistema é feito por bancos de baterias. Nesta seção é feita uma análise financeira do impacto do armazenamento de energia elétrica para os esquemáticos que necessitam desse suporte. Na tabela 15 são colocadas algumas informações estruturais de armazenamento como a quantidade de baterias e a capacidade nominal delas e na tabela 16 são dispostas informações econômicas como o capital investido e os custos de operação e manutenção ao longo de 25 anos.

Tabela 15 – Informações técnicas do armazenamento de energia para os esquemáticos simulados

Esquemático	Quantidade de Baterias	Vida útil (anos)	Rendimento anual (kWh/ano)	Capacidade Nominal (kWh)	Capacidade Nominal Útil (kWh)
Arranjo 1	-	-	-	-	-
Arranjo 2	-	-	-	-	-
Arranjo 3	180.00	15.00	5,604.00	463.00	324.00
Arranjo 4	10,790.00	15.00	489,091.00	27,772.00	19,440.00
Arranjo 5	5,730.00	15.00	272,173.00	14,748.00	10,324.00
Arranjo 6	70.00	15.00	57.10	180.00	126.00

Fonte: (Elaborado pela autora com dados do HOMER)

Tabela 16 – Informações econômicas do armazenamento de energia para os esquemáticos simulados

Esquemático	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M (\$)	Salvage	Total
Arranjo 1	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Arranjo 2	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Arranjo 3	\$ 54,000.00	\$ 44,092.79	\$ 37,930.01	\$ -12,839.92	\$ 123,182.88
Arranjo 4	\$ 3,237,000.00	\$ 2,643,117.81	\$ 2,273,693.19	\$ -769,681.67	\$ 7,384,129.33
Arranjo 5	\$ 1,719,000.00	\$ 1,403,620.49	\$ 1,207,438.55	\$ -408,737.35	\$ 3,921,321.69
Arranjo 6	\$ 21,000.00	\$ 17,147.20	\$ 14,750.60	\$ -4,993.30	\$ 47,904.50

Fonte: (Elaborado pela autora com dados do HOMER)

A partir das tabelas 15 e 16, é possível observar que os arranjos 4 e 5 são os esquemáticos com maior quantidade de baterias e com maior custo financeiro. O ponto em comum entre eles é a inserção do eletrolisador no sistema. Como dito anteriormente, a não inserção estratégica do eletrolisador nos momentos de pico da geração, acaba estressando os momentos de baixa geração para conseguir suprir tanto as cargas da ZPE quanto a carga do eletrolisador. O cenário é mais atrativo no arranjo 5, pois as cargas da ZPE são retiradas, mas o custo financeiro continua elevado.

4.3 Comparativo financeiro com a eólica *onshore*

A proposta de utilização de uma usina eólica *offshore* neste estudo é motivada, principalmente, pela alta capacidade instalada que projetos desse tipo conseguem atingir e pelo cenário eólico atrativo sobre o leito do mar. No entanto as tecnologias voltadas para o aproveitamento da energia dos ventos *onshore* estão mais consolidadas. Diante disso, esta seção busca fazer um comparativo financeiro dos seis arranjos simulados com o LCOE da geração eólica *onshore*.

Na tabela 17 são evidenciados os parâmetros econômicos para oferta de energia eólica *onshore*.

Tabela 17 – Parâmetros econômicos para a oferta de energia eólica *onshore*

Oferta	Eólica onshore
CAPEX Referência, sem JDC [\$/kW]	\$918.37
O&M [\$/kW/ano]	\$18.37
LCOE Eólica Onshore [\$/kWh]	\$0.053

Fonte: CAPEX e O&M (EPE, 2021b)/ LCOE (AGENCY, 2020b) (Adaptado pela autora)

Para cada arranjo simulado, o NPC do projeto e a geração de energia consumida são divididos para calcular o valor do LCOE do sistema. Em seguida, esse valor é comparado com o valor do LCOE da eólica *onshore*.

Na tabela 18 segue uma síntese das informações necessárias para esse comparativo financeiro.

Tabela 18 – Cálculo do LCOE dos arranjos e comparativo com o LCOE da eólica *onshore*

Esquemático	NPC anualizado (\$)	Geração consumida (kWh/ano)	LCOE do Arranjo	LCOE Onshore	Comparativo
Arranjo 1	\$75,555.00	755,550.00	\$0.1000	\$0.053	Onshore preferível
Arranjo 2	-	-	-	\$0.053	-
Arranjo 3	\$1,263,019.66	755,529.00	\$1.6717	\$0.053	Onshore preferível
Arranjo 4	\$4,023,489.89	9,510,677.00	\$0.4230	\$0.053	Onshore preferível
Arranjo 5	\$3,986,843.64	8,755,357.00	\$0.4554	\$0.053	Onshore preferível
Arranjo 6	\$952,076.06	8,760,000.00	\$0.1087	\$0.053	Onshore preferível

Fonte: (Elaborado pela autora com dados do HOMER)

Em vista das informações dispostas na tabela 18, é possível inferir que o LCOE *onshore* é o preferível, em comparação com os arranjos simulados. Os arranjos mais vantajosos foram os esquemas 1 e 6 por se tratarem de sistemas conectados à rede. Sistemas *ongrid* não

apresentam investimento de capital inicial, apenas de operação e manutenção pela compra de energia.

No que tange aos arranjos que suprem o eletrolisador, o LCOE ainda é pouco atrativo. Um próximo passo nessa análise seria o cálculo do LCOH - Custo nivelado do hidrogênio. De forma geral, o LCOH é estimado pelo NPC anualizado do sistema dividido pela quantidade de hidrogênio produzido. Segue na tabela 19 o LCOH para os arranjos.

Tabela 19 – Cálculo do LCOH dos arranjos

Esquemático	NPC anualizado (\$)	Hidrogênio produzido (kg H ₂ /ano)	LCOH do Arranjo
Arranjo 1	-	-	-
Arranjo 2	-	-	-
Arranjo 3	\$1,263,019.66	150,380.00	\$8.3989
Arranjo 4	\$4,023,489.89	150,380.00	\$26.7555
Arranjo 5	\$3,986,843.64	150,380.00	\$26.5118
Arranjo 6	\$952,076.06	150,380.00	\$6.3311

Fonte: (Elaborado pela autora com dados do HOMER)

O cálculo do LCOH acima descrito não considera a eficiência no processo de conversão da energia elétrica para energia química e, por isso, não foi comparado com um LCOH base. Os arranjos 1 e 2 não suprem o eletrolisador e, por isso, não podem produzir hidrogênio.

De forma geral, os custos nivelados de energia elétrica para os arranjos *offgrid* com eletrolisador ainda não se apresentam economicamente atrativos. No entanto com o arranjo 6 apresentando um dos menores LCOE e LCOH levanta o debate se é preferível iniciar a transição energética pela produção de hidrogênio azul para ganho de escala e depois investir no hidrogênio verde. Um outro ponto a considerar é a importância de definições acerca da certificação da produção de hidrogênio verde, entendendo se a utilização da rede elétrica possa ser incentivada nesse processo.

4.4 Comparativo entre o fator de capacidade real e teórico

Nesta última seção de resultados será avaliado o fator de capacidade de cada um dos arranjos, classificando-os e comparando-os com o fator teórico proposto nos estudos do Atlas Eólico e Solar do Ceará .

Para uma altura de 120 metros, o fator de capacidade anual médio no Pecém é de 51,9 % e de 55 % para uma altura de 150 metros.(AL., 2019a)

O fator de capacidade é uma medida de aproveitamento da capacidade instalada de um empreendimento. O cálculo do fator de capacidade é dado pela equação 4.1, onde C_i é a capacidade instalada do empreendimento em kW, G_e é a geração de energia de um ano (Kwh) e 8760 representa a quantidade de horas num ano.

$$Fator_{capacidade} = \frac{G_e}{C_i \cdot 8760} \quad (4.1)$$

Na tabela 20 é mostrado o fator de capacidade para todos os arranjos estudados.

Tabela 20 – Descritivo do fator de capacidade para os sistemas simulados

Esquemático	Capacidade Instalada (kW)	Geração de energia (kWh/ano)	Fator de capacidade
Arranjo 1	999999 (Rede)	755,550.00	0.009%
Arranjo 2	-	-	-
Arranjo 3	7,500.00	27,537,644.00	41.914%
Arranjo 4	22,500.00	82,603,932.00	41.910%
Arranjo 5	22,500.00	82,603,932.00	41.910%
Arranjo 6	999999 (Rede)	9,220,993.00	0.105%

Fonte: (Elaborado pela autora com dados do HOMER)

Os arranjos 1 e 6 apresentam baixo fator de capacidade, pois a rede supre uma energia bem superior às cargas a serem atendidas, no simulador é considerado infinito. Para os demais arranjos, o fator de capacidade ficou abaixo do valor teórico da região. Esse fato pode estar relacionado diretamente com o padrão de funcionamento da turbina selecionada.

Como a turbina selecionada foi escolhida, principalmente, pela potência ser semelhante a um aerogerador offshore, o seu padrão de funcionamento máximo ocorre para velocidades de vento acima de 15 m/s e o local tem velocidades variando entre 5 e 8,5 m/s. Dessa maneira, o trabalho da turbina efetivo não atinge sua capacidade máxima de geração.

Nos apêndices A, B, C, D, E e F é possível visualizar essas e outras informações de cada um dos esquemáticos simulados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, alguns aprendizados, orientações sobre os resultados encontrados e sugestões de trabalhos futuros.

A apresentação e disposição dos esquemáticos propostos possibilita um entendimento crescente ao leitor sobre o papel e a necessidade de cada componente dentro do sistema de energia, enfatizando o papel de entrada do eletrolizador.

Em relação à primeira análise que consiste de uma avaliação da sobreposição da curva de geração e de carga. No geral, os sistemas não conectados apresentaram excedentes de energia expressivos, mais de 26 milhões de kWh/ano para o arranjo 3, mais de 45 milhões de kWh/ano para o arranjo 4 e mais de 73 milhões de kWh/ano para o arranjo 5. A conclusão é que a inserção do eletrolizador como carga de trabalho contínuo estressa o sistema de geração eólico nos instantes de baixa produção de eletricidade. Dessa maneira, a inserção do eletrolizador traria mais ganhos se fosse inserida em momentos estratégicos da geração, a fim de diminuir os excedentes de energia e não estressar os vales da geração.

Para os arranjos conectados à rede, percebe-se um acompanhamento com a carga, mas não é possível garantir que o hidrogênio produzido no arranjo 6 é verde, devido às inúmeras fontes que estão interligadas à rede elétrica. Dessa maneira, as discussões e as definições sobre a certificação do hidrogênio são fundamentais para entender se o arranjo 6 poderia ser classificado como produção de hidrogênio verde.

A segunda análise faz uma ponderação financeira para os custos atrelados ao armazenamento de energia elétrica. Para mitigar as flutuações da geração e atender a demanda de hidrogênio, o eletrolizador pode ser suprido por baterias eletroquímicas. No geral, o investimento de baterias cresce à medida que mais cargas são inseridas, \$ 123 mil dólares para o arranjo 3 (cargas da ZPE), \$ 7 milhões de dólares para o arranjo 4 (cargas da ZPE + carga do eletrolizador) e cerca de \$ 4 milhões de dólares para o arranjo 5 (carga do eletrolizador), isso porque o eletrolizador não opera aqui em pontos estratégicos da geração e, quando a geração está em baixa, o armazenamento é requisitado. Além disso, com uma demanda de energia contínua, o banco de baterias precisa ser maior para conseguir atender a demanda. A sugestão seria suprir o eletrolizador em momentos de excedente de energia. O entendimento sobre o padrão de consumo horário do eletrolizador seria fundamental nessa análise.

No que tange à terceira análise, foi feito um comparativo de LCOE dos esquemáticos simulados com a geração de energia elétrica por oferta em eólica *onshore*. No geral, os arranjos

1 e 6, conectados à rede elétrica, apresentaram o melhor cenário, ou seja, o custo nivelado da energia desses esquemas estariam próximos competitivamente com a eólica *onshore*. Para os demais esquemas, existem ajustes de arquitetura a serem feitas e até aprofundamento sobre a entrada do eletrolisador no sistema, pois, novamente, a colocação não-estratégica desse exige a inserção de bancos de baterias para fazer a compensação, impactando diretamente no custo nivelado do sistema. Para investir no arranjo 6, é necessário o reforço sobre a certificação de hidrogênio para garantir que tais esforços nessa arquitetura estará alinhado com as bases de transição energética.

Para a última análise feita neste trabalho foi realizado um comparativo para o fator de capacidade teórico com o real dos arranjos. O valor teórico retirado do (AL., 2019a) de 2019 apontou para os parâmetros da região um fator de capacidade médio anual em 51,9% para a altura de 120 metros das torres e de 55,0% para a altura de 150 metros. No geral, os esquemáticos não conectados à rede tiveram 41,9% de fator de capacidade, bem abaixo do teórico. De forma geral, o critério de escolha da turbina pela potência, para simular uma turbina eólica *offshore*, considera que as velocidades de vento na região deveriam ser superior a 15 m/s, mas a média anual é 8,5 m/s. Dessa forma a geração real fica distante da potência instalada dos aerogeradores. A sugestão é a escolha de uma turbina que consiga equilibrar os parâmetros de operação real com os dados de recurso eólico local.

5.1 Trabalhos futuros

Ao longo da construção deste trabalho, alguns pontos mostraram-se como passíveis de aprofundamento de estudos. Aqui, listam-se algumas sugestões de trabalhos:

A caracterização do padrão de consumo horário do eletrolisador e suas limitações de operação. Esse ponto é fundamental para um entendimento da entrada desse componente nos sistemas de energia.

Avaliação de estudos de caso de demandas de hidrogênio e ponderação de perdas na integração eletrolisador - carga de hidrogênio.

Estudo energético e econômico da cadeia do hidrogênio verde desde a disponibilidade do insumos até o atendimento da demanda. Vale envolver nesse estudo os custos com a purificação da água, dos compressores e do sistema de transporte por dutos.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, D.; DUTTA, A. Solar and wind hybrid power for an extremely remote mobile base station. **Guelph Eng J**, p. 1–10, 2013.
- AGENCY, I. R. E. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5° C Climate Goal**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2020.
- AGENCY, I. R. E. **Renewable Power Generation Costs in 2019**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2020.
- AL., C. S. E. A. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. 2019. Disponível em: <<http://atlas.adece.ce.gov.br/ebook/mobile/index.html>>. Acesso em: 5 de junho 2022.
- AL., C. S. E. A. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. 2019. 84-93 p. Disponível em: <<http://atlas.adece.ce.gov.br/ebook/mobile/index.html>>. Acesso em: 26 de junho 2022.
- AL., C. S. E. A. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. 2019. 97-97 p. Disponível em: <<http://atlas.adece.ce.gov.br/ebook/mobile/index.html>>. Acesso em: 26 de junho 2022.
- BEZERRA, V. R.; LIMA, C. A. P. de; LEITE, V. D.; MONTEIRO, L. R. R. Implementação de sistemas autônomos de geração de energia para a região do semiárido paraibano. **Mix Sustentável**, v. 5, n. 4, p. 89–95, 2019.
- BOSO, A. C. M. R.; GABRIEL, C. P. C.; FILHO, L. R. A. G. Análise de custos dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid no brasil. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 8, n. 12, 2015.
- BRASIL, B. **Emissões de Gás Carbônico por queima de combustíveis fósseis desde o início da 1ª Revolução Industrial**. 2021. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>>. Acesso em: 8 de junho 2022.
- BRASIL, B. C. do. **Meta para a taxa Selic**. 2022. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>>. Acesso em: 27 de junho 2022.
- BRASIL, W. **GERAÇÃO DE ENERGIA EM FERNANDO DE NORONHA: Alternativas para a diminuição de emissões de CO₂ no transporte e eletricidade - Brasil 2021**. 2021. Disponível em: <https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/geracao_de_energia_fernando_de_noronha_versao_web_1.pdf>. Acesso em: 22 de maio 2022.
- BRASILEIRO, E. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. [S.l.]: Cresesb, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas%20do%20potencial%20eolico%20brasileiro.pdf>. Acesso em: 6 de julho 2022.
- CABRAL, A. d. S. Análise introdutória sobre o aproveitamento eólico offshore no brasil. 2021.
- CARDOSO, O. C. V. Análise particionada de turbinas eólicas offshore utilizando o método de multiplicadores de lagrange localizados. 2014.
- CARVALHO HOWPUBLISHED=Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/energia-eolica-em-casa-como-produzir-e-quanto-custa-a-instalacao-1.3140180>>. Acesso em: 22 de maio 2022, y. L. **Energia eólica em casa: como produzir e quanto custa a instalação**.

CATAPULT. **Purpose of LCOE**. c2022. Disponível em: <<https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs>>. Acesso em: 27 de junho 2022.

CEARa, G. de T. H. **Potenciais do Estado do Ceara para Produção de Hidrogênio Verde**. 2021. Disponível em: <<https://parquetecnologico.ufc.br/wp-content/uploads/2021/02/sim.potenciais-do-estado-do-ceara-para-producao-de-hidrogenio-verde-1.6.pdf>>. Acesso em: 6 de julho 2022.

CEARa, Z. **ZPE Ceara**. c2022. Disponível em: <<https://zpeceara.com.br/zpe-ceara/>>. Acesso em: 26 de junho 2022.

DINCER, I. Green methods for hydrogen production. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 37, n. 2, p. 1954–1971, 2012.

EDUCAÇÃO, M. **Ceara**. c2022. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/ceara.htm>>. Acesso em: 5 de junho 2022.

ELIZIÁRIO, S.; DANTAS, M. C.; SILVA, K.; THOMAS, A. Novas perspectivas para o mercado de hidrogênio com o novo mercado de gás1. 2020.

ENERCON. **Enercon E-126 7.580**. [S.l.]: wind-turbine-model, c2022. Disponível em: <<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/14-enercon-e-126-7.580>>. Acesso em: 28 de junho 2022.

EPE. **Estudos da demanda de energia-2050: nota técnica DEA 13/15**. [S.l.]: Brasil, 2014.

EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge\protect\begingroup\immediate\write\@unused\def\MessageBreak`let\protect\edefYoumayprovideadefinitionwith\MessageBreak\DeclareUnicodeCharacter\errhelp\let\def\MessageBreak` \(inputenc\)\def\errmessagePackageinputencError:UnicodecharacterÍ\(U+0302\)\MessageBreaknotsetupforusewithLaTeX.``Seetheinputencpackagedocumentationforexplanation.`TypeH<return>forimmediatehelp\endgroupnio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge\protect\begingroup\immediate\write\@unused\def\MessageBreak`let\protect\edefYoumayprovideadefinitionwith\MessageBreak\DeclareUnicodeCharacter\errhelp\let\def\MessageBreak` (inputenc)\def\errmessagePackageinputencError:UnicodecharacterÍ(U+0302)\MessageBreaknotsetupforusewithLaTeX.``Seetheinputencpackagedocumentationforexplanation.`TypeH<return>forimmediatehelp\endgroupnio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acesso em: 9 de junho 2022.

EPE. **Parâmetros de Custos Geração e Transmissão**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Parâmetros%20de%20Custos%20-%20PDE%202030.pdf>>. Acesso em: 28 de junho 2022.

EPE-EMPRESA, D. P. E. Roadmap eólica offshore brasil. **Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima**. Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

ERBACH, G.; JENSEN, L. Eu hydrogen policy: hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy. EPRS: European Parliamentary Research Service, 2021.

FILHO, O. Douglas Queiroz de O. **Uma metodologia simplificada para estimativa do aproveitamento eólico offshore no litoral brasileiro estudo de caso: a ilha de Itamaracá/PE**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2011.

GAZEY, R.; SALMAN, S.; AKLIL-D'HALLUIN, D. A field application experience of integrating hydrogen technology with wind power in a remote island location. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 157, n. 2, p. 841–847, 2006.

GRANGEIRO, P. A. H. G. O potencial de geração de energia elétrica de fonte eólica onshore e offshore no estado do ceará: uma análise financeira, social e ambiental. 2012.

HOMER. **HOMER**. c2022. Disponível em: <<https://www.homerenergy.com/>>. Acesso em: 27 de junho 2022.

HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 57, p. 850–866, 2016.

HYJACK. **Hyjack - New Online Hydrogen Platform**. 2021. Disponível em: <<https://hyjack.tech/>>. Acesso em: 21 de junho 2022.

IBAMA. **COMPLEXOS EÓLICOS OFFSHORE PROJETOS COM PROCESSOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL ABERTOS NO IBAMA**. 2022. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/2022-04-20_Usinas_Eolicas_Offshore_Ibama.pdf>. Acesso em: 6 de junho 2022.

IBERDROLA. **Fernando de Noronha: compromisso com a sustentabilidade**. c2022. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/fernando-noronha-energia-renovavei>>. Acesso em: 22 de maio 2022.

IBERDROLA. **¿Qué es la energía eólica, cómo se transforma en electricidad y cuáles son sus ventajas?** c2022. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>>. Acesso em: 14 de maio 2022.

IBGE. **Inflação**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 27 de junho 2022.

IOANNOU, A.; ANGUS, A.; BRENNAN, F. A lifecycle techno-economic model of offshore wind energy for different entry and exit instances. **Applied Energy**, Elsevier, v. 221, p. 406–424, 2018.

IRENA. **Wind Energy - Wind Energy Data**. c2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/wind>>. Acesso em: 5 de junho 2022.

JUNIOR, P. B. **Alternativas para a produção de hidrogênio nas regiões brasileiras visando à geração de energia elétrica distribuída**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.

LIMA, D. K. S. d. Modelagem de alta resolução para estimativa do potencial eólico offshore da costa do ceará. 2015.

LINARDI, M. **Hidrogênio e Células a Combustível**. c2022. Disponível em: <https://ecen.com/eee66/eee66p/hidrogenio_e_celulas_a_combustivel.htm>. Acesso em: 11 de junho 2022.

MAGALHÃES, L. **Acordo de Paris: situação atual**. c2022. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/acordo-de-paris/>>. Acesso em: 9 de junho 2022.

MAGALHAES, R. d. M. B. **PRODUC AO DE HIDROGÊNIO RENOVAVEL VIA ELETROLISE A PARTIR DE EXCEDENTES DE ENERGIA EOLICA**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

MARINHO, C. d. B. Estudo do potencial eólico offshore no estado da bahia utilizando o modelo wrf. Centro Universitário SENAI CIMATEC, 2020.

MEIRELES, T. **Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas**. [S.l.]: WWF, 2020.

MONTEIRO, L. M. B. **Tecnologias de Produção de Hidrogênio Verde-Estudo Energético e Viabilidade Económica**. Tese (Doutorado) — Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2021.

MOREIRA, J. R. S. Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. **Rio de Janeiro: LTC**, 2017.

OLATOMIWA, L.; MEKHILEF, S.; HUDA, A. N.; SANUSI, K. Techno-economic analysis of hybrid pv–diesel–battery and pv–wind–diesel–battery power systems for mobile bts: the way forward for rural development. **Energy Science & Engineering**, Wiley Online Library, v. 3, n. 4, p. 271–285, 2015.

ONS. **ENERGIA AGORA - BALANÇO DE ENERGIA**. 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/balanco-de-energia>>. Acesso em: 5 de junho 2022.

ONS. **O SISTEMA EM NÚMEROS - MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA DO SIN**. 2022. Disponível em: <https://tableau.ons.org.br/t/ONS_Publico/views/MatrizdeEnergiaEltrica/PainelCapacidadeInstaladaTotal?embed_code_version=3&embed=y&loadOrderID=0&:display_spinner=no&:showAppBanner=false&:display_count=n&:showVizHome=n&:origin=viz_share_link>. Acesso em: 5 de junho 2022.

PINHO, L. L. R. de. Avaliação da produção de hidrogênio a partir de excedentes de energia eólica utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. MSc. Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

PORTUGUÊS, L. **Como Funcionam As Turbinas Eólicas?** c2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=V6lyCuw7VfU&ab_channel=Lesicsportuguês>. Acesso em: 11 de junho 2022.

SIDDIQUE, M. B.; THAKUR, J. Assessment of curtailed wind energy potential for off-grid applications through mobile battery storage. **Energy**, Elsevier, v. 201, p. 117601, 2020.

SIEMENS. **Siemens Energy e Air Liquide desenvolverão em parceria eletrolisador de larga escala para produção de hidrogênio sustentável**. 2021. Disponível em: <<https://fullenergy.grupomidia.com/siemens-energy-e-air-liquide-desenvolverao-em-parceria-eletrolisador-de-larga-escala-para-producao-de-hidrogenio-sustentavel/>>. Acesso em: 11 de junho 2022.

SIEMENS. **Setores envolvidos na tecnologia Power to X**. c2022. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html?gclid=CjwKCAjwTlaVBhBkEiwAsr7-c-8k1f3eYwL1Me77bDfh0IppqFgBTwlxg07Ons5XGCldP_2GXwiZj7BoCTOIQAvD_BwE>. Acesso em: 9 de junho 2022.

SILVA, A. d. C. Potencial eólico offshore no brasil: localização de áreas nobres através de análise multicritério. **Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE**, 2019.

SILVA, F. H. D.; DANTAS, J. H. Usina eólica híbrida, com sistema de produção de hidrogênio para geração de energia elétrica composta por módulo de célula à combustível. **Uningá Review Journal**, v. 28, n. 3, 2016.

SILVA, F. R. A. A energia eólica como uma fonte alternativa de desenvolvimento sustentável no estado do ceará. 2016.

SILVA, J. V. L.; RODRIGUES, M. I.; TAPIA, G. I. M. Análise técnica e econômica de um sistema híbrido eólico-solar off-grid em uma região rural no estado do rio grande do norte. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. [S.l.: s.n.], 2020.

SMOLINKA, T. Water electrolysis: status and potential for development. **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg**, 2014.

STAUT, F. **O processo de implantação de parques eólicos no nordeste brasileiro. 2011. 164 f.** Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana)-Escola Politécnica da . . . , 2011.

TEIXEIRA, R. M. **Análise dos impactos ambientais e implementação de parque eólico offshore: estudo de caso do parque eólico offshore em Caucaia/CE.** Tese (Doutorado), 2020.

TRAPP, B. C. Análise de viabilidade de uma fazenda eólica offshore no rio grande do sul. 2009.

URSUA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2011.

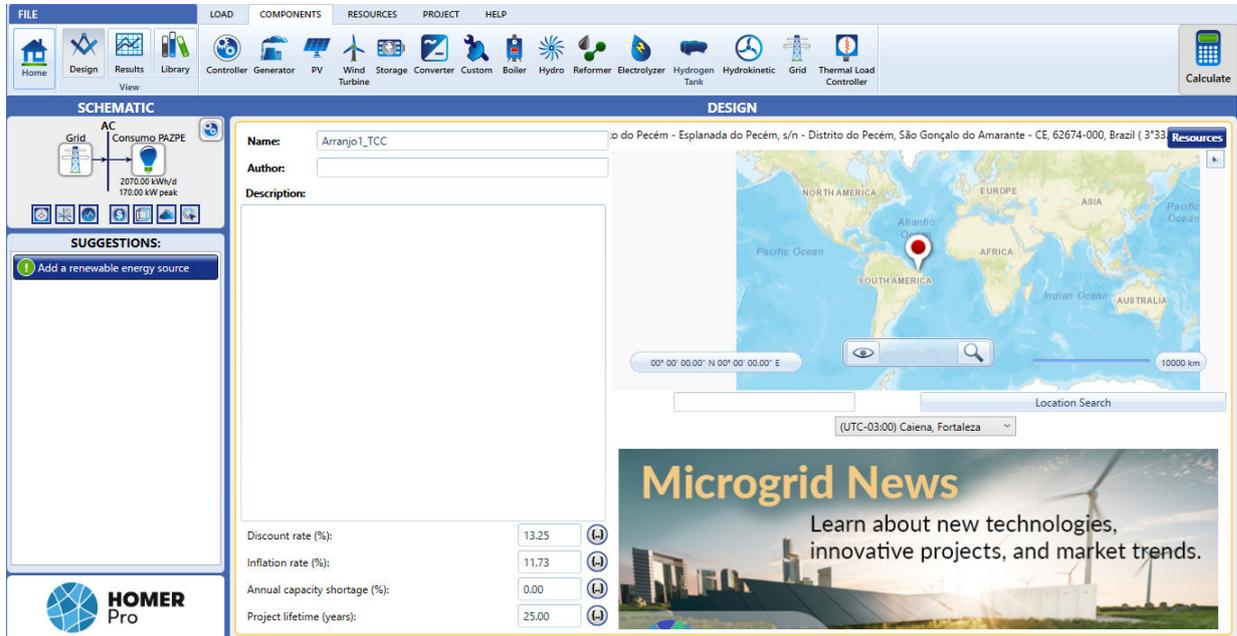
VERDE, P. H. **Sobre o Hidrogênio Verde e as Tecnologias PtX.** c2022. Disponível em: <<https://www.h2verdebrasil.com.br/o-que-e-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 10 de junho 2022.

VITERBO, J. C. **Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.

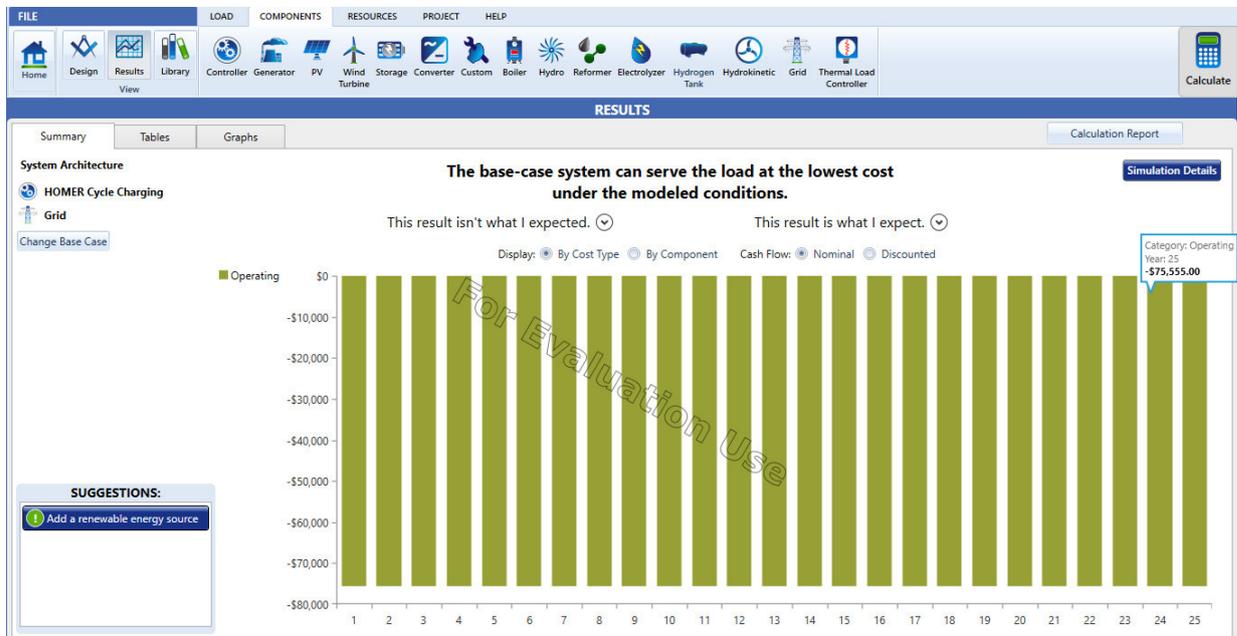
VURAL, B.; BOYNUEGRI, A.; NAKIR, I.; ERDINC, O.; BALIKCI, A.; UZUNOGLU, M.; GORGUN, H.; DUSMEZ, S. Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications. **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 35, n. 20, p. 11161–11171, 2010.

YESHALEM, M. T.; KHAN, B. Design of an off-grid hybrid pv/wind power system for remote mobile base station: A case study. **Aims Energy**, v. 5, n. 1, p. 96–112, 2017.

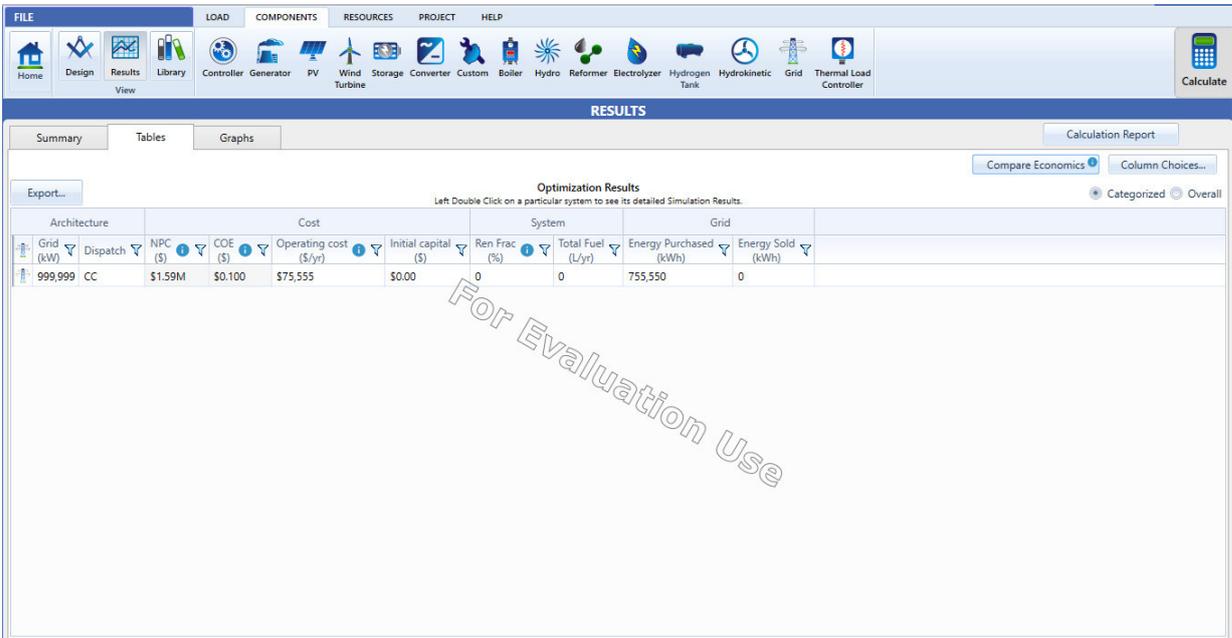
APÊNDICE A – DADOS DA SIMULAÇÃO DO ARRANJO 1 COM O SOFTWARE HOMER©



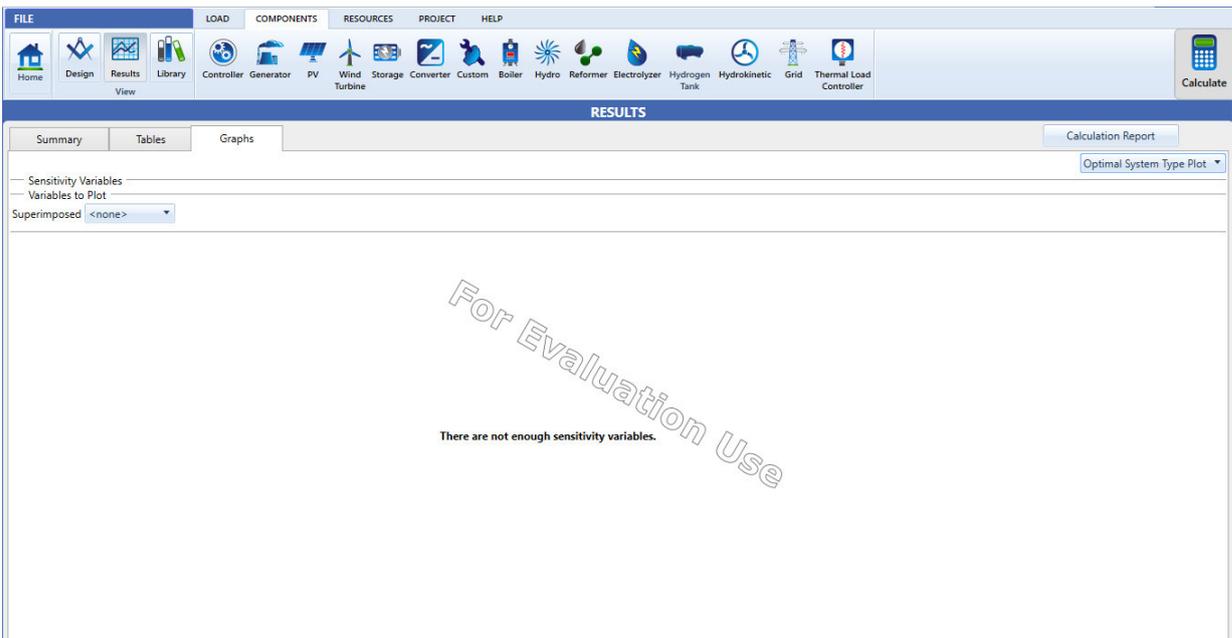
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



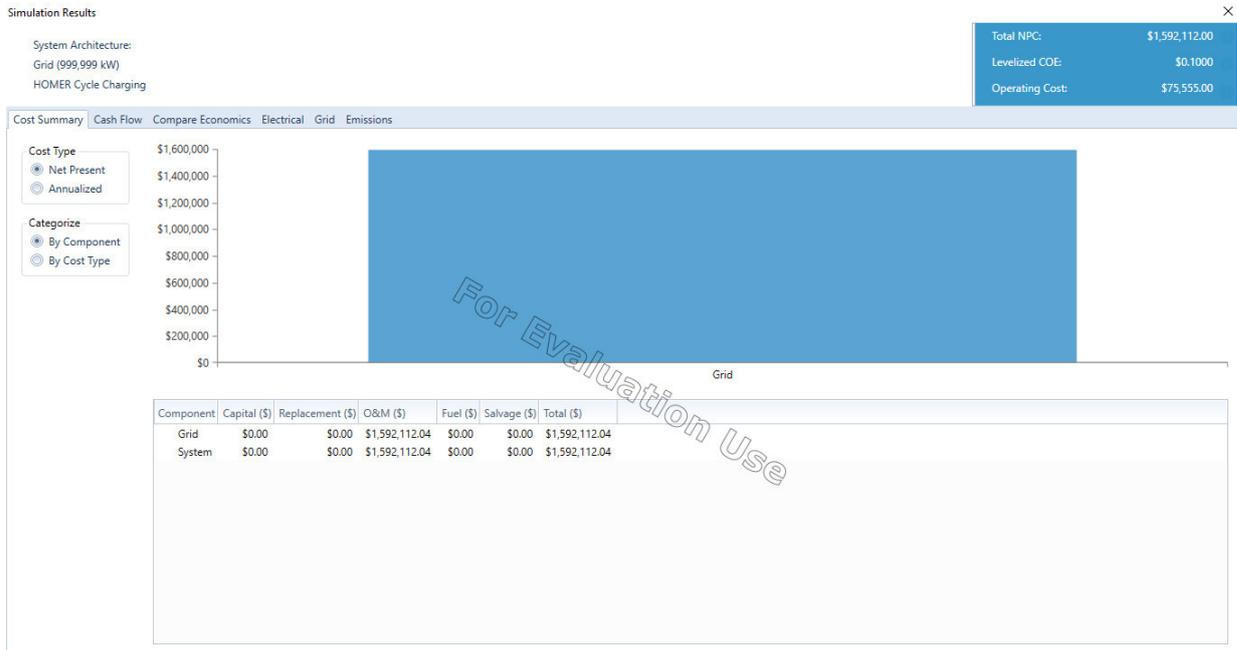
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



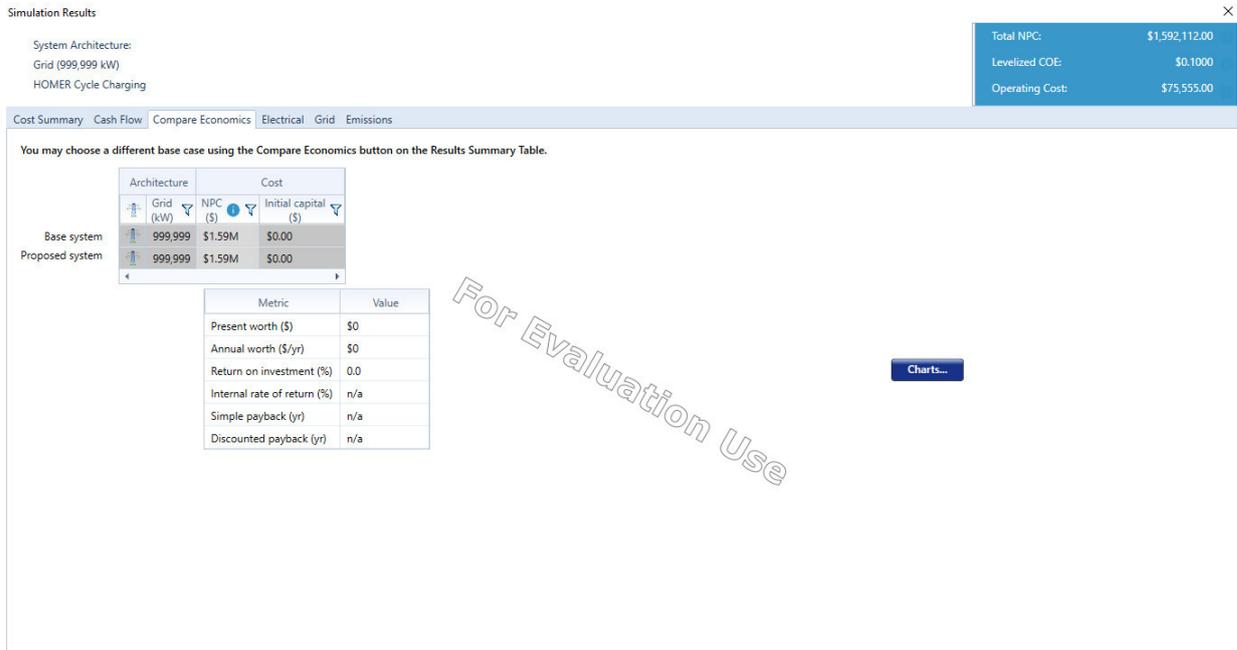
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



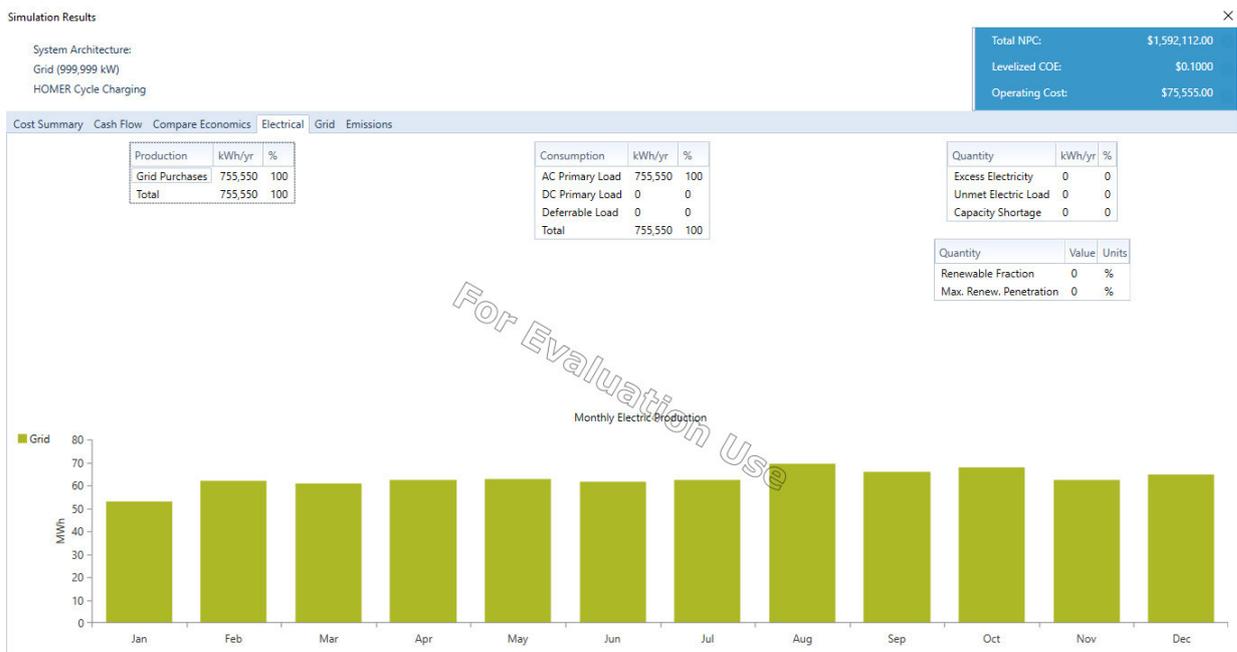
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



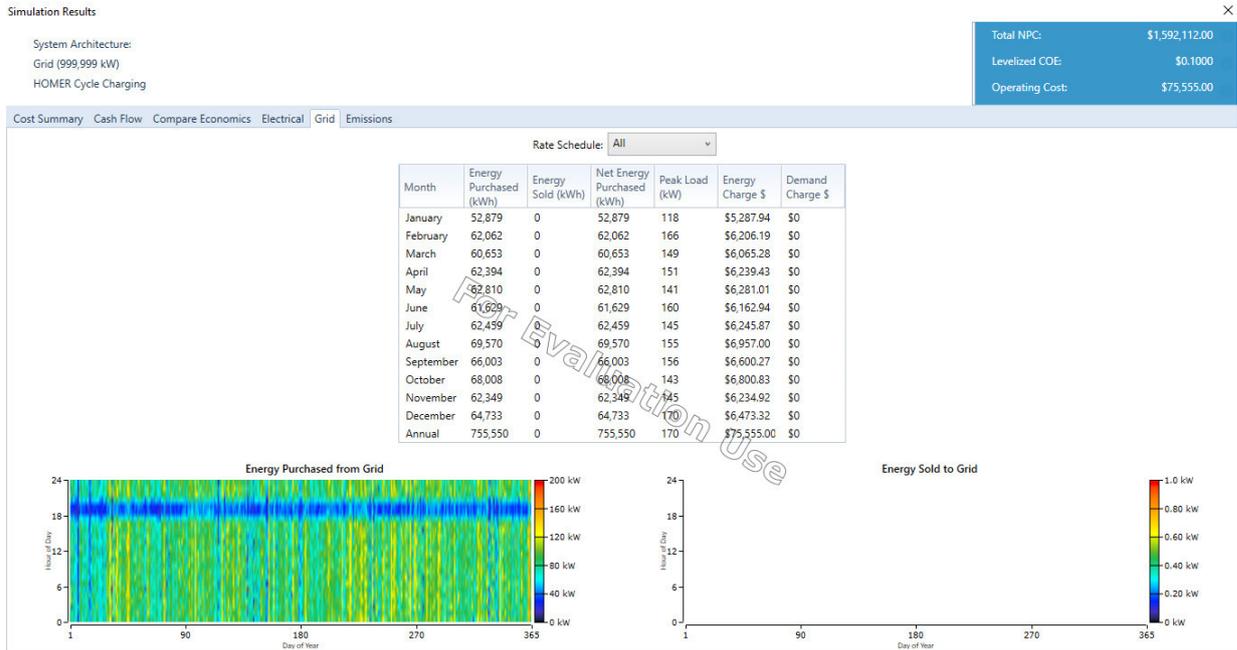
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



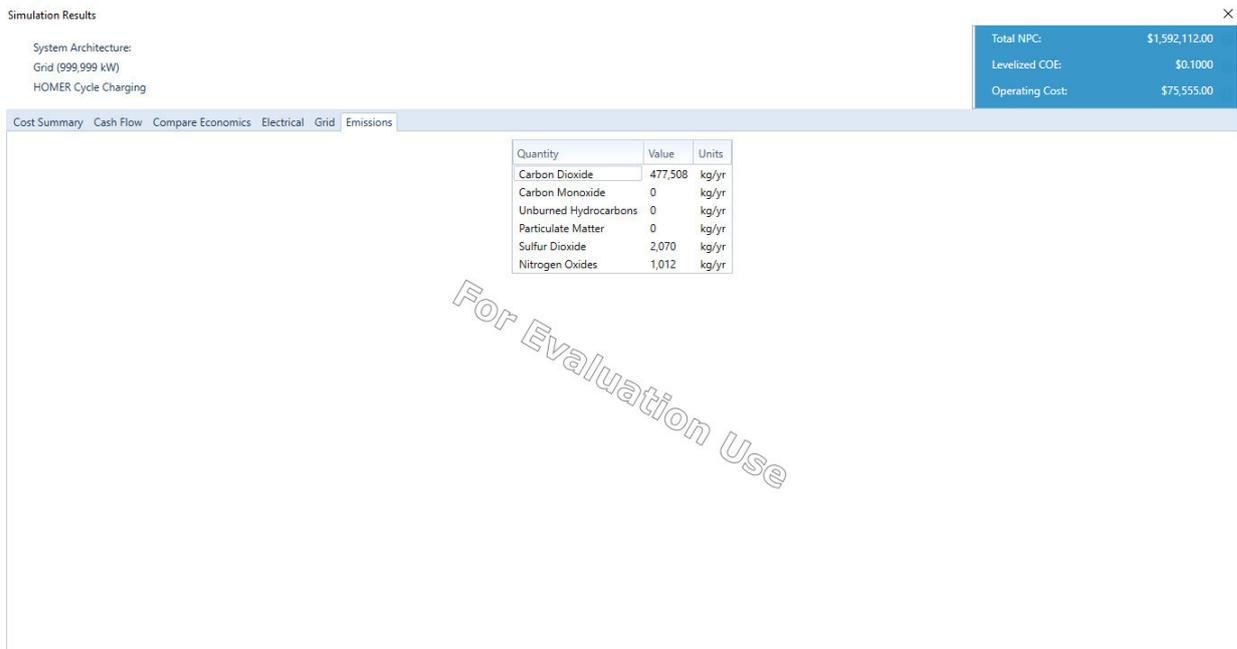
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



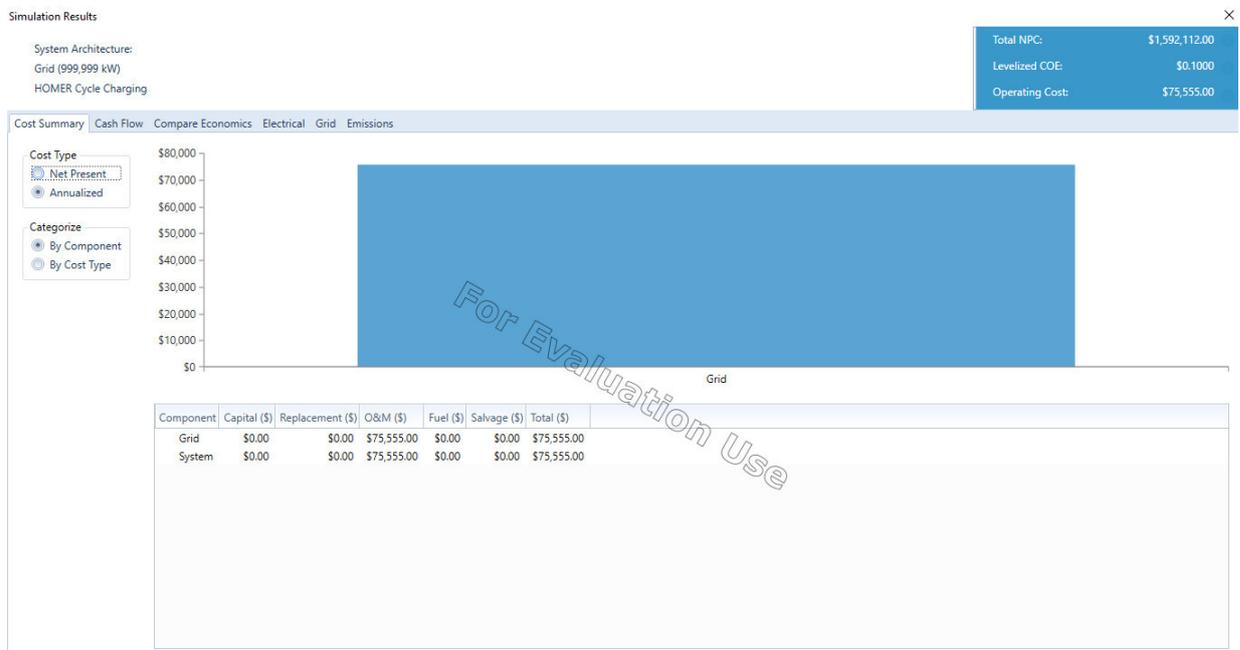
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

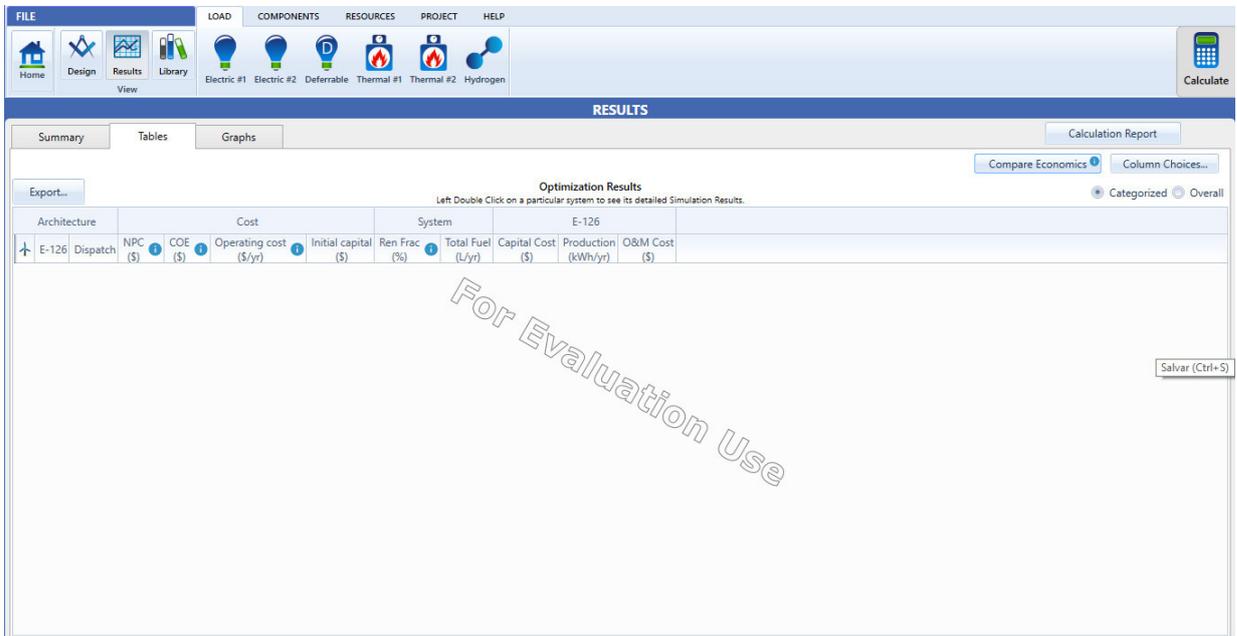
APÊNDICE B – DADOS DA SIMULAÇÃO DO ARRANJO 2 COM O SOFTWARE HOMER©

The screenshot displays the HOMER Pro software interface during the design phase. The main window is titled 'DESIGN' and shows a schematic of a power system. The system includes a wind turbine (E-126) and a load (Consumo PAZPE) with a daily energy demand of 2070.00 kWh/d and a peak power demand of 170.00 kW. The project name is 'Arranjo2_TCC' and the location is set to 'Caiena, Fortaleza' (UTC-03:00). The interface also shows a map of South America with a red pin indicating the location. The 'SUGGESTIONS' panel on the left indicates that no feasible solutions were found due to capacity shortages. The 'Parameters' section at the bottom right lists the following values: Discount rate (%): 13.25, Inflation rate (%): 11.73, Annual capacity shortage (%): 0.00, and Project lifetime (years): 25.00. A 'Microgrid News' banner is visible at the bottom right of the interface.

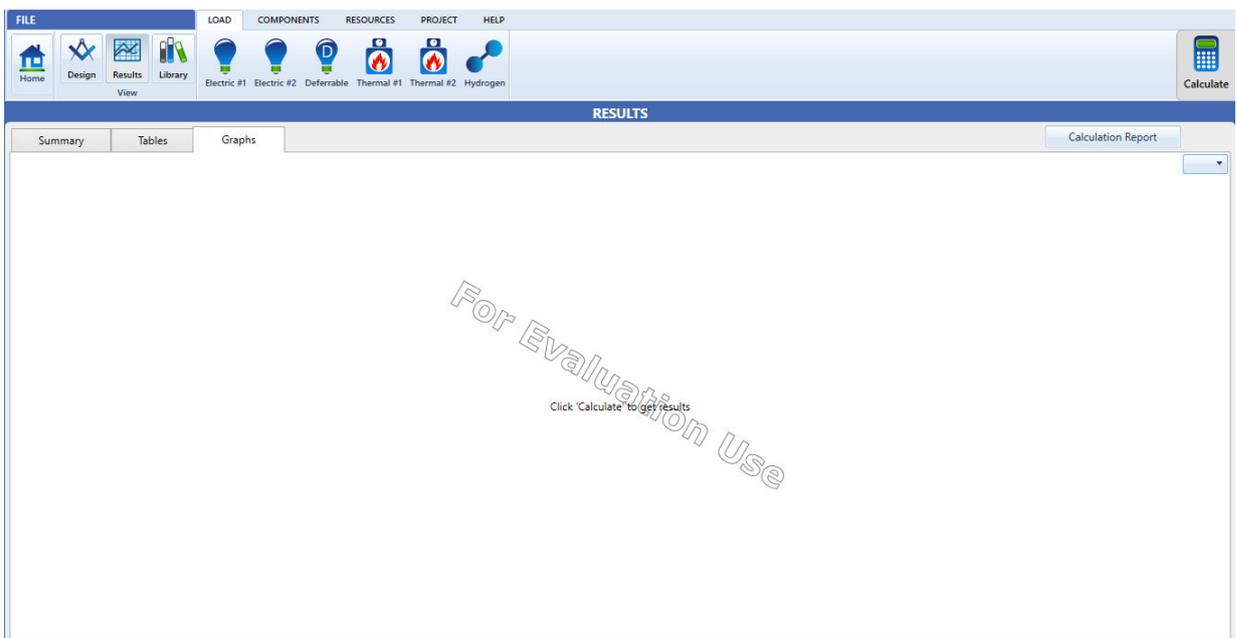
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

The screenshot displays the HOMER Pro software interface during the results phase. The main window is titled 'RESULTS' and shows a message stating 'HOMER was unable to find a system which meets the demand. No feasible solutions.' Below this message, a list of reasons is provided: 'Not enough generation capacity', 'Not enough annual capacity shortage allowed', 'Emissions limitations', and 'Minimum renewable fraction'. A 'Calculation Report' button is visible in the top right corner. The 'SUGGESTIONS' panel on the left indicates that no feasible solutions were found due to capacity shortages. A large watermark 'Evaluation Use' is visible across the center of the interface.

Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

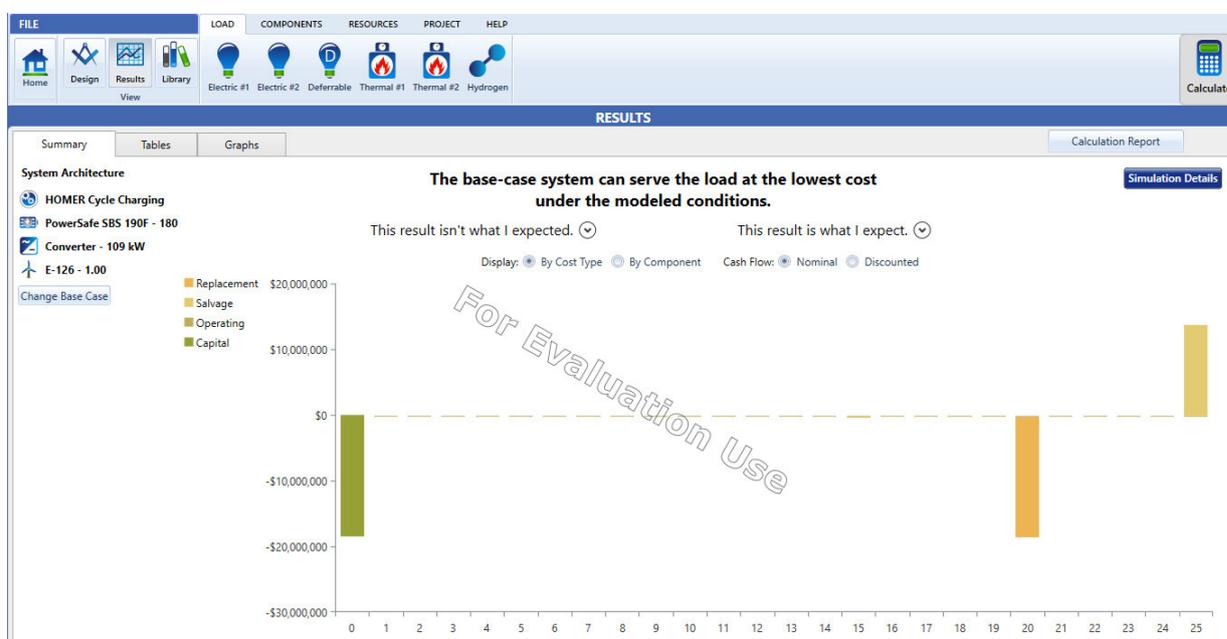
APÊNDICE C – DADOS DA SIMULAÇÃO DO ARRANJO 3 COM O SOFTWARE HOMER©

The screenshot displays the HOMER Pro software interface during the DESIGN phase. The top menu includes FILE, LOAD, COMPONENTS, RESOURCES, PROJECT, and HELP. The main workspace is divided into three sections: SCHEMATIC, DESIGN, and SUGGESTIONS. The SCHEMATIC section shows a power flow diagram with components like E-126, AC, Consumo PAZPE, DC, and PowerSat. The DESIGN section contains a form for project details, including Name (Arranjo3_TCC), Author, and Description. A world map is shown with a location pin over South America, specifically near Caiena, Fortaleza. Below the map, a table lists financial parameters:

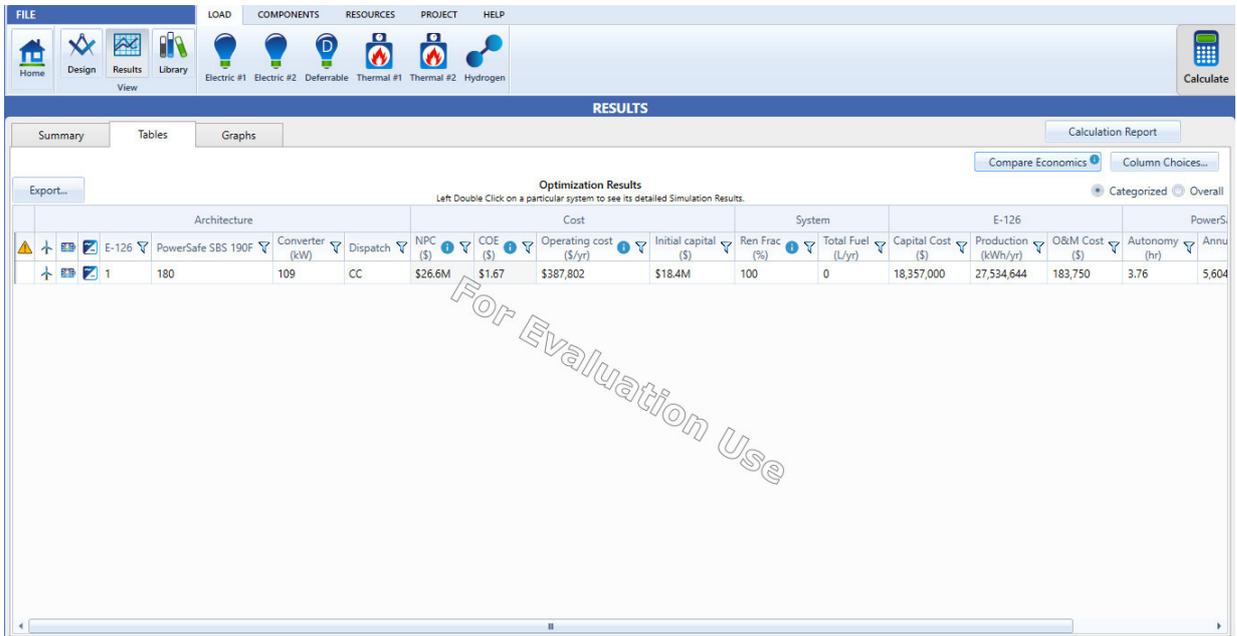
Discount rate (%):	13.25
Inflation rate (%):	11.73
Annual capacity shortage (%):	0.00
Project lifetime (years):	25.00

A 'Microgrid News' banner is also present, promoting new technologies and market trends.

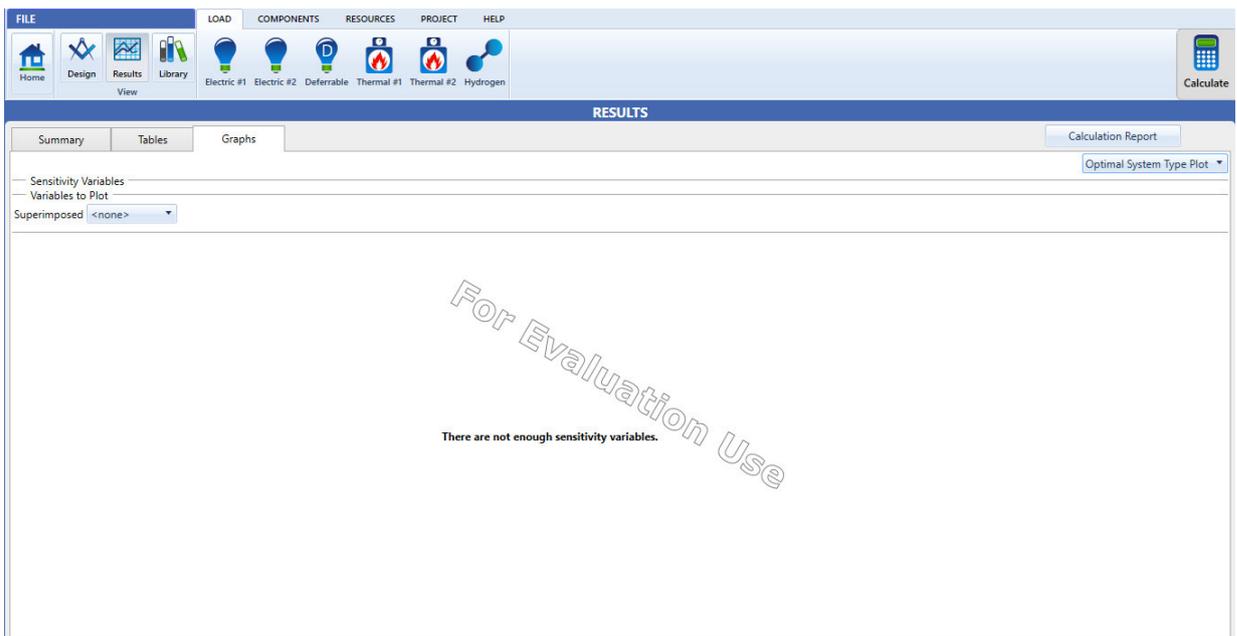
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



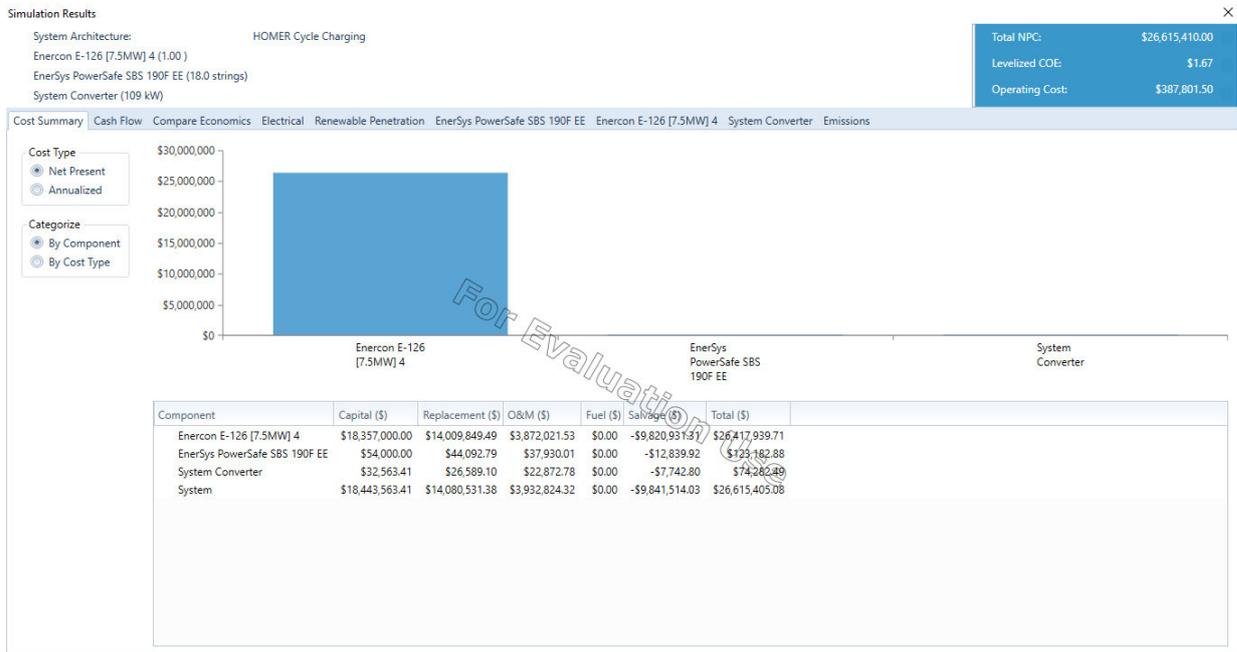
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



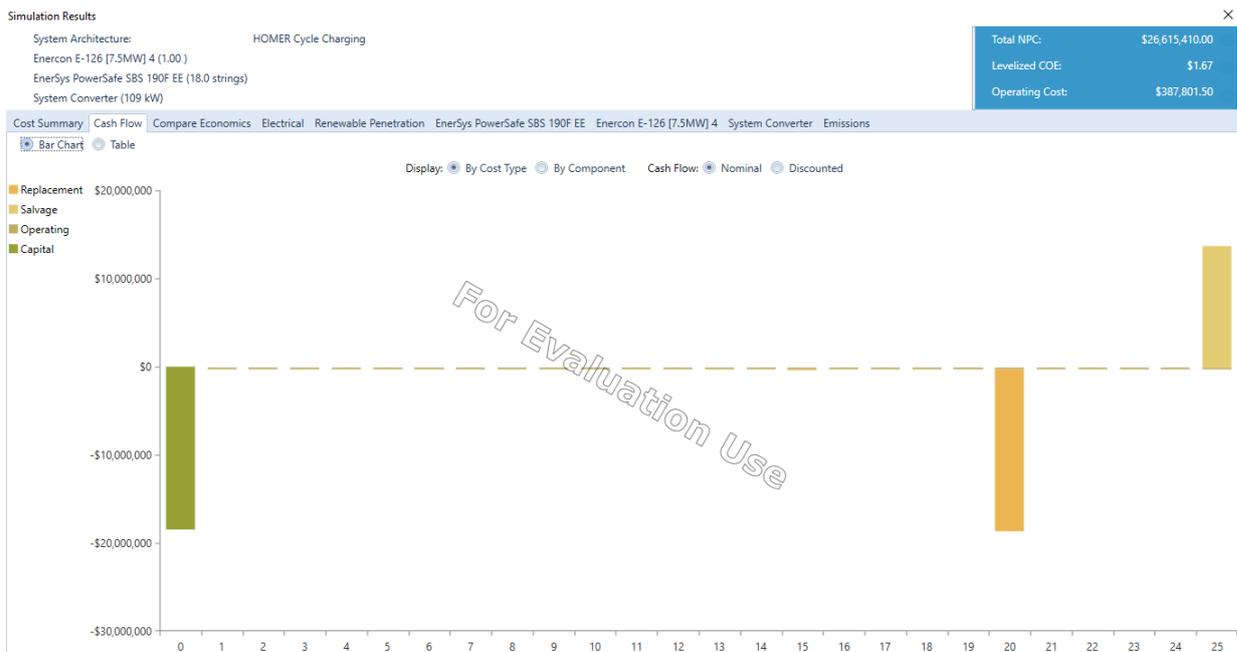
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



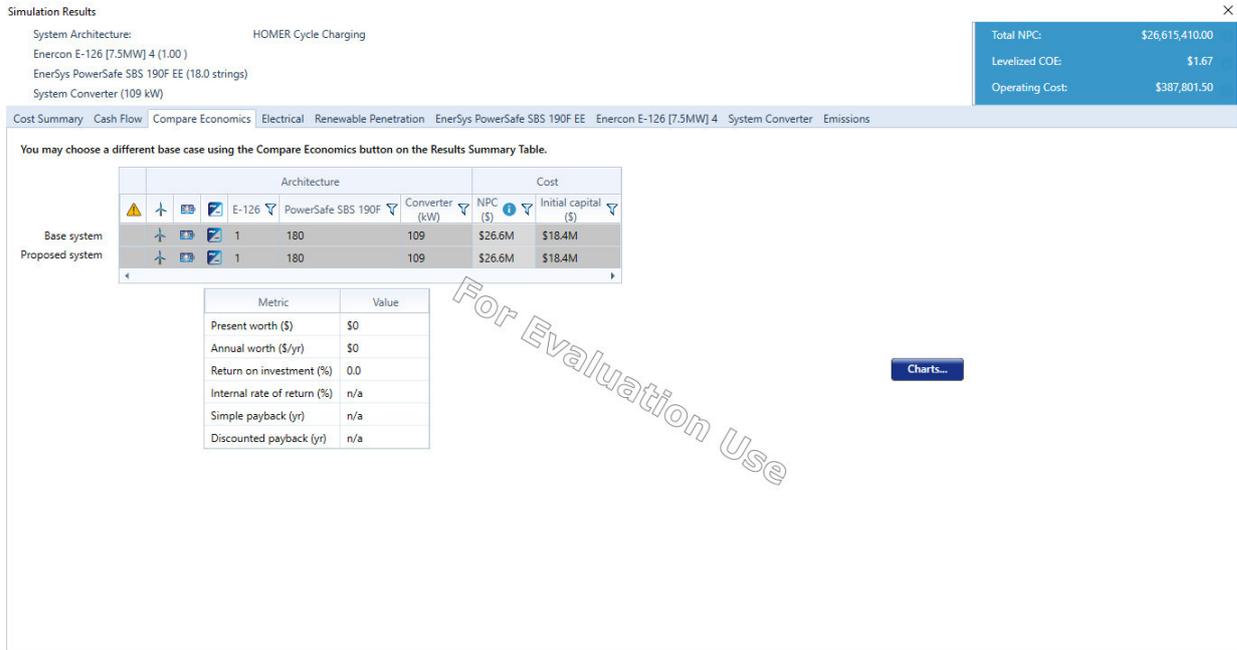
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



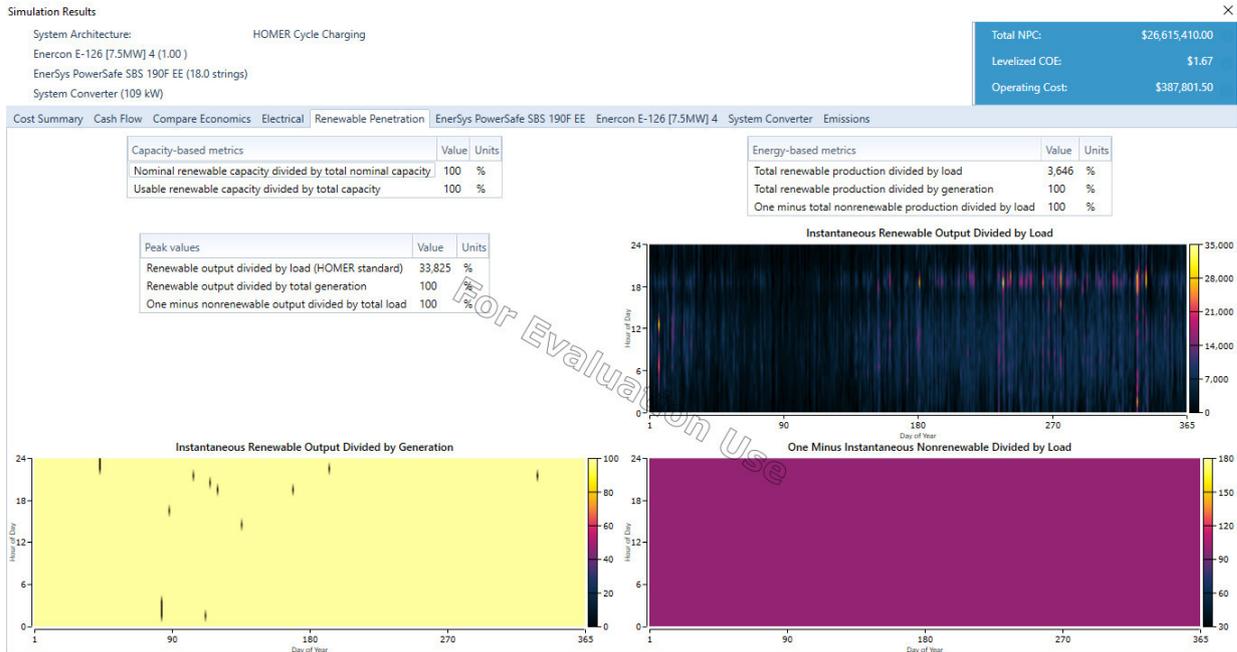
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



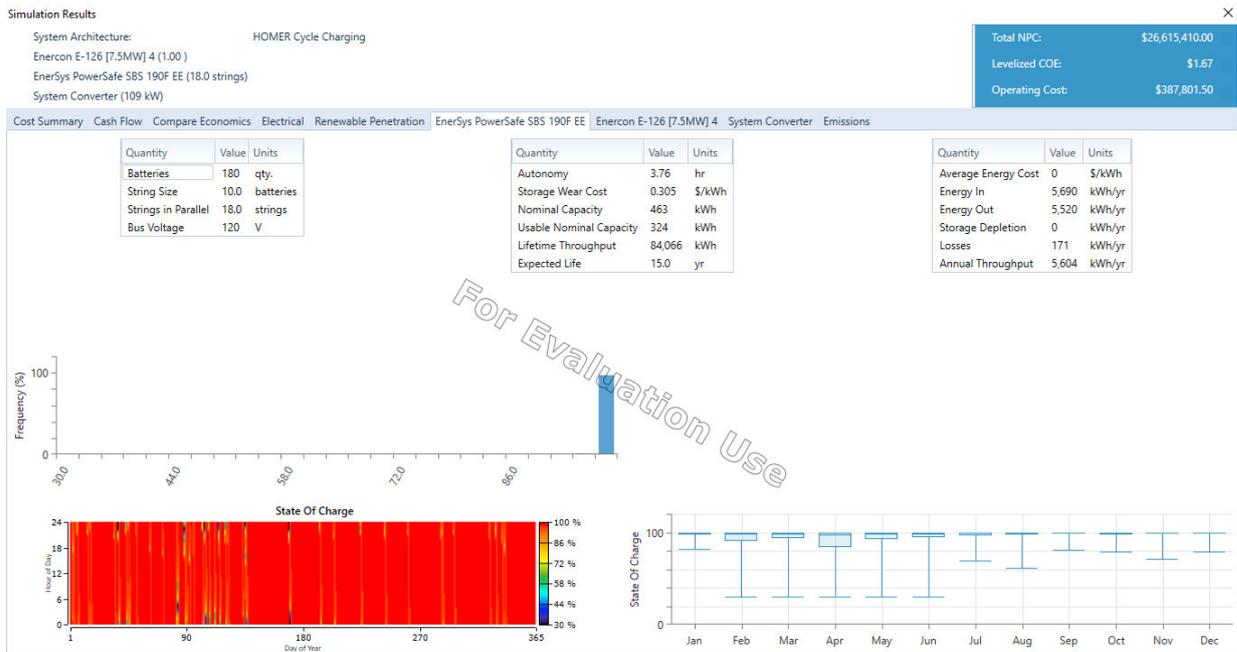
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



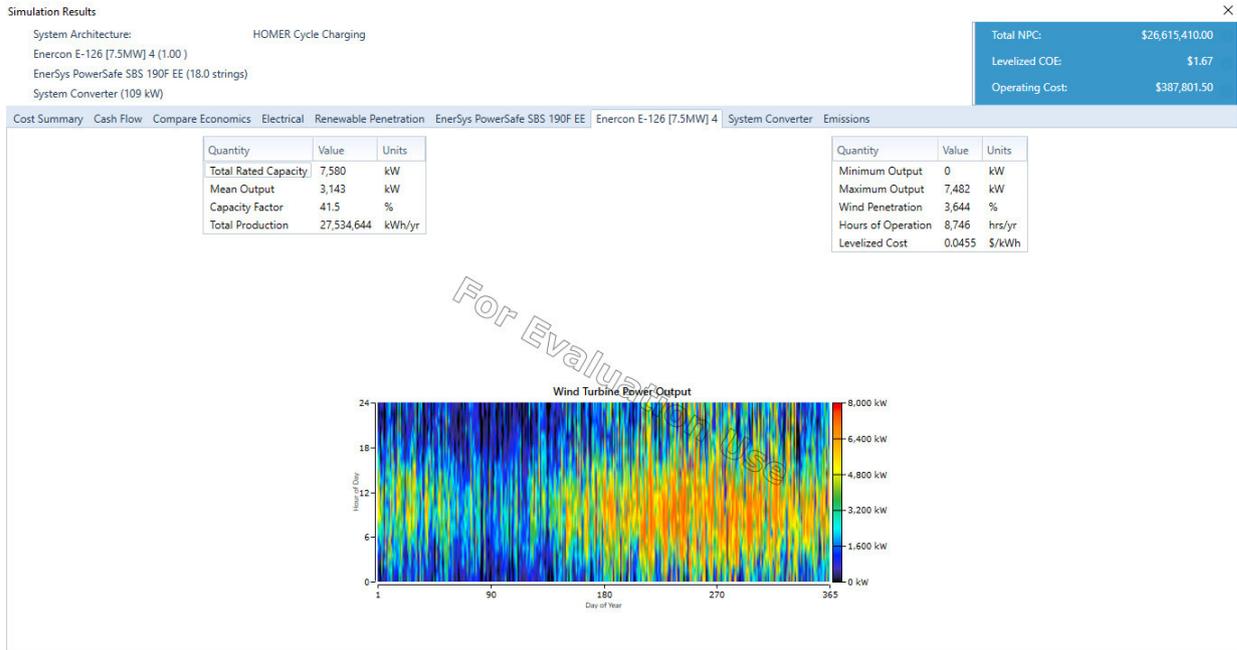
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



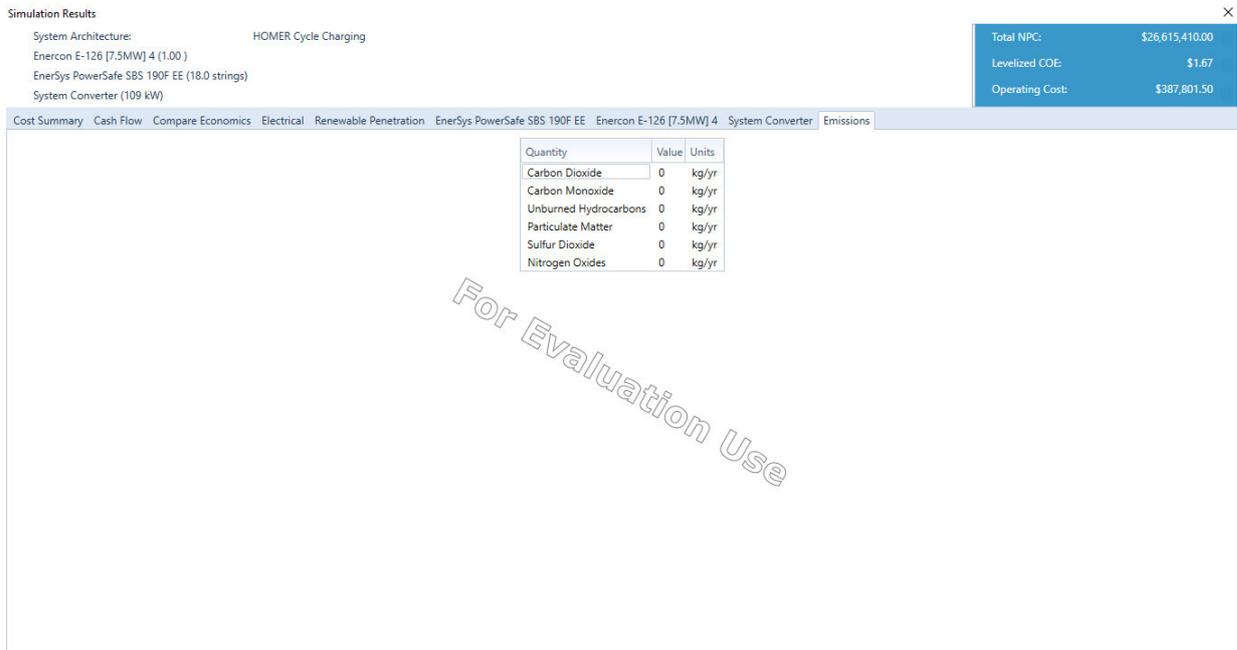
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



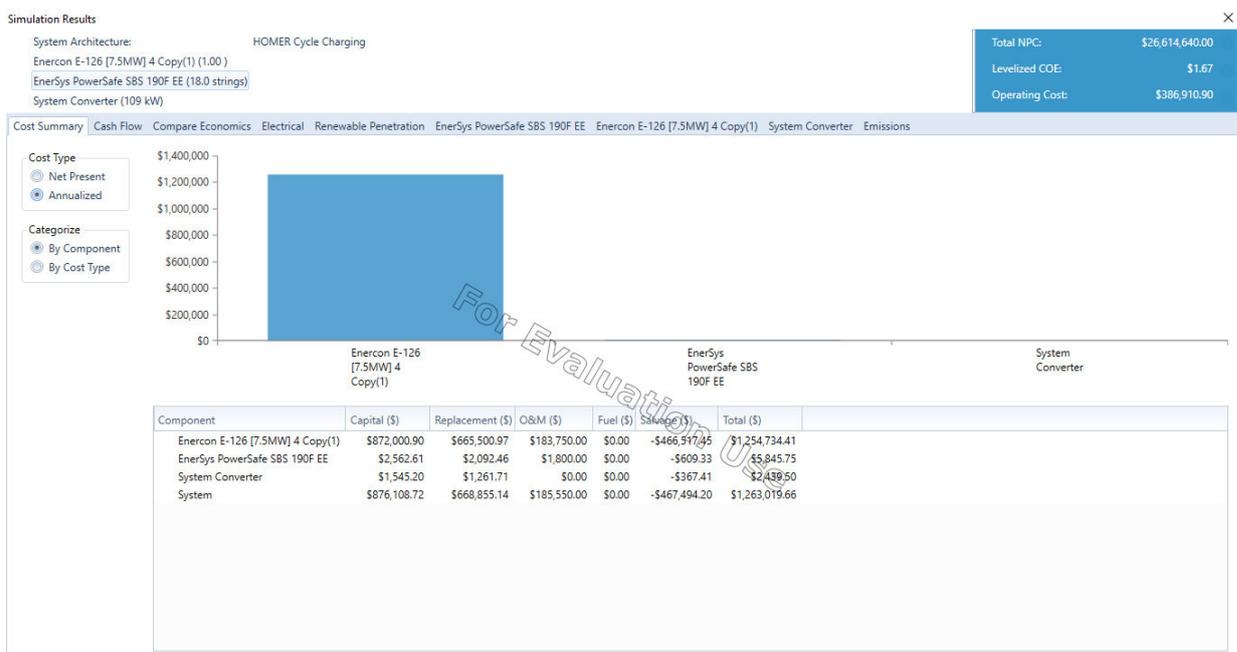
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

APÊNDICE D – DADOS DA SIMULAÇÃO DO ARRANJO 4 COM O SOFTWARE HOMER©

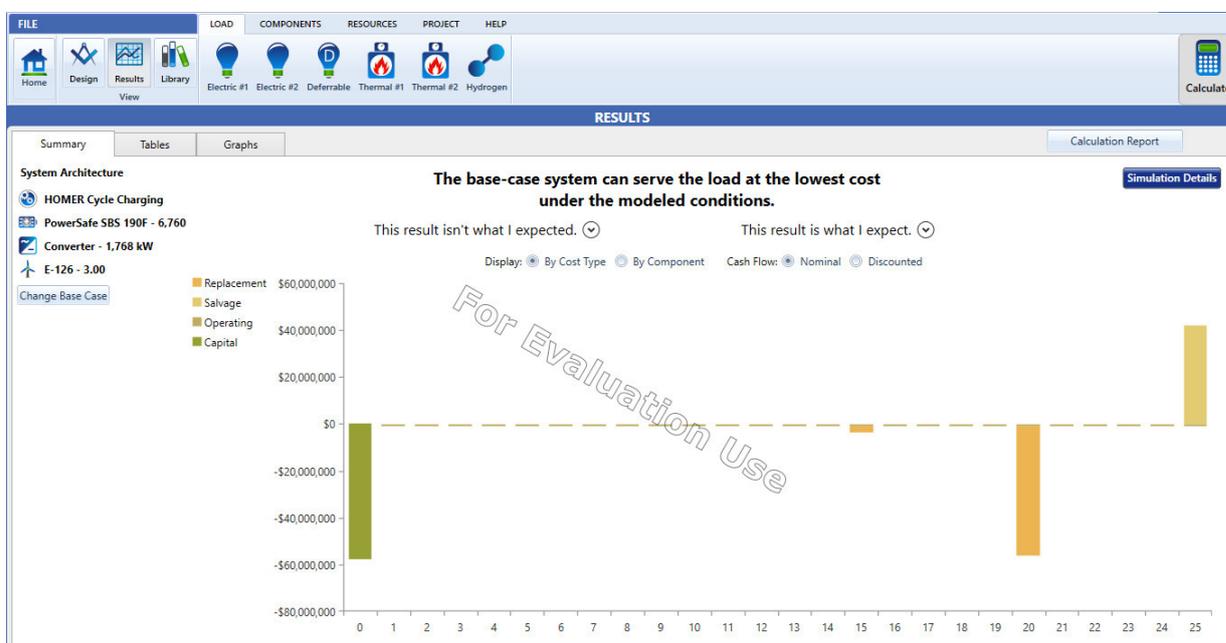
DESIGN

Name: Arranjo4_TCC
 Author:
 Description:

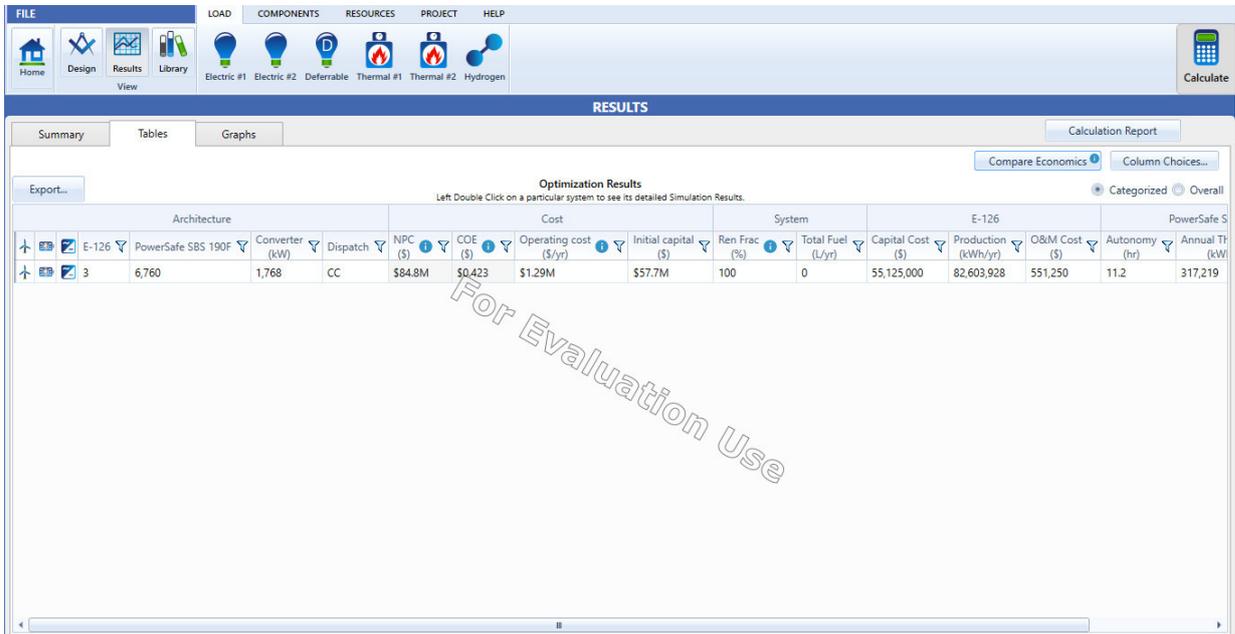
Discount rate (%): 13.25
 Inflation rate (%): 11.73
 Annual capacity shortage (%): 0.00
 Project lifetime (years): 25.00

Microgrid News
 Learn about new technologies, innovative projects, and market trends.

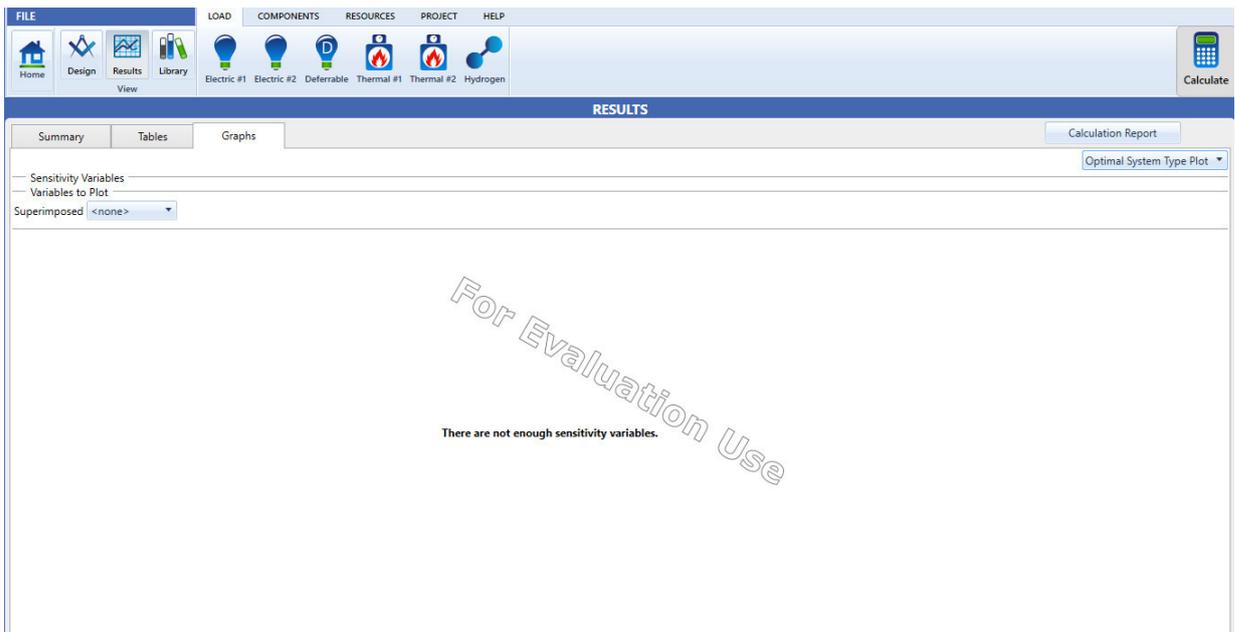
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



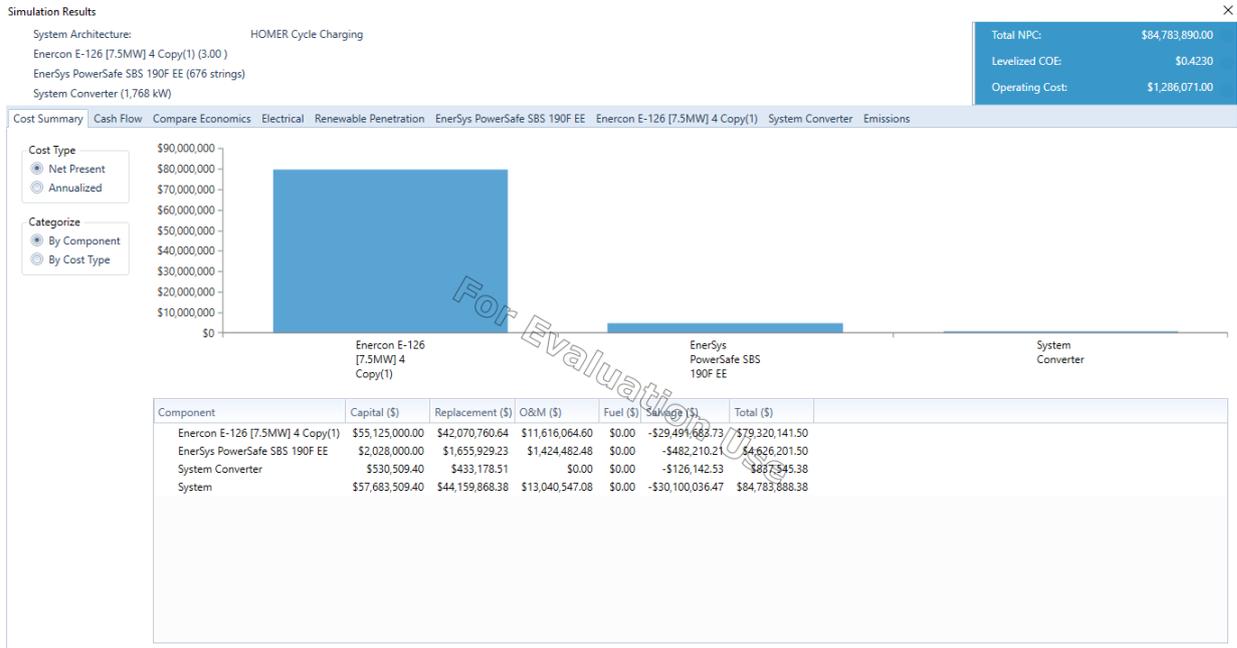
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



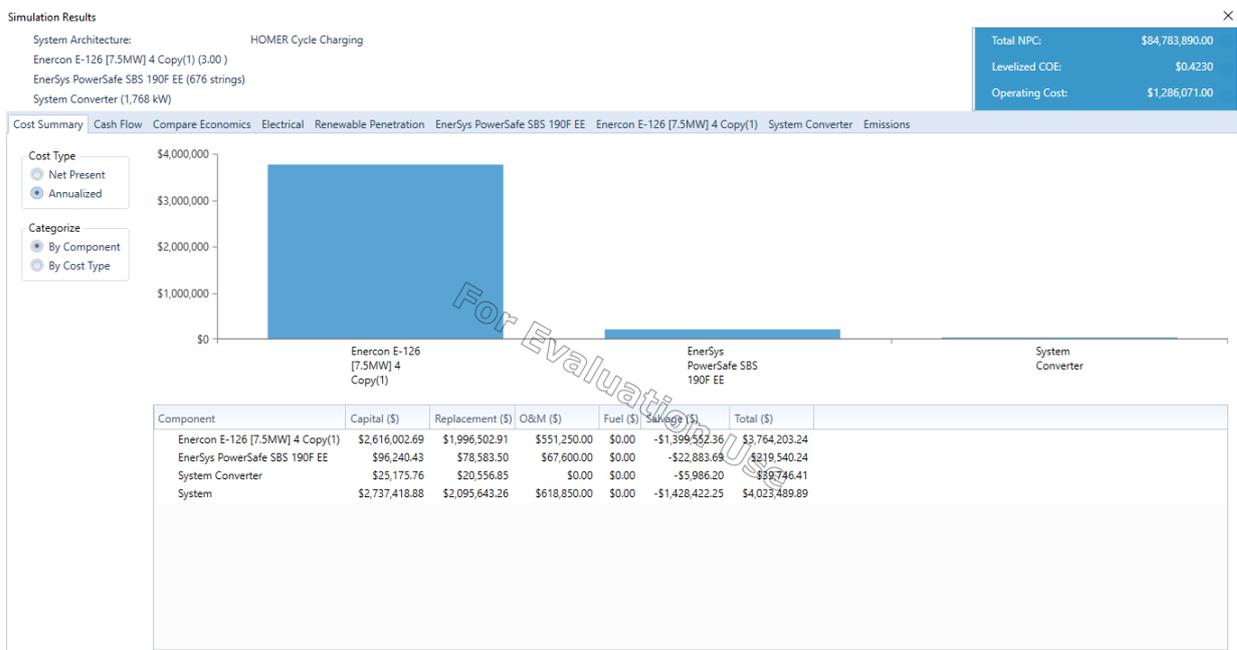
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



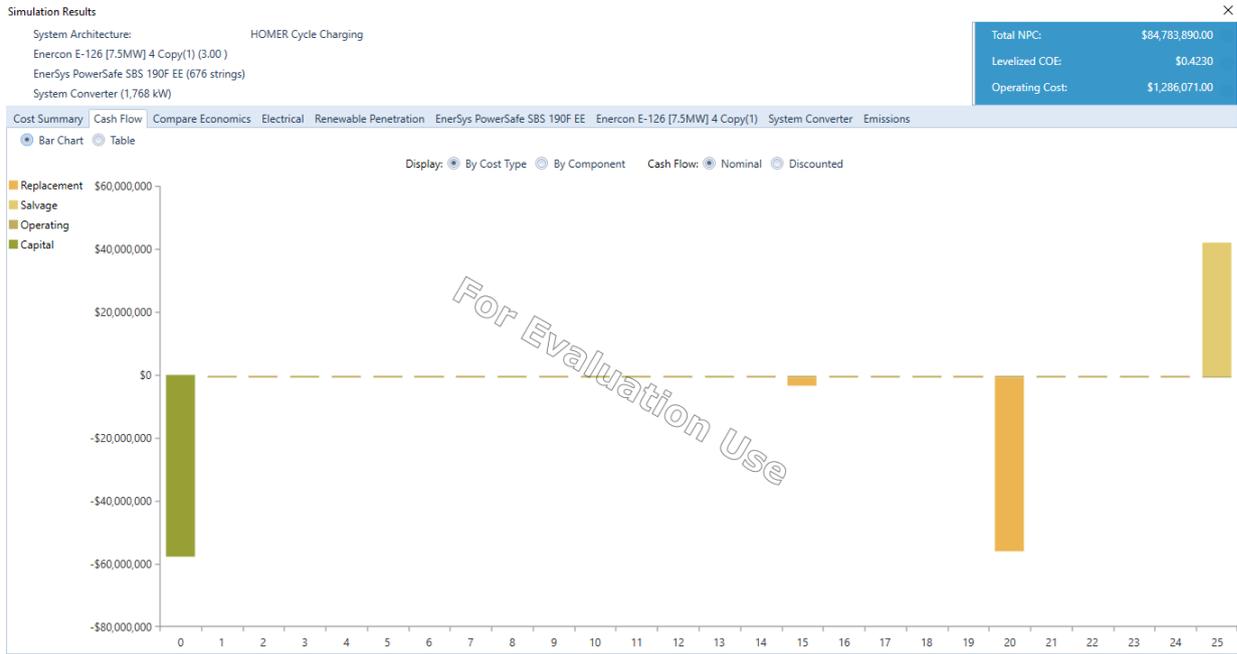
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



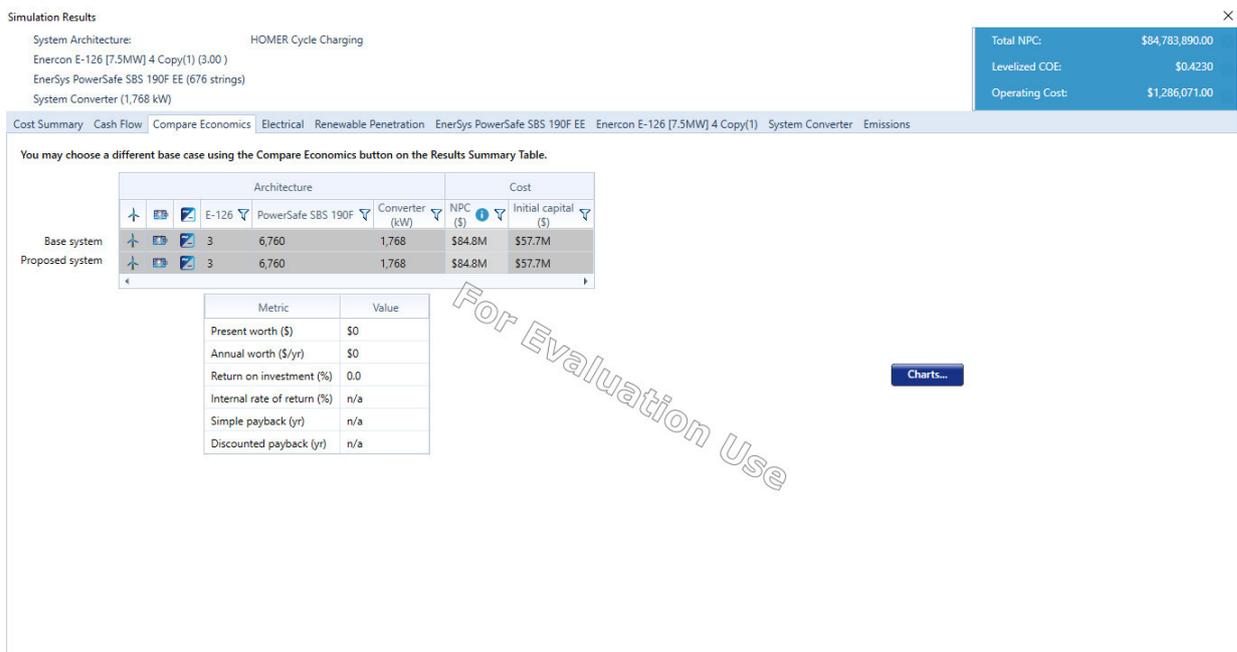
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



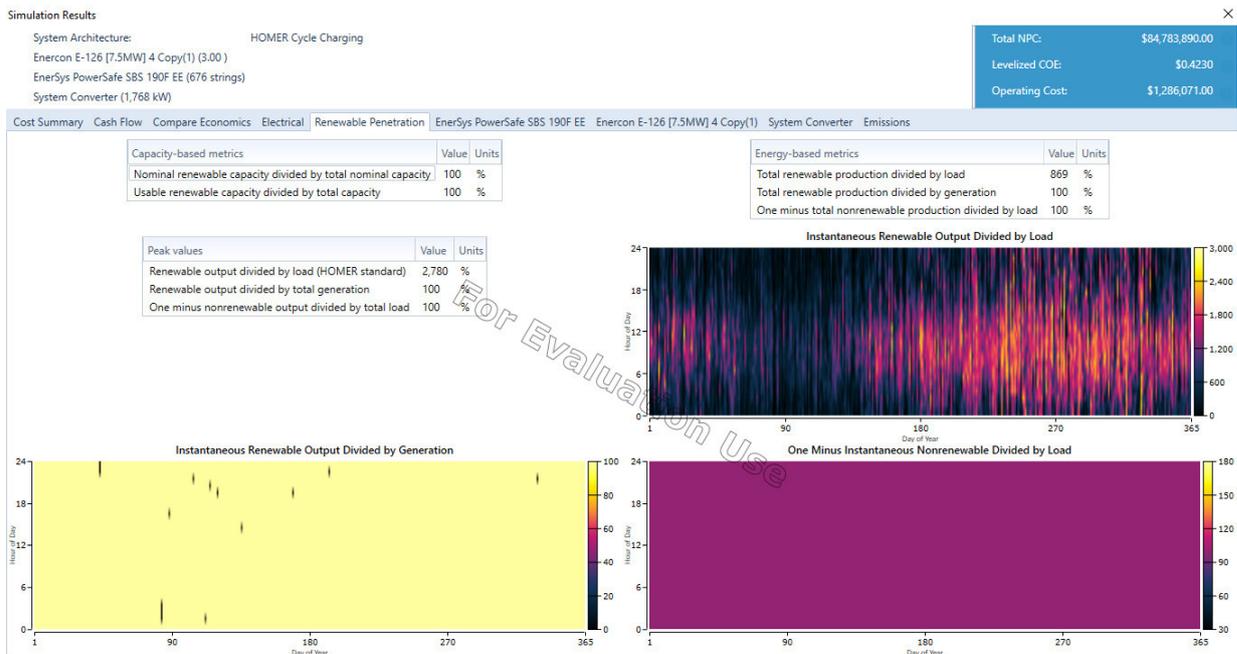
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



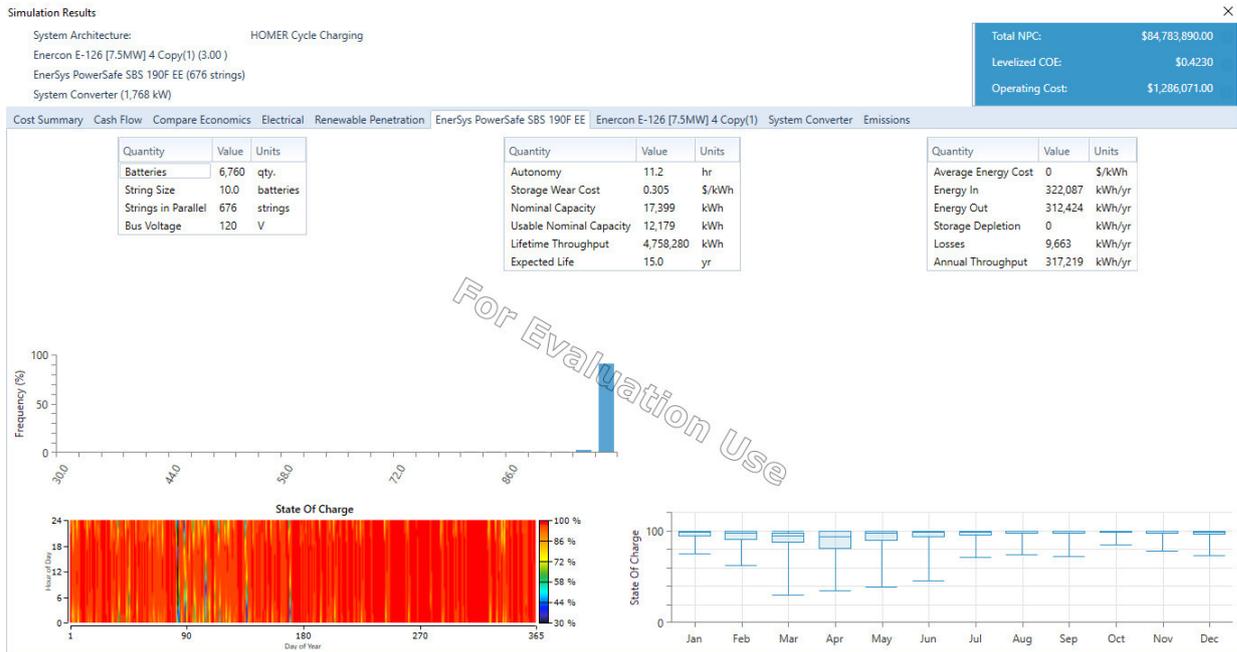
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



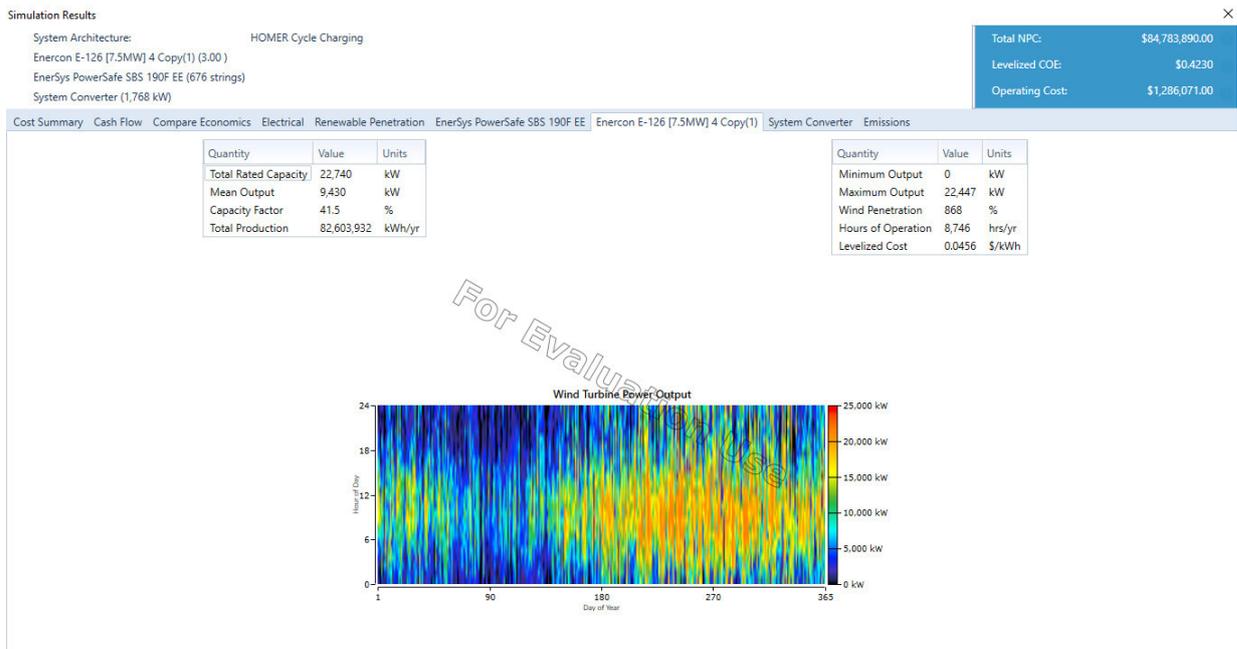
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



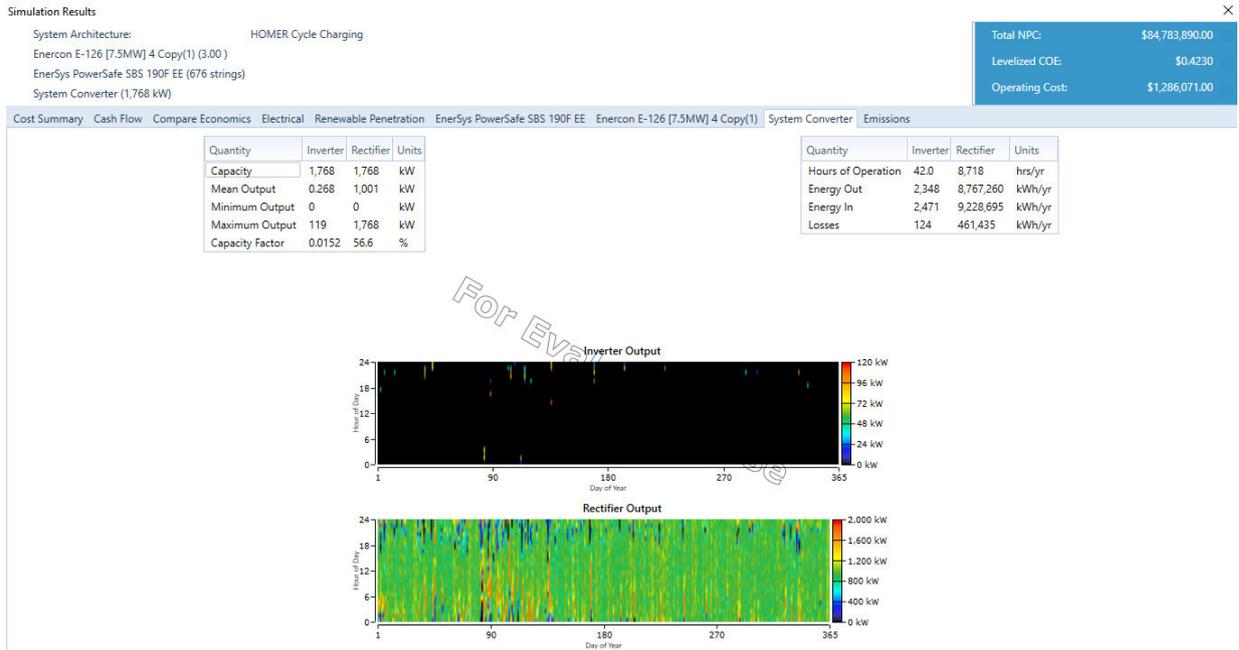
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



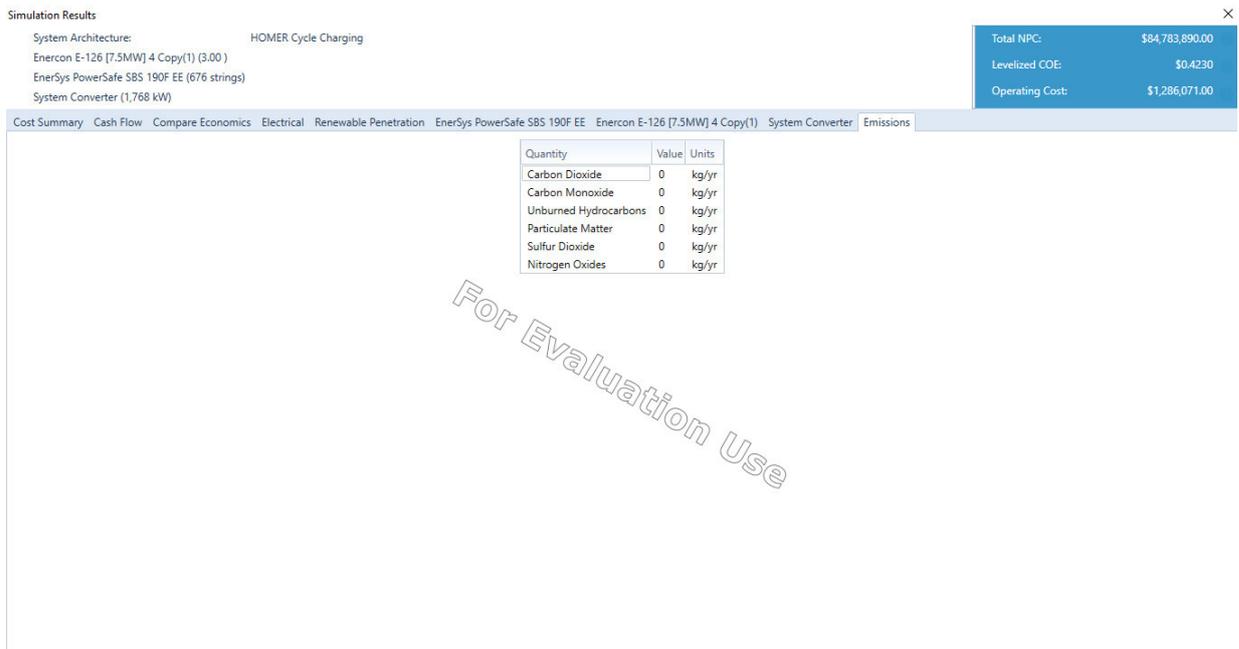
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

APÊNDICE E – DADOS DA SIMULAÇÃO DO ARRANJO 5 COM O SOFTWARE HOMER©

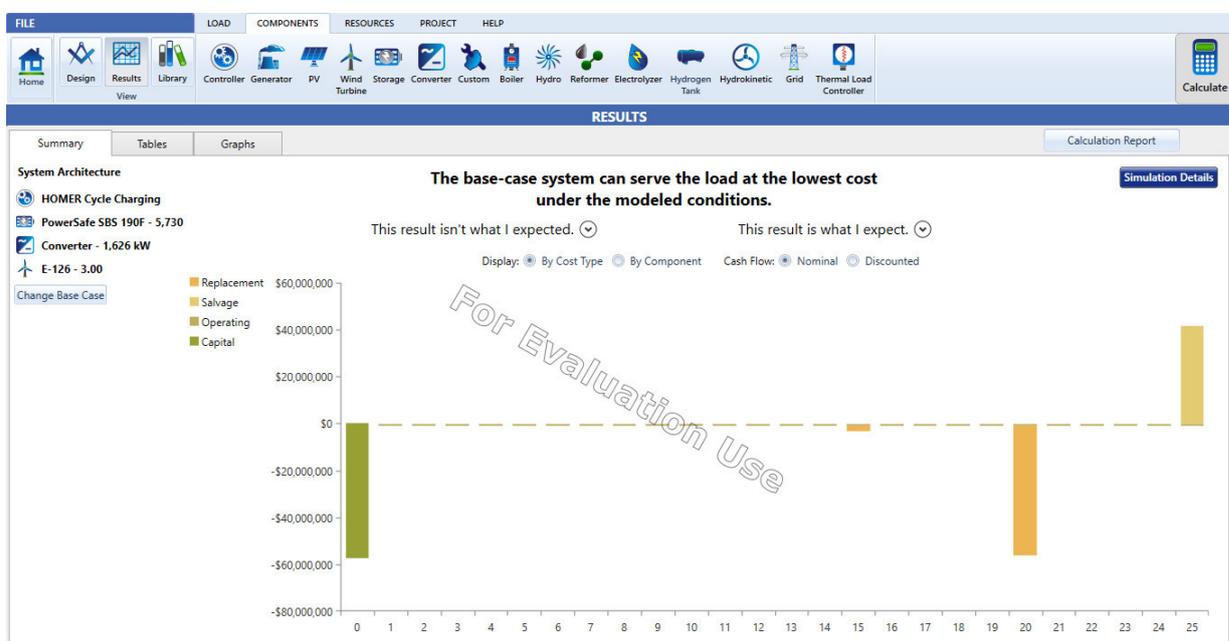
DESIGN

Name: Arranjo5_TCC
 Author:
 Description:

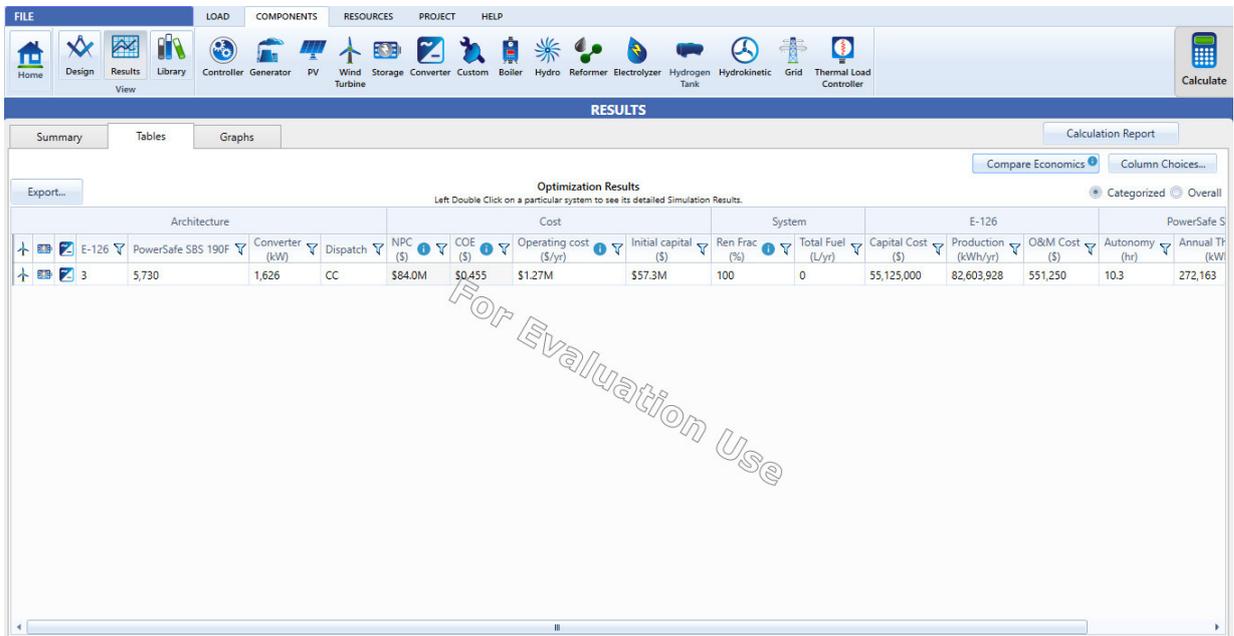
Discount rate (%): 13.25
 Inflation rate (%): 11.73
 Annual capacity shortage (%): 0.00
 Project lifetime (years): 25.00

Got questions?
 Check out the HOMER KnowledgeBase

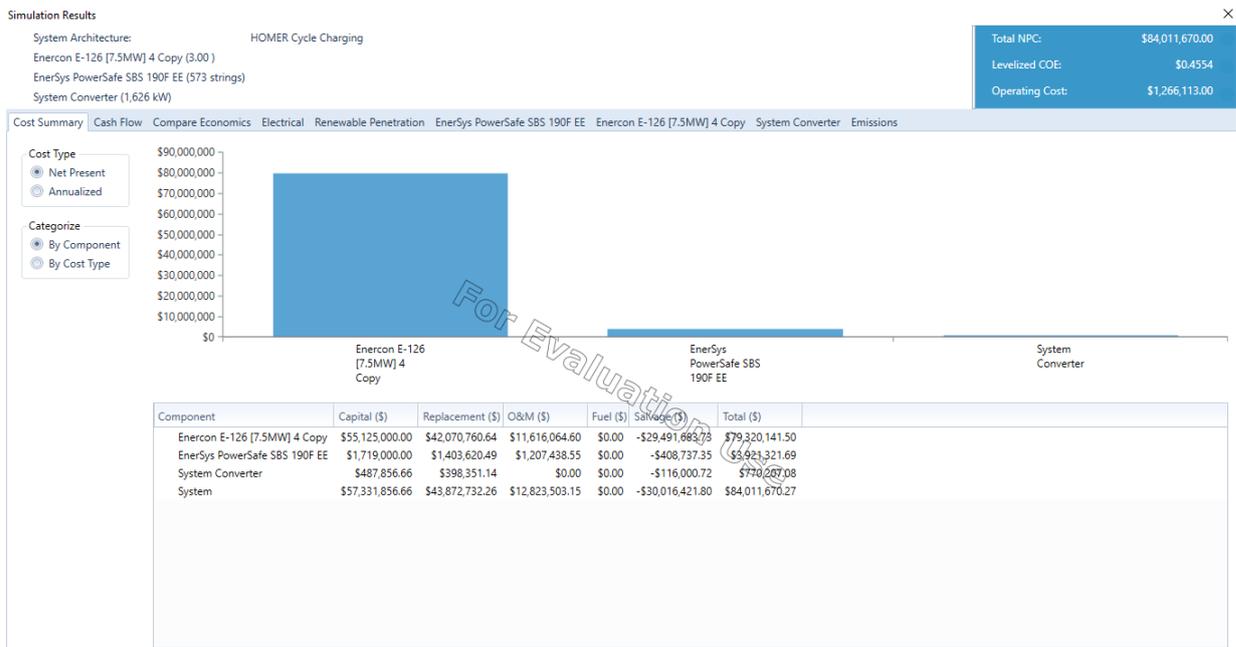
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

Simulation Results

System Architecture: HOMER Cycle Charging
 Enercon E-126 [7.5MW] 4 Copy (3.00)
 EnerSys PowerSafe SBS 190F EE (573 strings)
 System Converter (1,626 kW)

Total NPC:	\$84,011,670.00
Levelized COE:	\$0.4554
Operating Cost:	\$1,266,113.00

Cost Summary | Cash Flow | Compare Economics | Electrical | Renewable Penetration | EnerSys PowerSafe SBS 190F EE | Enercon E-126 [7.5MW] 4 Copy | System Converter | Emissions

You may choose a different base case using the Compare Economics button on the Results Summary Table.

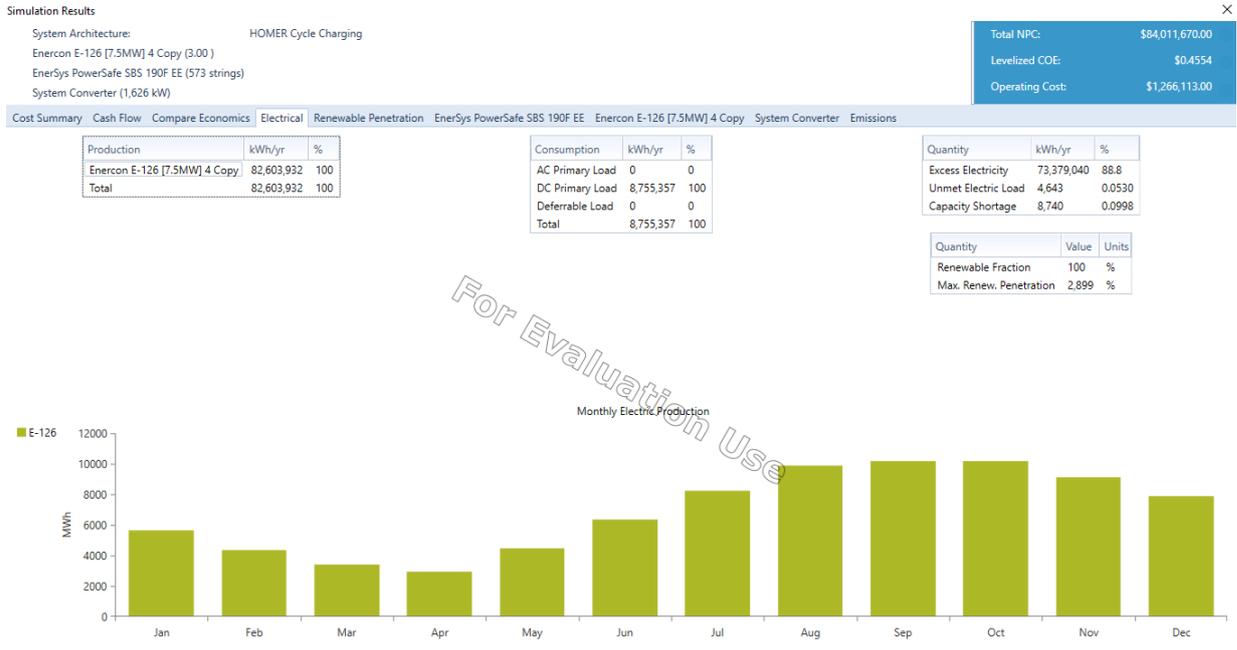
	Architecture			Cost	
	E-126	PowerSafe SBS 190F	Converter (kW)	NPC (\$)	Initial capital (\$)
Base system	3	5,730	1,626	\$84.0M	\$57.3M
Proposed system	3	5,730	1,626	\$84.0M	\$57.3M

Metric	Value
Present worth (\$)	\$0
Annual worth (\$/yr)	\$0
Return on investment (%)	0.0
Internal rate of return (%)	n/a
Simple payback (yr)	n/a
Discounted payback (yr)	n/a

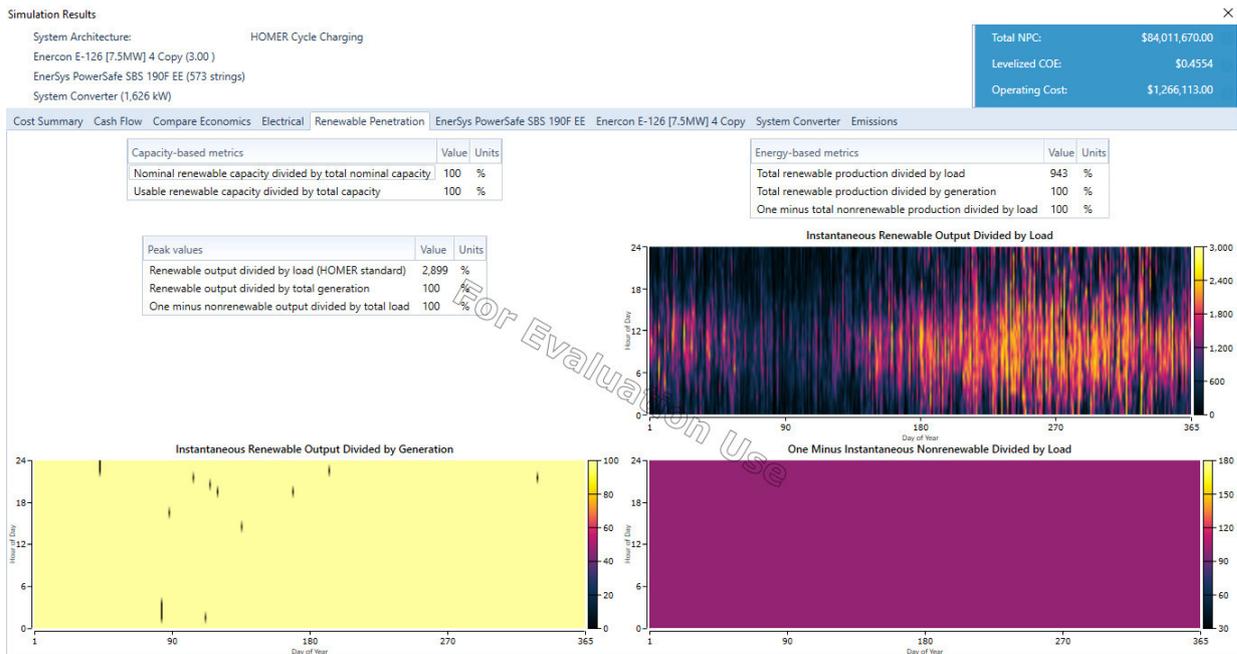
Charts...

For Evaluation Use

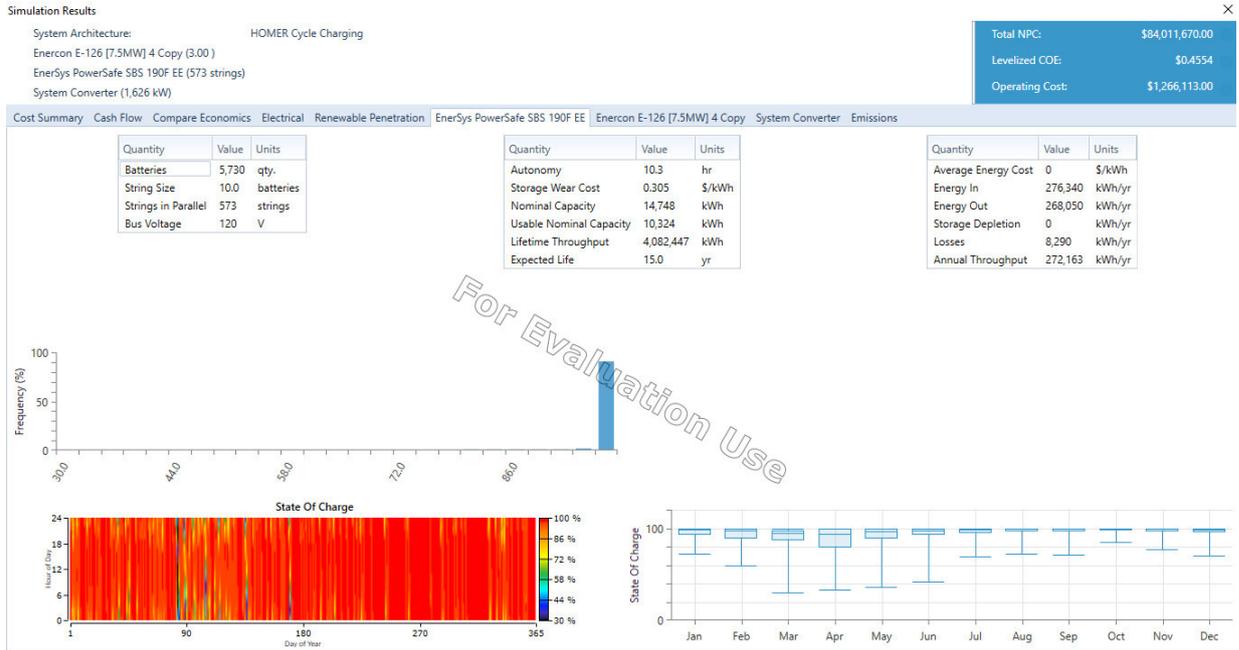
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



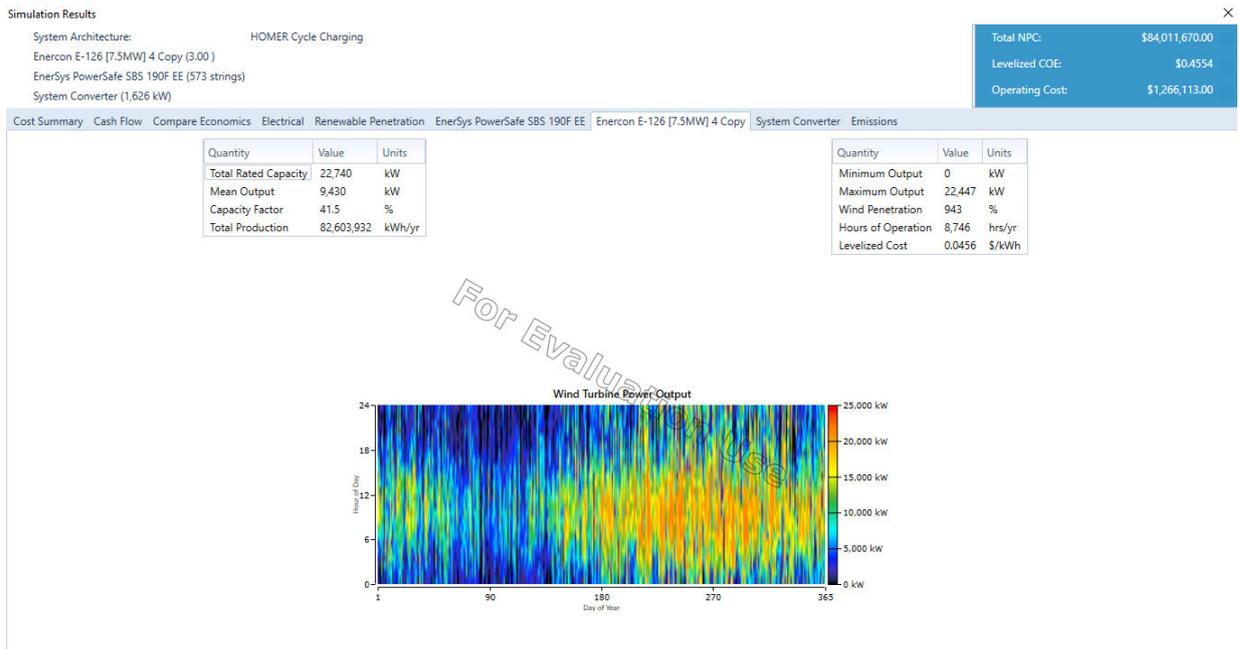
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



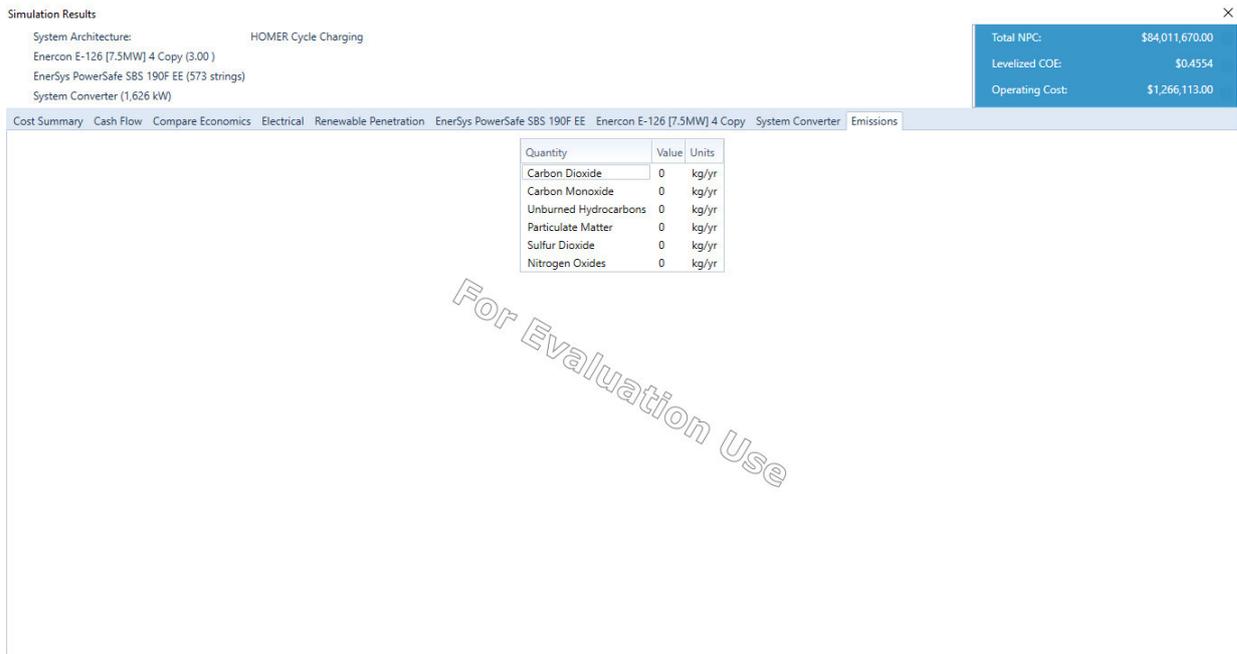
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



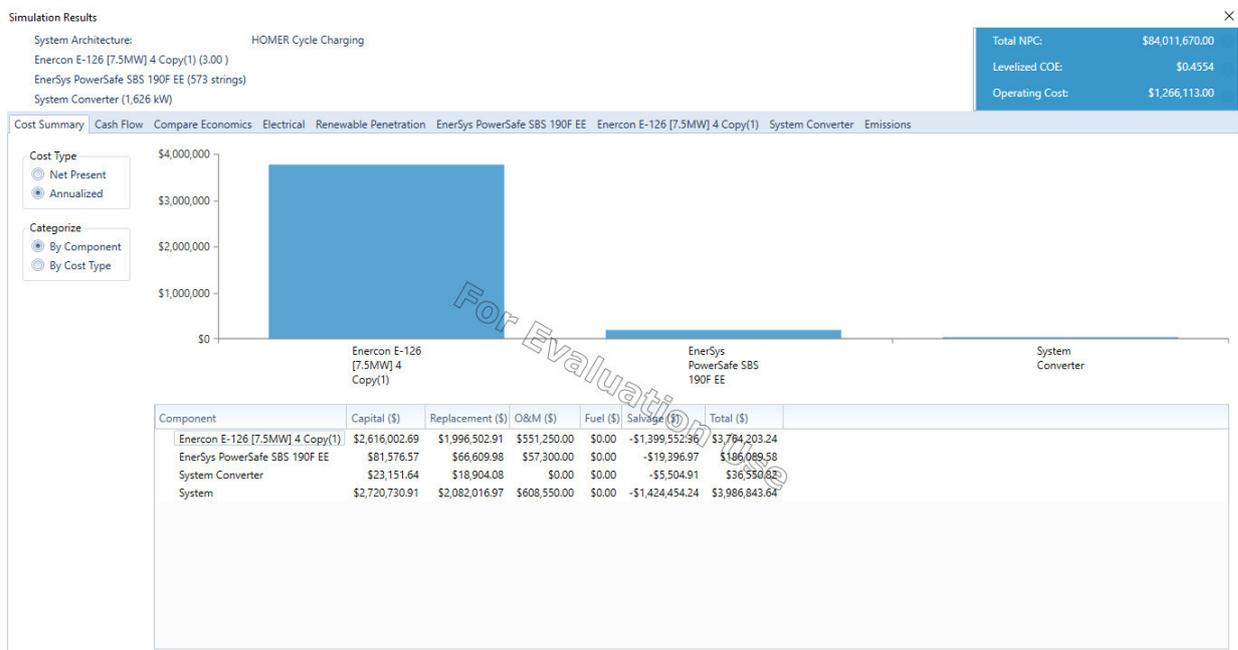
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

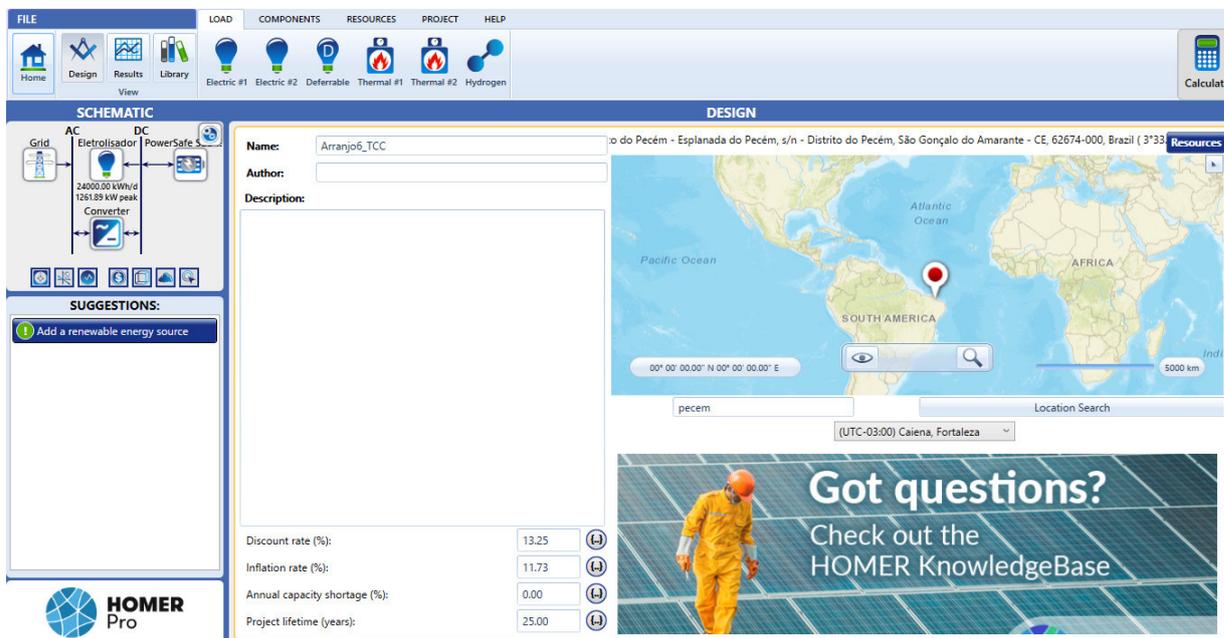


Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

APÊNDICE F – DADOS DA SIMULAÇÃO DO ARRANJO 6 COM O SOFTWARE HOMER©

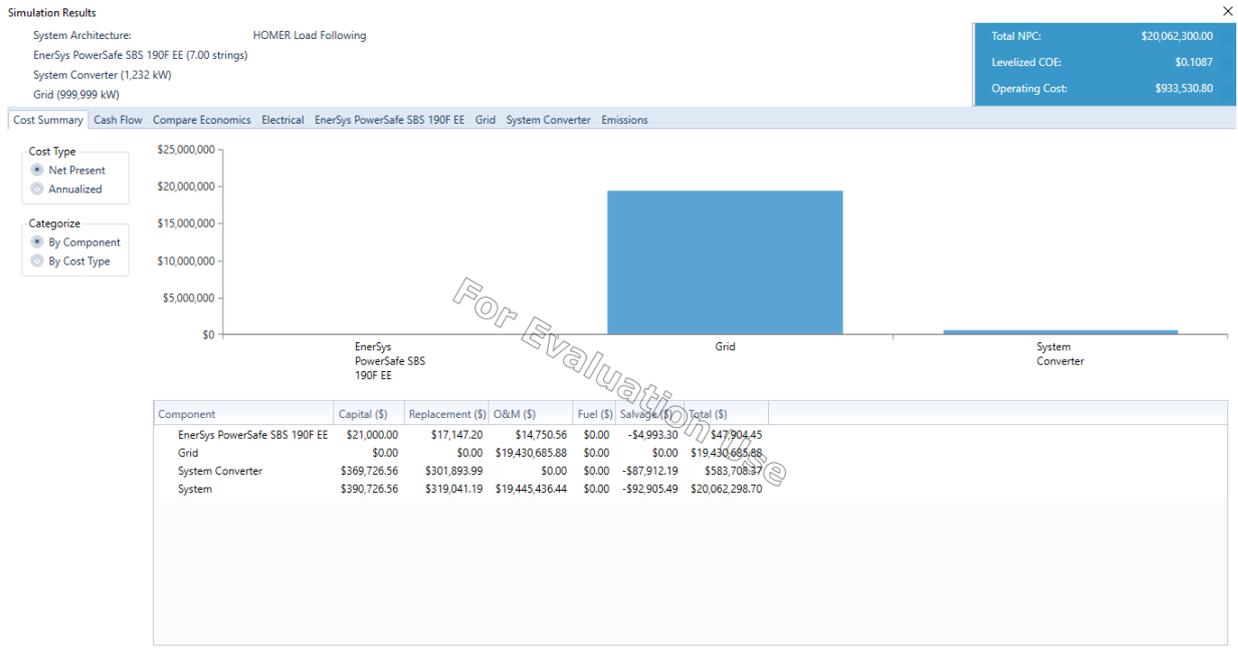


Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

The screenshot shows the HOMER Pro software interface in the RESULTS tab. The top menu includes FILE, LOAD, COMPONENTS, RESOURCES, PROJECT, and HELP. The left sidebar contains icons for Home, Design, Results, and Library, along with a 'View' section showing a schematic diagram of a power system with components like Grid, AC, Eletrolisador, DC, and PowerSafe. Below this is a 'SUGGESTIONS' section with an 'Add a renewable energy source' button. The main area contains a form for project details: Name (Arranjo6_TCC), Author, and Description. Below the form are input fields for Discount rate (13.25%), Inflation rate (11.73%), Annual capacity shortage (0.00%), and Project lifetime (25.00 years). On the right, there is a world map with a location pin over South America, and a search bar for 'pecem'. Below the map is a banner that says 'Got questions? Check out the HOMER KnowledgeBase'.

Architecture		Cost				System		PowerSafe SBS 190F				
Grid (kW)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Nominal Capacity (kWh)	Usable Nom (kWh)
999,999	1,242	CC	\$20.0M	\$0,108	\$932,339	\$372,684	0	0				
70	1,232	LF	\$20.1M	\$0,109	\$933,531	\$390,727	0	0	0.126	57.1	180	126

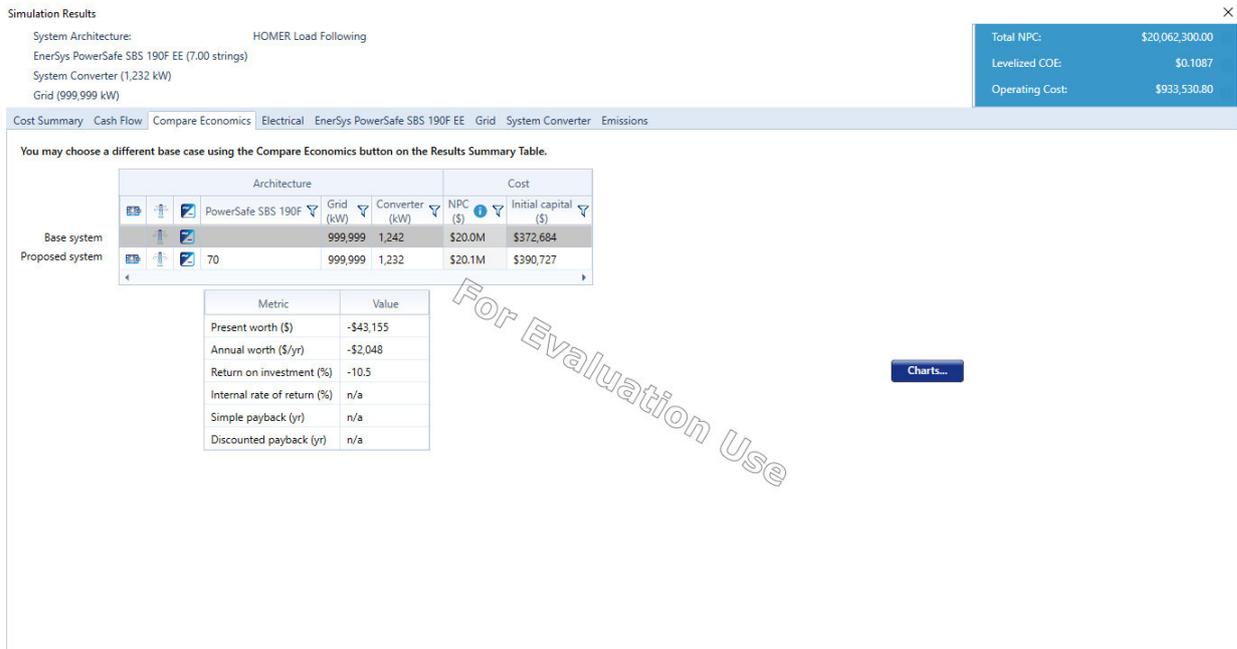
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



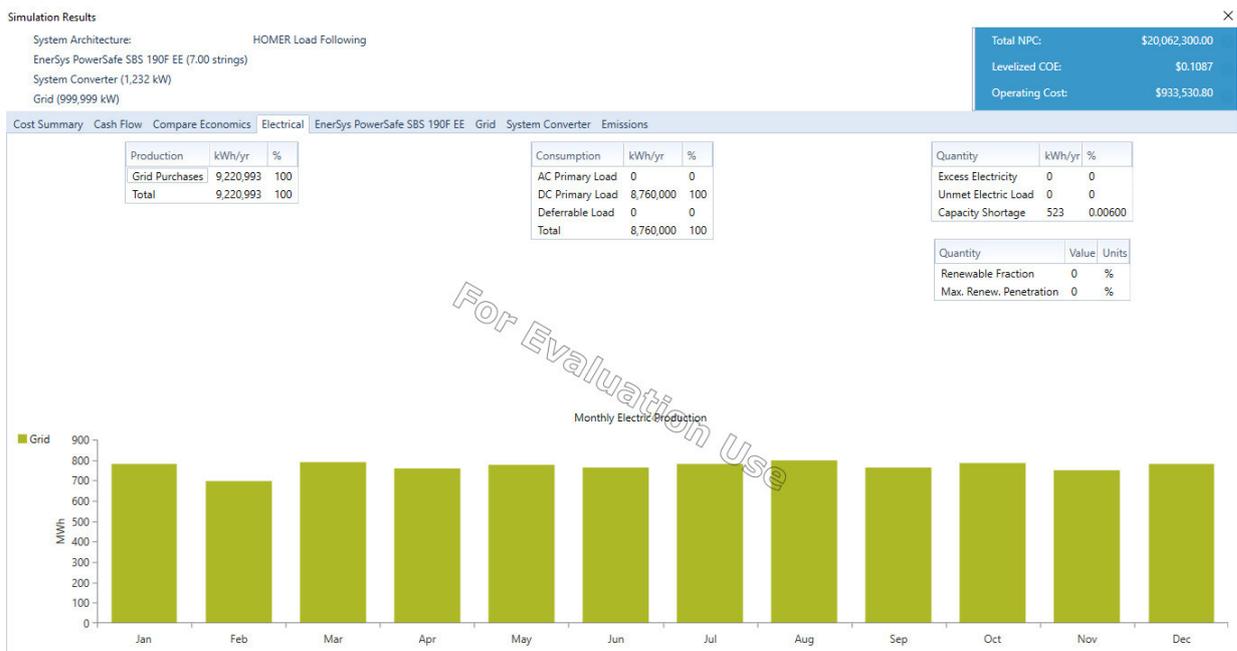
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



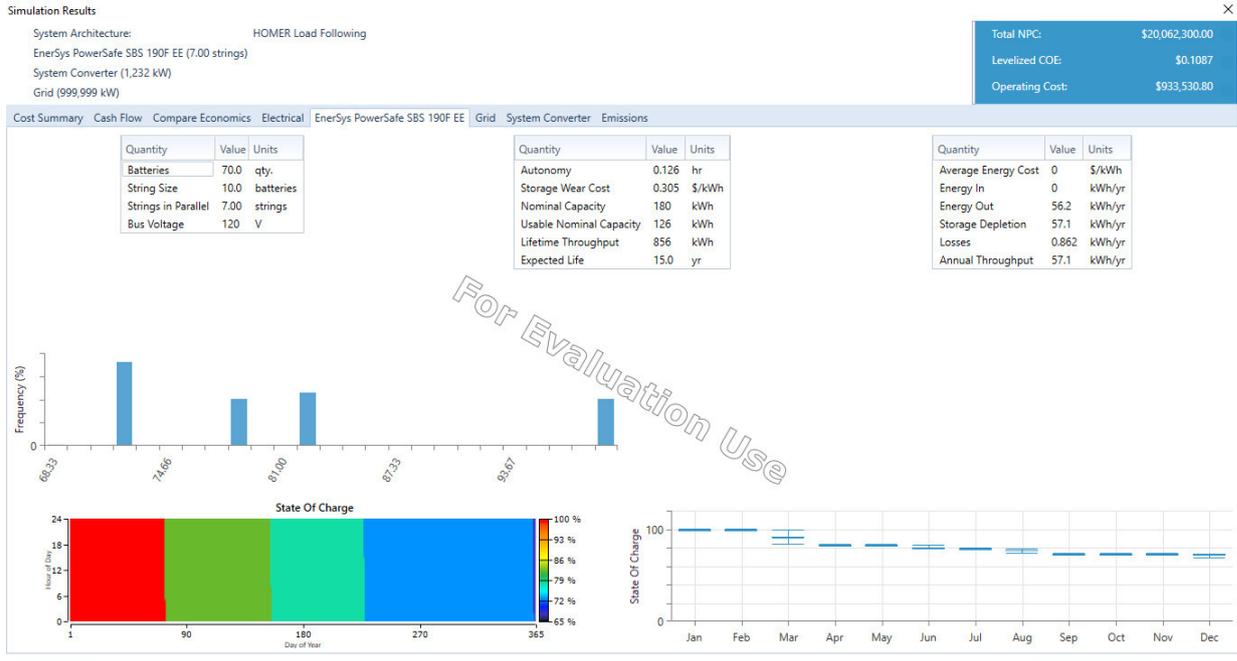
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



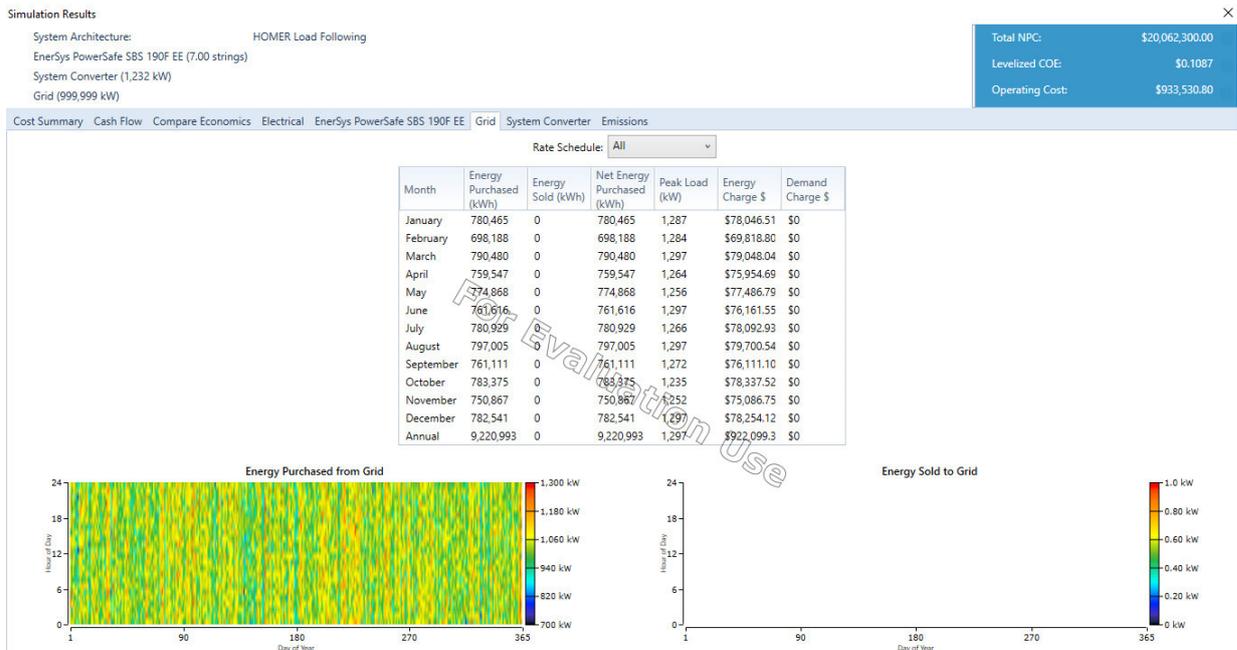
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



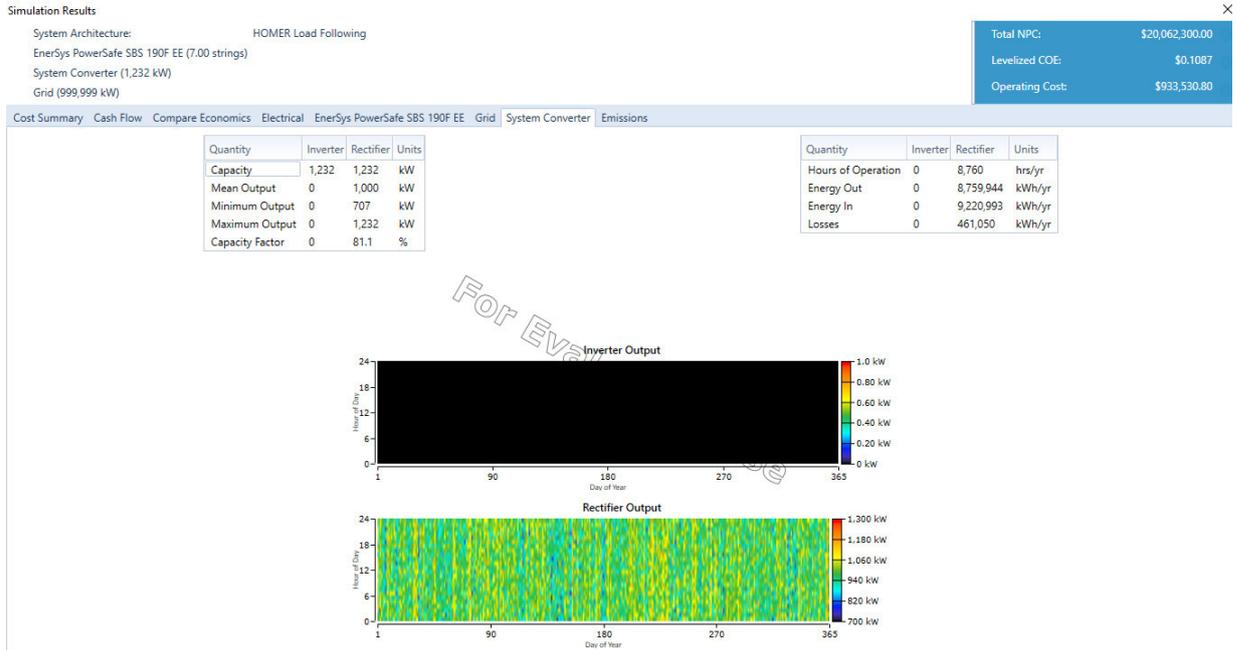
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



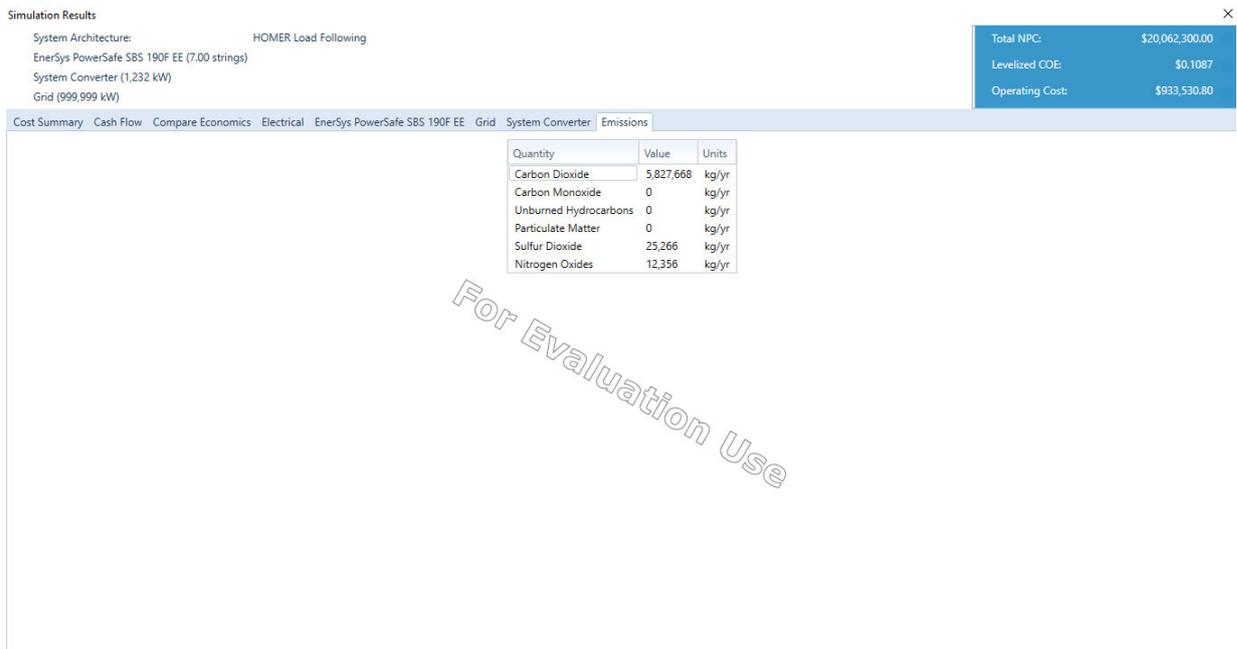
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



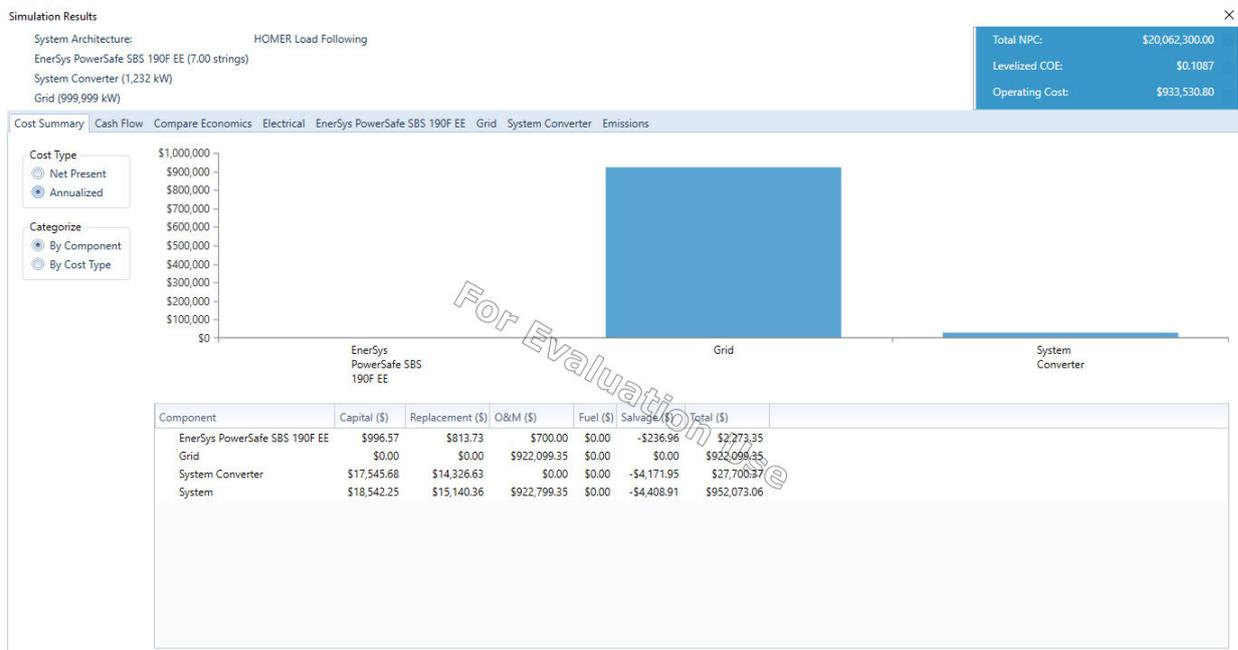
Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)



Fonte: HOMER (Elaborado pela autora)

**ANEXO A – TERMO DE REFERÊNCIA ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL E
RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL EIA/RIMA.**

O documento *Portable Document Format* (PDF) anexado traz o Termo de Referência com as diretrizes para o EIA e o RIMA.



M M A

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Ibama
Diretoria de Licenciamento Ambiental - Dilic

TERMO DE REFERÊNCIA
Estudo de Impacto Ambiental e
Relatório de Impacto Ambiental EIA/Rima

Tipologia: COMPLEXOS EÓLICOS MARÍTIMOS
(OFFSHORE)



INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
SCEN Trecho 2 - Ed. Sede do IBAMA - Bloco B - Sub-Solo, Brasília/DF, CEP 70818-900
Telefone: e Fax: @fax_unidade@ - <http://www.ibama.gov.br>

TERMO DE REFERÊNCIA

Processo nº 02007.003499/2019-91

COMPLEXOS EÓLICOS MARÍTIMOS

INSTRUÇÕES GERAIS

Este Termo de Referência (TR) tem como objetivo determinar diretrizes e critérios técnicos gerais que deverão fundamentar a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o respectivo Relatório de Impacto Ambiental (Rima), a fim de subsidiar o processo de licenciamento ambiental prévio do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Ibama). É aplicável a processos com significativo impacto ambiental, sendo adaptado a particularidades do projeto e da região onde se insere, conforme informações prestadas pelo empreendedor na Ficha de Caracterização da Atividade. Projetos experimentais, com até duas turbinas, ou instalados sobre plataformas já existentes, poderão demandar estudo ambiental simplificado.

O estudo deverá ser redigido com organização lógica das informações em capítulos, com a localização de dados importantes em sumários e índices.

O Estudo de Impacto Ambiental deverá ser apresentado no formato PDF, com reconhecimento ótico de caracteres (OCR) e em arquivos com tamanho inferior a 80 MB. Deverão ser utilizados mecanismos de comunicação visual, tais como figuras, fotografias, mapas e gráficos. Conforme o caso, os anexos podem ser entregues em outros formatos aceitos pelo Sistema Eletrônico de Informação (SEI), a saber: 7Z, BZ2, CSV, GZ, HTM, HTML, JSON, KMZ, MP4, MPEG, MPG, ODP, ODS, OGG, OGV, PDF, SVG, TAR, TGS, TXT, XML, ZIP. As informações espaciais devem ser enviadas em arquivo compactado, no formato shapefile (SHP, SHX e DBF), utilizando sistema de coordenadas geográficas e Datum Sirgas 2000; produtos raster (imagens orbitais, processamentos e fotos aéreas) em formato geotiff; e planilhas em formato ODS ou XLSX desbloqueadas. Os dados brutos e listagens elaborados durante o diagnóstico ambiental também deverão ser apresentados em planilha editável, conforme tabela padrão disponível em <http://www.icmbio.gov.br/sisbio/dados-de-licenciamento.html>.

O escopo deste Termo de Referência inclui as unidades geradoras de energia eólica; a rede conectora submarina; a subestação marítima; a rede de transmissão de energia, incluindo seu trecho submarino e seu trecho terrestre subterrâneo, assim como o segmento aéreo até a conexão com o Sistema Interligado Nacional (SIN); a subestação terrestre e as áreas de apoio exclusivas para a obra. Caso a linha de transmissão (LT) proposta não se enquadre no procedimento simplificado, conforme os termos do Artigo 5º da Portaria MMA nº 421, de 26 de outubro de 2011, seu diagnóstico deverá atender às exigências do TR básico para linhas de transmissão.

Estabelece-se a seguinte itemização para EIA/Rima.

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar, em síntese, o contexto de elaboração do estudo e suas conclusões, de forma a introduzir o leitor ao seu conteúdo.

- a) Descrever, brevemente, o empreendimento/atividade e o ambiente em que se desenvolverá.
- b) Apresentar breve histórico sobre o empreendimento e sobre o respectivo processo de licenciamento ambiental.
- c) Indicar os objetivos do empreendimento e sua relevância ambiental, econômica, social e política, nas esferas regional, estadual, nacional e internacional (quando couber).
- d) Justificar a necessidade da sua implantação e operação.

2. IDENTIFICAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as informações acerca do proponente do empreendimento e da equipe técnica responsável pela elaboração do estudo.

Neste capítulo as informações a serem prestadas devem se restringir àquelas itemizadas neste Termo de Referência, no intuito de se evitar inclusão de textos adicionais de pouca relevância para o licenciamento ambiental do empreendimento ou ainda para evitar a inclusão de informações que serão prestadas em outros capítulos do Estudo.

Entende-se como empreendedor a pessoa jurídica responsável pelo empreendimento.

Entende-se como empresa responsável pela elaboração do estudo a pessoa jurídica contratada pelo empreendedor para a realização do estudo.

Entende-se como equipe responsável pela elaboração do estudo o conjunto de profissionais habilitados que participaram da elaboração do estudo.

Imperioso ressaltar que o empreendedor e os profissionais que subscrevem o estudo são responsáveis pelas informações apresentadas, sujeitando-se às sanções administrativas, civis e penais.

2.1. Identificar o Empreendedor

- a) Nome ou Razão Social;
- b) CNPJ;
- c) Endereço completo;
- d) Telefone e e-mail;
- e) Representantes legais (nome, CPF, endereço, fone e e-mail);
- f) Cadastro Técnico Federal (CTF) (não obrigatório nesta fase);
- g) Experiência prévia em projetos eólicos *offshore* (MW instalados ou em instalação; países).

2.2. Identificar a Empresa de Consultoria

- a) Nome ou Razão Social;
- b) CNPJ;
- c) Endereço completo;
- d) Telefone e e-mail;
- e) Cadastro Técnico Federal (CTF) (obrigatório);
- f) Representantes legais (nome, CPF, endereço, fone e e-mail).

2.3. Identificar a Equipe Multidisciplinar

- a) Apresentar nome e formação acadêmica dos profissionais que integram a equipe técnica

multidisciplinar responsável pela elaboração do estudo, identificando os coordenadores de equipe das diferentes áreas, número de registro no respectivo Conselho de Classe, quando couber, número de registro no Cadastro Técnico Federal e ARTs, quando couber.

3. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO/ATIVIDADE E SUAS ALTERNATIVAS

Este capítulo tem como objetivo a descrição das principais motivações e justificativas para o desenvolvimento do empreendimento proposto, das características do projeto, das principais fases e atividades previstas, bem como do seu cronograma estimado. Entende-se que quanto mais claro for o entendimento em relação às atividades previstas para a implantação e operação do projeto, mais objetivo e conciso será a identificação e avaliação de impactos ambientais.

Neste item não devem ser identificados e avaliados impactos positivos e negativos, nem discutidas questões associadas ao estudo de alternativas locacionais e tecnológicas, que serão abordados mais adiante.

3.1. Contextualização do projeto no âmbito do Planejamento Elétrico do país e dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil associados ao setor.

Não se espera neste capítulo análises sobre os potenciais impactos negativos ou positivos do projeto, mas o esclarecimento sobre a conexão entre o empreendimento proposto e o planejamento setorial nacional, enfatizando a justificativa pela sua implantação e operação.

- a) Descrever sucintamente a relação entre o empreendimento e os indicativos presentes nos documentos de planejamento de curto e longo prazo do setor elétrico nacional.
- b) Descrever sucintamente a relação entre o empreendimento e os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil associados ao setor elétrico.

3.2. Contextualização do projeto no âmbito do planejamento marinho nacional e regional

Não se espera neste capítulo análises sobre os potenciais impactos negativos ou positivos do projeto, mas o esclarecimento sobre a conexão entre o empreendimento proposto e o planejamento marinho nacional ou regional, quando existentes.

- a) Descrever sucintamente a relação entre o empreendimento e os indicativos presentes nos documentos de planejamento de curto e longo prazo sobre o uso do espaço marinho nacional e regional, apontando as recomendações aplicáveis presentes nos Planos e Programas, quando existentes.

3.3. Contextualização do projeto no âmbito do planejamento ambiental nacional e regional

O objetivo deste item é esclarecer a relação do empreendimento com o planejamento ambiental nacional, regional, estadual e municipal. Não se espera neste capítulo análises sobre potenciais impactos negativos ou positivos, como por exemplo análise de impactos cumulativos ou sinérgicos com outras ações em curso no âmbito regional, que será abordado mais adiante no estudo.

- a) Descrever sucintamente a relação entre o empreendimento e as políticas ou ações estratégicas ambientais nacionais e regionais, apontando as recomendações aplicáveis presentes nos Planos e Programas, quando existentes.

3.4. Análise de compatibilidade legal

- a) Analisar a compatibilidade do empreendimento com a legislação incidente, com os planos, programas governamentais e zoneamento, propostos ou em implantação, bem como as possíveis vedações legais quanto à implantação e operação do empreendimento ou atividade.
- b) Considerar todos os dispositivos legais, em vigor, nos níveis federal, estadual e municipal aplicáveis ao empreendimento, relativos à utilização, proteção e conservação dos recursos

ambientais, ao uso e ocupação do solo, à gestão de resíduos, produtos perigosos, emissões atmosféricas e efluentes líquidos.

c) Considerar as normas técnicas que tratam de parâmetros máximos de externalidades negativas para ruídos, qualidade da água e segurança da navegação.

d) Analisar a compatibilidade do empreendimento com o Plano de Gerenciamento Costeiro, quando existente.

e) Apresentar certidões ou anuências da prefeitura municipal onde serão localizadas as estruturas terrestres (porto e canteiro), com declaração que o local e o tipo de empreendimento ou atividade estão em conformidade com a legislação aplicável ao uso e ocupação do solo.

3.5. Caracterização do Empreendimento/Atividades

A caracterização do empreendimento e atividades relacionadas deve ser baseada na alternativa tecnológica e locacional preferencial. Deve ser priorizada sua organização espacial, sendo as especificações técnicas essencialmente referenciais, passíveis de atualização conforme o desenvolvimento do projeto e das tecnologias, considerados os correspondentes reflexos ambientais e energéticos. Caso existam diferenças entre a alternativa preferencial e as demais alternativas locacionais, apenas estas desigualdades deverão ser especificadas, na forma de um quadro comparativo.

a) Apresentar base vetorial georreferenciada, em formato *shapefile*, contendo todos os elementos físicos do projeto (torres, cabeamento, estruturas de apoio, rotas, etc).

b) Descrever, conforme itemização a seguir, as principais características do empreendimento.

3.5.1. Caracterização do Empreendimento

3.5.1.1. Unidades de Geração

3.5.1.1.1. Descrição do complexo eólico

a) Abordar: (i) a localização das turbinas, (ii) localização e tipo de estruturas para medições meteorológicas, (iii) o tipo e especificação técnica dos aerogeradores, (iv) a produção de energia, (v) a descrição da proposta de transmissão e sistema de cabos, (vi) a iluminação de navegação proposta.

b) Detalhar: (i) potência prevista (MW), (ii) área total e percentual de área com intervenção durante todas as fases do empreendimento: Planejamento, Implantação, Operação e Descomissionamento.

3.5.1.1.2. Arranjo e fluxograma geral do processo

a) Apresentar informações sobre as etapas de implantação do empreendimento, as quais deverão se referir aos aspectos técnicos e à infraestrutura necessária.

b) Caracterizar a infraestrutura (existente e a ser implantada) e as atividades a serem desenvolvidas no porto de referência.

3.5.1.1.3. Técnicas construtivas a serem utilizadas

a) Descrever os métodos construtivos do complexo eólico marítimo;

b) Explicitar o tipo e características das fundações previstas, local de armazenamento das estruturas e insumos, local de pré-montagem e forma de deslocamento ao local de instalação.

c) Descrever tecnologia para o sistema de aterramento das estruturas.

3.5.1.2. Rede coletora e transmissora submarina

a) Localizar e descrever: (i) cabos submarinos (características, tensão, corrente, técnicas construtivas, profundidade, métodos de proteção); (ii) transição cabo submarino / cabo subterrâneo.

3.5.1.3. Subestação marítima

- a) Apresentar localização da subestação marítima e tipo de fundação.
- b) Apresentar características da subestação e transformadores (se houver).

3.5.1.4. Linha de transmissão terrestre

a) Descrever e detalhar o projeto, os dados técnicos e localização georreferenciada de toda a obra e infraestrutura associada.

b) Apresentar descrição técnica da Linha de Transmissão

- Tensão (kV);
- Extensão total da linha (km), largura e área da faixa de servidão;
- Largura da faixa de serviço;
- Transição cabo subterrâneo / LT aérea;
- Número estimado e alturas mínimas e máximas das torres (estruturas padrão e especiais);
- Premissa de projeto quanto ao alteamento das torres e tipos de estruturas a serem utilizadas em fragmentos florestais;
- Distância média entre torres;
- Distância mínima entre cabos e solo;
- Tipo e dimensão das bases;
- Distâncias elétricas de segurança;
- Sistema de aterramento de estruturas e cercas;
- Subestações existentes que necessitem de ampliação;
- Posição dos pórticos de entrada / saída da nova LT;
- Identificar outras linhas de transmissão que mantenham a mesma faixa de servidão, bem como o distanciamento das mesmas;
- Indicar as interferências da LT nas faixas de servidão de rodovias, ferrovias, oleodutos e gasodutos, pivôs centrais e aeródromos;
- Exigências técnicas de manutenção da vegetação sob e lateralmente aos cabos;
- Previsão de uso de cabeamento revestido (para prevenção de eletrocussão da fauna).

3.5.1.5. Subestação terrestre

a) Descrever, sucintamente, a subestação terrestre, quanto à potência, área total e do pátio energizado, e sistema de drenagem pluvial;

b) Indicar pontos de interligação e localização das subestações;

c) Apresentar características de subestações e transformadores (se houver).

3.5.2. Caracterização da infraestrutura de apoio

3.5.2.1. Canteiro de Obras e Infraestrutura de Apoio

a) Caracterizar a(s) área(s) destinada(s) ao canteiro de obra, incluindo *layout* e descrição de suas unidades, de oficinas mecânicas e de postos de abastecimento.

b) Apresentar a estimativa de tráfego rodoviário, portuário e marítimo:

- Adequação à infraestrutura existente; Quantitativos previstos de carga a ser transportada;

Tecnologias de transbordo a serem utilizadas; Porte e regime das operações e embarcações;

- Descrição do fluxo marítimo previsto de cargas e pessoas para as diferentes fases do empreendimento;

c) Descrever a infraestrutura e sistemas associados ao empreendimento:

- Base Portuária de armazenamento e pré-montagem;
- Navios usados na instalação das fundações, turbinas, cabos, subestação e enrocamento.

3.5.2.2. Acessos e rotas

a) Representar as estruturas a serem instaladas e as rotas, devidamente identificadas, de todas as embarcações engajadas no empreendimento, em todas as suas fases.

b) Estimar a frequência de embarcações (quantidade versus unidade de tempo) e suas características, para cada rota.

c) Representar os acessos e rotas terrestres a serem utilizados no transporte de megaestruturas, as necessidades de adaptação de estradas e os planos de trafegabilidade e segurança.

d) Detalhar as restrições ao uso da área do empreendimento e acessos permanentes quanto a:

- Navegação durante a fase de instalação;
- Navegação durante a fase de operação;
- Pesca, usos recreativos e outros durante a fase de instalação;
- Pesca, usos recreativos e outros durante a fase de operação.

e) Indicar as rotas seguras de navegação.

f) Indicar a sinalização de navegação a ser empregada.

3.5.2.3. Dragagem, Terraplanagem e outras Intervenções

a) Prever qualitativamente eventuais dragagens, caso se aplique, segundo Resolução CONAMA 454/2012, apresentando:

- Delimitação, em poligonais georreferenciadas, das áreas a serem dragadas e das áreas de disposição propostas;
- Cotas de profundidade a serem atingidas;
- Estimativa do volume a ser dragado e se haverá reaproveitamento do material no projeto ou descarte no mar;
- Características dos equipamentos de dragagem, bem como suas metodologias e técnicas de execução da atividade.

Havendo a previsão de lançamento de sedimentos em mar, deverão ser avaliadas alternativas locais para a definição de um Polígono de Disposição Oceânico - PDO. As mesmas premissas e orientações para o estudo de alternativas locais (Item 4) deverão ser utilizadas para a definição do(s) sítio(s) de disposição, através dos critérios aplicáveis sugeridos naquele item, contemplando minimamente avaliação da hidrodinâmica e tendências de espalhamento do sedimento lançado, com apoio de ferramentas de modelagem numérica; características físico-químicas do sedimento, tipos de fundo, proximidades com UCs, presença de áreas de pesca e demais usos econômicos e recreativos, assim como outros receptores sensíveis existentes na área de estudo.

Em caso de disposição dos sedimentos no mar em local já licenciado, deverá ser apresentada cópia da

licença ambiental vigente.

3.5.3. Caracterização dos recursos e efeitos das atividades

3.5.3.1. Mão-de-obra

a) Caracterizar e quantificar a mão de obra, especificando, por etapa (instalação e operação):

- o nível de escolarização e especialização exigido;
- cronograma de contratações e de desmobilização.

3.5.3.2. Insumos e Utilidades

a) Caracterizar os insumos (materiais sólidos e perigosos) a serem manuseados. Em regiões de escassez hídrica, a demanda e disponibilidade do recurso deverá ser caracterizada.

3.5.3.3. Resíduos e efluentes

3.5.3.3.1. Efluentes Líquidos

a) Caracterizar e estimar os quantitativos de efluentes líquidos gerados na implantação e operação do empreendimento;

b) Identificar as características qualitativas estimadas para os efluentes líquidos identificados;

c) Apresentar os sistemas de controle e tratamento dos efluentes líquidos a serem gerados.

3.5.3.3.2. Resíduos Sólidos

a) Identificar as fontes de geração, estimativas quantitativas e seus respectivos resíduos sólidos a serem gerados na implantação e operação do empreendimento;

b) Indicar os pontos de acondicionamento e de estocagem temporária dos resíduos sólidos gerados, bem como locais de disposição final;

c) Caracterizar os sistemas de controle e os procedimentos adotados associados às fontes identificadas, indicando as formas e locais de disposição final dos resíduos.

3.5.3.4. Ruídos, Vibrações e Luminosidade Artificial

3.5.3.4.1. Ruídos e vibrações

a) Descrever as principais fontes de ruídos do empreendimento, para as fases de implantação e operação.

b) Realizar modelagem computacional de ruídos no ambiente subaquático, por fase do empreendimento, considerando sua propagação e atenuação neste meio.

3.5.3.4.2. Luminosidade Artificial

a) Apresentar a previsão de luminosidade artificial para os aerogeradores, subestação submarina, estruturas que venham a ser instaladas na orla e embarcações/estruturas utilizadas durante a obra. Observar a legislação pertinente ao tema (p.ex., Portaria Nº 11, de 30 de janeiro de 1995 (D.O.U. de 31/01/95), Lei BA nº 7.034 de 13 de fevereiro de 1997 (D.O.E. de 13/02/97); e Resolução CONAMA nº 10, de 24 de outubro de 1996).

b) Especificar comprimento de onda, intensidade, padrão de emissão (contínuo/intermitente) e direcionamento das fontes luminosas.

3.5.4. Descomissionamento

a) Apresentar o Plano de descomissionamento do complexo, contemplando a) Estruturas a serem removidas, b) Métodos e técnicas para desmobilização e c) Destinação dos resíduos.

3.5.5. Zonas de exclusão de outras atividades marítimas (navegação, pesca, turismo, exploração de

óleo e gás, etc): poligonal de segurança do empreendimento.

a) Representar a poligonal de segurança do empreendimento, apresentando possíveis rotas de navegação e opções de ajustes locais, na distribuição das torres e na proteção de cabo/amarração.

b) Caracterizar as atividades pré-existentes nas zonas de exclusão.

3.6. Cronograma

a) Apresentar cronograma físico estimado de todas as fases do empreendimento, contemplando eventuais restrições sazonais relacionadas a fatores ambientais ou socioeconômicos.

b) Custo total estimado do empreendimento.

4. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS E LOCACIONAIS

Considerando que ainda não há Planejamento Espacial Marinho no Brasil, a experiência internacional de países que possuem numerosos parques eólicos instalados em suas áreas marinhas e os respectivos critérios técnicos adotados por estes para a alocação dos projetos, de forma a controlar e mitigar impactos ambientais e conflitos de uso recorrentes a esta tipologia de empreendimento (principalmente aqueles relacionados às atividades de turismo, impactos à paisagem, aves limícolas, ocorrências de corais, maior sensibilidade ambiental de áreas rasas e pela criação de áreas de exclusão de pesca, dentre outros), recomenda-se avaliação criteriosa quanto ao distanciamento da costa.

Para determinação do distanciamento mínimo da costa deverão ser considerados os impactos previstos na região de inserção do empreendimento. No caso de região com ocorrência de pesca artesanal, o distanciamento mínimo da costa deverá considerar as áreas de pesca tradicionalmente utilizadas e/ou o afastamento recomendado por estudos, como p.ex. Xavier et al, 2020; Schubert et al, 2019, que propõem 18,5 km e 20 km, respectivamente.

Em relação a aves limícolas, estudiosos apontam que o potencial impacto sobre o grupo se limita à faixa costeira no entorno dos pontos de parada e de invernada ao longo das rotas migratórias. Assim, o estudo deve caracterizar os ambientes de atratividade na costa e sua utilização por este grupo de aves, permitindo inferir o grau de risco local.

Em relação a impactos visuais, o EIA deve estabelecer um distanciamento mínimo com base em estudos de referência, como por exemplo DTI (2005) e BMT Cordah Limited (2003) (Quadro 1), que correlacionem a sensibilidade da costa com o adequado distanciamento do parque eólico *offshore*, de forma a minimizar o impacto visual.

Quadro 1. Efeitos visuais estimados do empreendimento em unidades de paisagem com diferentes graus de sensibilidade (adaptado de DTI 2005).

Sensibilidade da unidade de paisagem	Significância do efeito		
	Pequeno efeito	Médio efeito	Alto efeito
Baixa	> 8 km	-	< 8 km
Média	> 13 km	8 - 13 km	< 8 km
Alta	> 24 km	13 - 24 km	< 13 km

Para justificar o distanciamento mínimo da costa é necessário que o EIA avalie quais impactos o empreendimento irá causar e qual o distanciamento recomendado para mitigá-los. Recomenda-se a apresentação em formato de tabela para demonstrar didaticamente os impactos identificados na região, os distanciamentos relacionados a cada impacto e o estudo ou estudos que embasaram o distanciamento proposto.

As referências aqui citadas são exemplificativas, o EIA poderá se valer de outros arcabouços teóricos

para justificar e substanciar o distanciamento mínimo da alternativa proposta.

Referências recomendadas:

Xavier T; Gorayeb A; Brannstrom C. Energia Eólica Offshore e Pesca Artesanal: impactos e desafios na costa oeste do Ceará, Brasil. In: Muehe D; Lins-de-Barros FM; Pinheiro L (orgs.) Geografia Marinha: Oceanos e Costas na Perspectiva de Geógrafos. – Rio de Janeiro: PGGM, 2020. ISBN 000-00-00000-00-0

Camargo Schubert Engenheiros Associados. Atlas Eólico e Solar: Ceará. Curitiba: Camargo Schubert; Fortaleza: ADECE : FIEC : SEBRAE, 2019.

BMT Cordah Limited, Offshore Wind Energy Generation: Phase 1 Proposals and Environmental Report For consideration by the Department of Trade and Industry. 2003

DTI. Guidance on the assessment of the impact of offshore wind farms: Seascape and Visual Impact Report. Department of Trade and Industry. UK, 2005.

- a) Identificar e qualificar as alternativas locais e tecnológicas estudadas para a implantação do empreendimento, levando-se em consideração os aspectos técnicos, econômicos e ambientais.
- b) Contemplar, no que se refere às alternativas tecnológicas, as opções relativas à minimização de impactos ambientais em projetos de geração de energia eólica, tais como: tipo de fundações, altura de torres, comprimento de pás, velocidade de rotação, cores das estruturas, iluminação, sistemas de identificação de risco de colisão pelas aves, entre outros.
- c) Avaliar alternativas locais do empreendimento de forma a evitar os principais impactos negativos associados, com base nas áreas restritivas à atividade ou ambientalmente sensíveis.
- d) Propor uma alternativa preferencial, resultante da comparação de três alternativas viáveis, mediante uma classificação baseada no nível relativo de interferência de cada uma com as variáveis ambientais referentes aos meios físico, biótico e socioeconômico preexistentes ao empreendimento, conforme Mapa de Identificação de Usos Múltiplos Preexistentes, e considerando, também, variáveis como o potencial eólico, distância da costa e profundidade
- e) Justificar as razões que subsidiaram a escolha quando comparada às demais alternativas e à luz das tecnologias consagradas e tendências internacionais, confrontando-as com a hipótese de não execução do projeto.

Para a proposição das alternativas locais, o empreendedor deverá:

- Delimitar a poligonal de viabilidade econômica e operacional do projeto a partir da área portuária de referência para instalação do empreendimento, justificando todos os critérios técnicos adotados para a delimitação da extensão total *offshore*, os quais devem guardar consonância com as boas práticas em utilização na experiência internacional;
- Realizar levantamento das características do leito considerado potencialmente viável para a recepção do projeto. A área deverá ser investigada em toda a sua extensão para fins de caracterização geral do tipo de fundo e sua respectiva sensibilidade aos aspectos do projeto. O grau de detalhe e metodologias a serem adotadas para esta investigação deverá minimamente ser capaz de indicar o padrão do(s) tipo(s) de fundo existentes e sua variação no espaço;
- Identificar se há sobreposição total ou parcial da poligonal de estudo com unidade de conservação marinha.
- Com base no mapa de fundo da área geral identificada como viável operacionalmente para a recepção do projeto, deverão ser avaliadas e previstas as alternativas locais.
- Excluindo-se do polígono de potencial alocação do empreendimento, com base nas variáveis listadas acima e no Mapa de Identificação de Usos Múltiplos Preexistentes, serão aceitas como alternativas locais apenas aquelas que não possuam hipóteses de inviabilidade preexistentes.

Devem ser adotadas as seguintes diretrizes para construção do Mapa de Identificação de Usos Múltiplos Preexistentes:

- Empregar técnicas de geoprocessamento na avaliação integrada das diferentes temáticas;
- Apresentar os critérios para determinação dos pesos relativos de cada temática;
- Considerar, pelo menos, as seguintes camadas de informação em sua composição:
 - Áreas prioritárias para conservação da biodiversidade (Portaria MMA nº 463/2018);
 - Ambientes recifais;
 - Avifauna: rotas migratórias, Áreas importantes para aves ("IBAs"), Áreas de concentração de aves limícolas e marinhas;
 - Mamíferos marinhos: IN Ibama/ICMBio 02/2011;
 - Quelônios: IN Ibama/ICMBio 01/2011;
 - Atividades potencialmente conflitantes: pesca, turismo, esportes náuticos, rotas de navegação, exploração de óleo e gás, complexos eólicos *offshore* em operação ou já autorizados, etc;
 - Modelagem de ruídos subaquáticos (gerados na fase de instalação);
 - Modelagem de impacto visual sobre a costa e atrações turísticas *offshore*, potenciais ou consolidadas;
 - Rotas de navegação portuária e pesqueira atualmente operadas dentro da poligonal de estudo, identificando os empreendimentos portuários e as colônias de pesca que poderão ser atingidos com as zonas de exclusão de navegação pós-implantação do empreendimento;
 - Lavras minerais (terrestres e marinhas) concedidas, em prospecção ou em operação, na poligonal do estudo.

5. ÁREA DE ESTUDO (AE)

Este capítulo tem como objetivo delimitar a Área de Estudo, ou seja, aquela em que serão coletadas informações a fim de caracterizar e descrever o ambiente potencialmente afetado pelo projeto.

A Área de Estudo deve abranger o território no qual se observe continuidade dos fatores ambientais físicos, bióticos e socioeconômicos que se julguem relevantes ao entendimento dos impactos preliminarmente previstos e para definição futura da Área de Influência do empreendimento.

A definição dos limites da Área de Estudo deve ser devidamente justificada, demonstrando-se quais fatores ambientais foram analisados, a área de abrangência desses fatores e o grau de significância atribuído a esses.

A AE deverá ser representativa para fins de levantamento de dados, primários ou secundários, dos meios físico, biótico e socioeconômico. Tais estudos devem fornecer informações para a elaboração do diagnóstico ambiental, a escolha da alternativa locacional e tecnológica e para a fundamentação técnica do prognóstico que atestará ou não a viabilidade socioambiental do empreendimento.

6. DIAGNÓSTICO

São objetivos deste capítulo:

a) Apresentar diagnóstico ambiental da Área de Estudo com completa descrição e análise dos recursos

ambientais e suas interações, tal como existem, de modo a caracterizar a situação ambiental da área, antes da implantação do projeto.

b) Descrever e utilizar, para elaboração do diagnóstico, metodologia compatível e consagrada cientificamente, a partir do levantamento, organização, consolidação e análise dos dados preexistentes, bem como por meio de procedimentos que propiciem o levantamento, consolidação e análise de dados primários.

O diagnóstico deverá retratar a qualidade ambiental atual da Área de Estudo, indicando as características dos diversos fatores que compõem o sistema ambiental, de forma a permitir o pleno entendimento da dinâmica da área antes da implantação do empreendimento, considerando as interações existentes entre os meios físico, biótico e socioeconômico.

Os levantamentos de dados e informações poderão ser realizados a partir de dados secundários, única e exclusivamente caso estes tenham sido produzidos dentro dos requisitos técnicos deste TR, por estudos científicos ou outros empreendimentos na região.

São requisitos dos dados primários e secundários apresentados neste Capítulo que: (i) reflitam a situação atual dos componentes analisados; (ii) sejam representativos da Área de Estudo; (iii) apresentem metodologia adequada, conforme descrito abaixo em cada item; (iv) seja informada a época do ano em que foram coletados.

6.1. Meio Físico

Considerar, no diagnóstico do meio físico, o subsolo, as águas, o ar e o clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos d'água, o regime hidrológico, as correntes marinhas e as correntes atmosféricas.

6.1.1. Climatologia e Meteorologia

a) Caracterizar as condições meteorológicas regionais e locais sob diversas escalas temporais, considerando a ocorrência de eventos extremos. Apresentar informações referentes aos parâmetros de temperatura, precipitação, evaporação, umidade relativa, insolação, pressão atmosférica e regime de ventos (direção e intensidade). Caracterizar os períodos de visibilidade reduzida ao longo do ano.

b) Apresentar os dados analisados em forma de mapas, tabelas e gráficos, com as médias históricas anuais e mensais, destacando eventos extremos. Contemplar séries recentes e históricas de dados.

c) Apresentar, quanto ao regime de ventos, para a área de estudo e para cada estação do ano identificada na análise de sazonalidade, ou trimestre na ausência de estações identificadas, Rosas dos Ventos mensais e por períodos sazonais; mapas com grade de intensidade e direção ou campos de vento das Normais Climatológicas de média, máxima e mínima; e histogramas direcionais dos ventos da região.

d) Considerar, para a área de estudo, o efeito esteira decorrente de outros empreendimentos eólicos projetados ou autorizados na região.

6.1.2. Oceanografia

a) Apresentar informações referentes aos parâmetros de temperatura, salinidade, densidade, massas d'água, correntes, ondas e regime de marés.

b) Realizar análise de médias, mínimas e máximas e os aspectos inerentes a variações intra e interanuais da área de estudo;

c) Avaliar as correlações existentes entre fenômenos e parâmetros analisados nas diferentes escalas, buscando um entendimento completo do sistema oceanográfico da área de estudo;

d) Contemplar séries recentes e históricas de dados de estações oceanográficas localizadas na área de estudo;

e) Apresentar os dados analisados em forma de mapas, tabelas e gráficos.

6.1.3. Identificação de fenômenos extremos (Meteorologia e Oceanografia)

- a) Caracterizar os fenômenos meteorológicos e oceanográficos extremos, como por exemplo ventos, correntes, ondas e maré meteorológica. Avaliar os eventos identificados como relevantes à meteorologia e à oceanografia na AE quanto a suas ocorrências extremas.
- b) Apresentar uma tabela ou lista dos eventos extremos contendo as seguintes informações: Identificação do evento; Frequência do evento; Região, dentro da AE, onde ocorre com maior frequência; Intensidade mínima e máxima dos eventos; e Possíveis consequências adversas dos eventos para o empreendimento.

6.1.4. Ruídos e Vibrações

6.1.4.1. Meio marinho

- a) Caracterizar os índices de ruídos subaquáticos na área de Estudo.

6.1.4.2. Meio terrestre

- a) Caracterizar os índices de ruídos nas áreas suscetíveis a incremento decorrente da operação de canteiros de obras ou atividades relacionadas à instalação e operação.

6.1.5. Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Geotecnia

6.1.5.2. Meio marinho

- a) Caracterizar e geoespacializar as unidades geológicas e geomorfológicas presentes na área de estudo, indicando os tipos de fundo ocorrentes, conforme orientação apresentada no item 4.
- b) Realizar investigações geotécnicas, em caráter preliminar, da alternativa locacional preferencial, de forma a definir o tipo de tecnologia de fundação a ser adotada no projeto.
- c) Caracterizar a camada superficial dos sedimentos da área de estudo de acordo com as orientações da Resolução CONAMA nº 454/2012, devendo ser apresentada a malha amostral adotada. A possível exclusão de parâmetros da caracterização deverá ser justificada com base em dados secundários recentes e representativos da área de estudo.

Havendo a previsão de dragagem, na malha amostral da caracterização de sedimentos, deverá ser contemplada a avaliação das áreas de dragagem e disposição de sedimento.

6.1.5.1. Meioterrestre

- a) Caracterizar e geoespacializar as unidades geológicas e geomorfológicas presentes na área de estudo tendo por base a interpretação de imagens de satélite, fotografias aéreas e observações de campo.
- b) Realizar mapeamento e caracterizar as classes de solo, tomando como referência o Sistema de Classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (i) Para a ADA deve ser realizado um levantamento buscando a descrição dos tipos de solo identificados num nível adequado à instalação da LT e demais instalações em terra, associadas ao complexo eólico. (ii) Numa escala menor (o restante da área de estudo) a caracterização da fração continental poderá ser realizada a partir de dados secundários ou de levantamentos semidetalhados e de reconhecimento. (iii) Os parâmetros avaliados em laboratório deverão levar em conta as variáveis relacionadas prioritariamente ao contexto da conservação ambiental, privilegiando a mensuração de parâmetros relativos à manutenção e conservação dos meios biótico e abiótico.
- c) Identificar e mapear as áreas propensas às instabilidades geotécnicas ou com susceptibilidade à erosão.
- d) Realizar, para a ADA, levantamento planialtimétrico/batimétrico em escala apropriada para definição e identificação das principais formações.

6.1.6. Qualidade da água

6.1.6.1. Ambiente marinho

Contemplar, na caracterização da qualidade da água, os parâmetros de turbidez, sólidos totais e óleos e graxas, assim como eventuais poluentes potencialmente presentes na área marinha onde prevê-se a implantação do projeto, de acordo com os usos e fontes existentes na localidade. Sempre que a profundidade local permitir, deverão ser coletadas amostras em superfície, a meia água e fundo.

6.1.6.2 Ambiente terrestre

Caso haja previsão de impacto em corpos hídricos (por ex.: captação ou despejo de efluentes dos canteiros de obras, travessia da LT, proximidade entre corpos hídricos e áreas de corte e aterro): Identificar eventuais fontes poluidoras, pontuais e difusas, e pontos de lançamento e/ou disposição dos efluentes domésticos e industriais em recursos hídricos, na área de estudo.

6.1.7. Hidrodinâmica Costeira e Transporte de Sedimentos

a) Caracterizar a hidrodinâmica costeira da área de estudo. Na inexistência ou escassez de informações, dados primários deverão ser obtidos contemplando o período mínimo de medições de um mês.

b) Trabalhar os dados de forma integrada, descrevendo as inter-relações entre marés, ondas e correntes, relacionando ainda com os dados meteorológicos, de forma a descrever os padrões de comportamento hidrodinâmico atuantes na área de estudo do empreendimento de acordo com as épocas do ano.

c) Caracterizar os processos de transporte de sedimentos ao longo da costa, definindo as regiões potenciais de acreção e erosão costeira.

d) Contemplar, na caracterização, o levantamento histórico da evolução geomorfológica da linha de costa, fazendo uma relação com os regimes de ondas e correntes.

e) Utilizar, para os processos de hidrodinâmica costeira e transporte de sedimentos, em adição aos métodos observacionais, a ferramenta modelagem computacional.

f) As modelagens devem ser capazes de prever as prováveis interferências do parque eólico no meio marinho e costeiro sobre os padrões de circulação hidrodinâmica, de propagação de ondas e de transporte de sedimentos na AID, apresentando ainda os resultados das alterações batimétricas na morfologia da linha de costa em função de tais estruturas.

g) Utilizar a modelagem sob diversos cenários (inverno – entrada de frente fria, verão, período de maré de sizígia e de quadratura).

h) Apresentar as características e o histórico de aplicações do modelo, descrevendo o domínio modelado, os dados de entrada e suas origens, os procedimentos de calibração e validação, os tempos de rodada, os cenários modelados, técnicas de pós-processamento e demais características que forem consideradas importantes.

i) Considerar os seguintes critérios durante avaliação da modelagem:

- Adequação do modelo numérico ao problema;
- Estratégia metodológica;
- Qualidade e adequação dos dados de entrada;
- Qualidade e adequação das técnicas de pós-processamento;
- Referências, critérios e argumentos considerados na interpretação dos resultados;
- Interação dos diagnósticos obtidos via modelagem com aqueles obtidos através de outros métodos.

6.2. Meio Biótico

Este capítulo tem como objetivo caracterizar as condições do ambiente prévias à instalação do empreendimento, possibilitando a comparação com a situação posterior e, em relação a grupos mais vulneráveis, com áreas controle, visando à identificação e mensuração de possíveis impactos. Também visa identificar questões ambientais relevantes e aspectos sensíveis inerentes a cada táxon que possa ser afetado pela implantação do empreendimento. Sempre que possível, devem ser realizadas campanhas multipropósito, visando reduzir a movimentação de embarcações e os riscos associados, tal como o abalroamento acidental de mamíferos marinhos e quelônios.

a) Embasar o diagnóstico do meio biótico em dados primários (exceto quando indicado ou quando houver disponibilidade de dados secundários que reflitam a situação atual dos componentes analisados), obtidos em malha amostral e sazonalidade indicadas para cada táxon. A distribuição das campanhas deverá considerar as especificidades sazonais da área de inserção do empreendimento.

b) Obter, previamente à realização das campanhas, Autorização para Captura, Coleta e Transporte de Material Biológico (ABio), conforme procedimentos definidos na Instrução Normativa Ibama nº 8/2017. No caso de captura e marcação de aves silvestres, obter também autorizações no âmbito do Sistema Nacional de Anilhamento, gerido pelo ICMBio/CEMAVE (IN Ibama nº 27/2002).

c) Observar as diretrizes e recomendações dos Planos de Ação Nacionais para a Conservação das Espécies Ameaçadas de Extinção ou do Patrimônio Espeleológico (PAN) correspondentes aos táxons avaliados, disponíveis no *site* do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.

d) Caracterizar a flora e a fauna das áreas de estudo do empreendimento, com descrição dos tipos de habitats encontrados (incluindo áreas antropizadas). Os tipos de habitats deverão ser geoespacializados, com indicação do tamanho em termos percentuais e absolutos.

e) Destacar as espécies mais vulneráveis ao empreendimento, as indicadoras da qualidade ambiental, as de valor científico e econômico, as raras e aquelas ameaçadas de extinção, conforme a IUCN e listas nacionais e regionais legalmente vigentes. Caso o local de ocorrência destas espécies corresponda a uma área específica, esta deverá ser representada em mapa. Todos os mapas gerados no diagnóstico devem ser fornecidos em formato vetorial (shapefiles), em conjunto com as planilhas de dados brutos (registros primários) conforme padrões definidos no item "Instruções Gerais" deste TR.

f) Identificar as espécies de ocorrência permanente, migratória ou sazonal, indicando o regime temporal da ocorrência de cada espécie.

g) Identificar a presença de espécies invasoras e geoespacializar a área de ocorrência dessas espécies na AE.

h) Identificar as Unidades de Conservação existentes na Área de Estudo, descrevendo sua localização, zona de amortecimento, objetivos de criação, histórico, existência de conselho de gestão e usos permitidos de acordo com a categoria correspondente (disposto na Lei 9.985/2000) e com o Plano de Manejo.

i) Identificar, geoespacializar e caracterizar o uso e ocupação do solo, informando sobre a existência de áreas de preservação permanente, uso agrícola, acessos, etc.

6.2.1. Meio marinho

a) Caracterizar de forma detalhada os locais de instalação das estruturas submarinas (fundações, âncoras, cabos, dentre outras) no que diz respeito às comunidades biológicas que serão diretamente impactadas. Esta caracterização deve indicar, de forma conclusiva, a presença, ou não, de ambientes recifais na área afetada. As informações devem ser reunidas em um mapa detalhado, em escala adequada à visualização, com indicações da batimetria e faciologia, no qual estejam representadas as estruturas submarinas a serem instaladas. Os mapas devem destacar o distanciamento que os aerogeradores e demais estruturas submarinas apresentarão das formações identificadas ou possíveis interações, se houver.

6.2.1.1. Ambientes recifais

Este tópico visa identificar habitats ricos, vulneráveis e pouco resilientes, como recifes de coral e de arenito, bancos de algas (calcáreas ou não), moluscos e fanerógamas marinhas em relação aos quais o empreendimento deve evitar interferências. Orienta-se a utilização, como referência, do Plano de Ação Nacional para a conservação dos Ambientes Coralíneos.

a) Identificar, descrever e geoespacializar áreas de ocorrência de recifes de corais (incluindo corais de águas profundas) e de arenito, bancos de algas (calcáreas ou não), moluscos e fanerógamas marinhas.

6.2.1.2. Comunidade Bentônica

Este tópico visa caracterizar a natureza dos habitats e comunidades, assim como seu grau de sensibilidade aos impactos potenciais do empreendimento. Além de subsidiar a definição do layout do projeto e medidas mitigadoras, estabelecerá a linha de base para o futuro monitoramento dos impactos sobre o grupo na Área Diretamente Afetada.

a) Definir malha amostral em função da heterogeneidade espacial da Área de Estudo.

b) Realizar amostragem em triplicata (três sub amostras em cada unidade amostral) para a comunidade bentônica de fundo inconsolidado.

c) Contemplar a sazonalidade regional, com a realização de pelo menos duas campanhas, uma das quais no verão.

d) Caracterizar a natureza e estado ecológico dos habitats, parâmetros ecológicos (abundância, riqueza e biomassa), estrutura e composição das comunidades, variabilidade temporal, distribuição geográfica, espécies notáveis e espécies particularmente sensíveis à ressuspensão do sedimento.

e) Caracterizar a comunidade bentônica de fundo consolidado considerando a porcentagem de cobertura dos organismos incrustantes e zonação.

f) Identificar e geoespacializar habitats disponíveis para espécies invasoras potenciais ou sua presença.

g) Selecionar e determinar índice de qualidade ecológica do compartimento bentônico (p.ex. M-AMBI).

6.2.1.3. Ictiofauna

Este tópico visa caracterizar a natureza dos habitats e comunidades, o grau de sensibilidade aos impactos potenciais e estabelecer a linha de base para o monitoramento dos impactos sobre o grupo na Área de Influência Direta, com base em métricas ecológicas, e na Área de Influência Indireta, com base em estatísticas de pesca. Orienta-se a utilização, como referência, dos Planos de Ação Nacionais para conservação de Tubarões e Raias.

a) Propor malha amostral contemplando Área de Estudo e Área Controle.

b) Contemplar a sazonalidade regional, com a realização de pelo menos duas campanhas.

c) Caracterizar estrutura e composição das comunidades, uso de habitats, relações tróficas, parâmetros ecológicos (abundância, riqueza e biomassa), variabilidade sazonal e interanual (estatísticas pesqueiras).

d) Identificar espécies particularmente sensíveis aos ruídos.

e) Identificar, geoespacializar e descrever os locais de concentração de juvenis e adultos, berçários, rotas migratórias, áreas e períodos de reprodução e desova dos recursos pesqueiros, bem como das espécies importantes para manutenção dos estoques.

6.2.1.4. Tartarugas Marinhas

Este tópico tem como objetivo identificar a sobreposição das áreas afetadas pelo empreendimento

com áreas sensíveis para o táxon, visando à adoção das medidas preventivas e mitigadoras. Orienta-se a utilização, como referência, do “Guia de Licenciamento Tartarugas Marinhas” (ICMBio, 2017), Plano de Ação Nacional para conservação das tartarugas marinhas (ICMBio, 2011) e Instrução Normativa Ibama/ICMBio nº 01/2011.

a) Identificar, caracterizar e geoespacializar áreas sensíveis para cada espécie com ocorrência na AE: praias de desova, áreas de alimentação e rotas migratórias. No item 8. Análise dos Impactos, tais áreas devem ser relacionadas com as atividades de instalação e operação do empreendimento. Para a fase de instalação, relacionar com o tráfego de embarcações de apoio, iluminação e a emissão de ruídos (executar modelagem), especialmente aquelas associadas à implantação das fundações. Durante a fase de operação, devem ser considerados e mitigados os impactos associados à iluminação dos aerogeradores e subestação marítima, a geração de campos eletromagnéticos e a disponibilização de recursos alimentares junto às estruturas marítimas (efeito recife).

a’) A caracterização do uso da faixa de praia frontal ao empreendimento (acrescida de 5 km para cada lado) como área de nidificação de tartarugas marinhas, deve, minimamente, compreender o período entre setembro e março, e indicar: i) quais espécies a utilizam, ii) a frequência ao longo do período,, iii) a densidade de ninhos por km de praia e por temporada, e iv) a frequência de encalhes.

b) Indicar as espécies de tartarugas marinhas que ocorrem na Área de Estudo apresentando informações acerca: i) abundância e ii) sazonalidade, informando a metodologia utilizada (observações aéreas, embarcadas ou análise de imagens de alta definição).

6.2.1.5. Avifauna

Este tópico visa caracterizar a natureza dos habitats e comunidades, o grau de sensibilidade aos impactos potenciais e, além de subsidiar a definição do layout do projeto e medidas mitigadoras, estabelecer a linha de base para o monitoramento dos impactos sobre o grupo na Área de Estudo, com base em métricas ecológicas. Orienta-se a utilização, como referência, dos Planos de Ação Nacionais para conservação de Albatrozes e Petréis, Aves Marinhas e Aves Limícolas Migratórias. Ênfase deve ser dada às ordens Procellariiformes, Phaethontiformes, Charadriiformes e Suliformes, potencialmente mais impactadas pela tipologia eólica offshore. Atentar para a possibilidade do empreendimento estar localizado entre áreas de uso intenso de aves, como entre ilhas e continente ou entre ilhas.

a) Propor malha amostral contemplando a Área de Estudo para as aves marinhas e limícolas, e Área Controle marinha.

b) Contemplar a sazonalidade, com a realização de pelo menos quatro campanhas, e uso de dados de rastreamento disponíveis em bases abertas para consulta (*Birdlife Tracking Data base*).

b’) Caso inexistam dados confiáveis sobre rotas migratórias em escala local, deverão ser realizadas campanhas mensais ao longo de um ano.

c) Identificar e geoespacializar ambientes costeiros de importância acentuada para a avifauna limícola, informando o tipo de uso pelas aves e relacionando-o com o período do ano.

d) Realizar observações a partir de pontos fixos visando caracterizar a distribuição, riqueza e abundância da avifauna limícola e suas variações temporais.

e) Realizar observações a partir da costa, visando caracterizar a dinâmica de deslocamento da avifauna entre terra e mar.

e’) Realizar observações visando caracterizar a dinâmica de deslocamento da avifauna entre ilhas oceânicas e o continente, caso a área pretensa à instalação do empreendimento se localize entre estas áreas.

f) Caracterizar detalhadamente a distribuição, riqueza, abundância e suas variações temporais na área de estudo marinha. Dados devem ser oriundos de observações por especialistas, em transectos aéreos ou de barco, sendo fortemente estimulado o uso de imagens de alta resolução obtidas em voos de

baixa altitude (aeronaves ou VANTs). Para qualquer dos métodos, recomenda-se a otimização de recursos com a coleta simultânea de dados sobre aves, mamíferos marinhos e tartarugas marinhas.

g) Identificar e geoespacializar locais de reprodução, concentração e nidificação de aves marinhas.

h) Caracterizar os padrões de movimentação das aves, visando subsidiar a definição do *layout* dos aerogeradores e disponibilização de corredores, e de utilização do espaço aéreo nas diferentes faixas de altitude, visando identificar espécies e/ou grupos mais suscetíveis à colisão na área de varredura das pás. Apresentar estudos que tratam dos aspectos comportamentais e da altura de voo mais frequentes para as espécies identificadas como potencialmente mais impactadas, com ênfase nas ordens Procellariiformes, Phaethontiformes, Charadriiformes e Suliformes. Caso não existam estudos publicados para o grupo, obter dados primários por meio de métodos adequados.

i) Selecionar espécie(s) indicadora(s) para realização de diagnóstico e monitoramento espaço-temporal dos padrões de deslocamento e resposta ao empreendimento, caso sejam identificadas, por meio de avaliação prévia, a ocorrência de espécie(s) migratórias ou parcialmente migratórias, particularmente sensível(is) ou ameaçada(s), na área do projeto. O monitoramento deverá se estender por cinco anos, um durante o período de diagnóstico e os demais durante as fases de instalação e operação do empreendimento, caso confirmada sua viabilidade e implantação. Como métodos a serem empregados, recomenda-se, por exemplo, o uso de radar ou telemetria.

6.2.1.6. Quirópteros

Este tópico visa identificar a ocorrência do táxon na Área de Estudo, visando revelar o potencial de impacto e correspondentes ações preventivas e mitigadoras.

a) Propor malha amostral representativa da área de estudo, sugerindo-se, também, a disposição de pontos amostrais em transecto linear desde a linha de praia até o limite *offshore* do projeto, assim como na área costeira mais próxima ao parque eólico.

b) Identificar e geoespacializar uso de habitats e corredores migratórios, bem como parâmetros ecológicos (abundância e riqueza). Deverão ser coletados, ao longo de um ano e em campanhas trimestrais, dados de ocorrência *in loco*, utilizando monitoramento acústico passivo como fonte primária de dados.

6.2.1.7. Mamíferos Marinhos

Este tópico visa caracterizar a natureza dos habitats e comunidades, o grau de sensibilidade das populações frente aos ruídos e efeito barreira provocados pelas turbinas, trabalhos subaquáticos e embarcações, bem como respostas a alterações dos recursos tróficos. Com isto, deve subsidiar a definição do layout do projeto e medidas mitigadoras. Orienta-se a utilização, como referência, dos Planos de Ação Nacionais para conservação de Pequenos Cetáceos, Grandes Cetáceos e Pinípedes, Sirênios, Toninha e Instrução Normativa Ibama/ICMBio nº 02/2011.

a) Propor malha amostral contemplando a Área de Estudo.

b) Contemplar a sazonalidade, com a realização de pelo menos quatro campanhas.

c) Utilizar métodos de observação por transectos e acústica passiva. Estimula-se fortemente o uso de imagens de alta resolução obtidas em voos de baixa altitude (aeronaves ou VANTs), inclusive otimizando-se recursos por meio da coleta simultânea de dados sobre aves, mamíferos marinhos e tartarugas marinhas.

d) Identificar espacial e temporalmente áreas de concentração, reprodução, alimentação e rotas de migração de mamíferos marinhos, por espécie.

e) Descrever a estrutura das populações usando indicadores (diversidade, distribuição e abundância), caracterizando estatisticamente eventual variabilidade espaço-temporal.

f) Identificar as espécies potencialmente sensíveis em função de seus espectros de percepção auditiva e modelagem de emissão de ruídos, por frequência.

6.2.2. Meio terrestre

6.2.2.1. Fauna Terrestre

- a) Apresentar, por meio de revisão bibliográfica, a lista de espécies da fauna (peixes anuais, herpetofauna, avifauna e mastofauna) ocorrentes na AE, indicando as espécies constantes nas listas oficiais de fauna ameaçada (inclusive listas estaduais), as endêmicas, as raras, as de importância econômica e cinegética, as potencialmente invasoras, as migratórias com distribuição potencial na AE e aquelas que, devido ao seu comportamento, tem maior potencial de impacto com as estruturas do empreendimento a serem instaladas.
- b) Apresentar, com base na identificação dos habitats das espécies ameaçadas, em especial peixes anuais e mamíferos fossoriais, uma avaliação de áreas sensíveis, de modo a subsidiar a definição dos traçados preferenciais e medidas preventivas e mitigadoras. Caso identificadas áreas de potencial ocorrência de espécies ameaçadas pertencentes a estes grupos, ao longo do traçado preferencial da LT ou demais estruturas em terra, deverão ser obtidos dados primários na área diretamente afetada.
- c) Apresentar, com base na identificação dos ecossistemas atrativos de avifauna e das rotas migratórias, uma avaliação de áreas sensíveis, de modo a subsidiar a definição dos traçados preferenciais e a proposta de instalação de sinalizadores para a avifauna ao longo da LT aérea, bem como dimensionar o impacto sobre este grupo.
- d) Caracterizar a comunidade de quirópteros na faixa costeira, identificando e geoespacializando seus habitats e estimando parâmetros ecológicos (abundância e riqueza) a partir de monitoramento acústico.

6.2.2.2. Vegetação Terrestre

Este tópico visa caracterizar as formações vegetais potencialmente impactadas pela implantação do segmento terrestre da linha de transmissão e estruturas de apoio.

- a) Identificar e caracterizar, a partir de dados primários e secundários, os remanescentes florestais, incluindo aspectos florísticos, com vistas a determinar o estágio sucessional da vegetação. O levantamento qualiquantitativo deve incluir espécies arbóreas e arbustivas, devendo ser apenas qualitativo para subarbustivas, herbáceas, epífitas e lianas.
- b) Identificar e listar as espécies da flora, destacando as endêmicas, rupícolas, raras, ameaçadas de extinção, vulneráveis, de valores ecológico significativo, econômico, medicinal, alimentício e ornamental. Considerar a Portaria MMA nº 443/2014 e as listas regionais de flora ameaçadas, quando existentes.
- c) A identificação das espécies de interesse conservacionista deverá subsidiar um Programa de Salvamento de Germoplasma Vegetal, a ser delineado junto ao PGA, considerando a fenologia das espécies de ocorrência na área, obtida de dados secundários, visando o planejamento da coleta do material biológico viável (sementes, plântulas e germoplasma) para fins da recomposição florestal.
- d) Estimar as possíveis áreas de supressão de vegetação na ADA. O quantitativo real será exigido em etapa posterior, no âmbito do Inventário Florestal.
- e) Elaborar um mapa de vegetação atual, com indicação dos estágios de sucessão.
- f) Identificar, quantificar e geoespacializar, para ADA, as interferências com as Áreas de Preservação Permanente (APP) definidas pelo Código Florestal e suas alterações; Resoluções CONAMA e legislações estaduais.

6.3. Meio Socioeconômico

- a) Considerar, no diagnóstico do meio socioeconômico, o uso e ocupação do solo, os usos do espaço marinho, os usos e disponibilidade da água e a socioeconomia, destacando as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e a potencial utilização futura desses

recursos.

b) Caracterizar e analisar a condição socioeconômica e ambiental atual da área de abrangência do estudo, subsidiando a correta identificação e avaliação dos impactos socioambientais que possam ser causados pelo planejamento, implantação e operação do empreendimento, direta ou indiretamente.

c) Identificar os fluxos migratórios informando a origem regional, tempo de permanência no(s) município(s), possíveis causas de migração, especificando ofertas de localização, trabalho e acesso.

d) Propor metodologia para o Diagnóstico Socioambiental Participativo - DSAP previamente à sua execução, com enfoque nas colônias de pesca que navegam e desenvolvem suas atividades atualmente na área de influência direta.

e) Apresentar escala de vulnerabilidade socioambiental dos grupos afetados das áreas de influência direta e indireta, a partir de dados primários e secundários, de maneira a identificar os sujeitos/grupos prioritários da ação educativa do PEA, conforme orientações expressas no Guia para Elaboração dos Programas de Educação Ambiental no Licenciamento Ambiental Federal, aprovado pela Portaria Ibama nº 1.728, de 28/07/2020.

f) Utilizar, para a caracterização da Área de Estudo Regional, dados secundários mais recentes das instituições oficiais (IBGE, DATASUS - Ministério da Saúde, IPEA - Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas, Atlas de Desenvolvimento Humano, Governo do Estado, Prefeituras Municipais, entre outras), universidades e demais entidades locais e regionais que possibilitem a compreensão sobre os temas em questão, sendo complementados, quando necessário, com dados primários. Apresentar todos os indicadores solicitados com os respectivos comparativos com indicadores regionais, estaduais e nacionais.

6.3.1. Dinâmica Populacional

6.3.1.1. População

a) Identificar e geoespacializar os grupos sociais usuários da área costeira marinha, principalmente pescadores artesanais, coletores/catadores de moluscos e crustáceos, mergulhadores, ou comunidades e grupos sociais que dependam diretamente ou indiretamente das áreas marinhas para sua subsistência. Identificar se há e listar as estruturas organizacionais e representativas dos grupos comunitários. Identificar conflitos dos grupos identificados com outras atividades existentes na zona costeira.

b) Realizar pesquisa de opinião sobre a instalação do empreendimento nas comunidades direta e indiretamente afetadas.

6.3.1.2. Infraestrutura Básica e de Serviços

a) Caracterizar a condição, serviços e infraestrutura existente na região costeira do município da área de estudo, bem como as demandas em relação a serviços de: (i) lazer; (ii) coleta e tratamento de esgoto; (iii) abastecimento de água; (iv) educação e grau de ensino da população; (v) comunicação; (vi) saúde e doenças; (vii) segurança; (viii) coleta e destinação de resíduos sólidos; (ix) comercialização de produtos da pesca e mariscagem.

6.3.2. Dinâmica Econômica

a) Apresentar os seguintes indicadores: população economicamente ativa, taxa de desemprego municipal e índices de desemprego.

6.3.2.1. Atividades Produtivas

a) Identificar e geoespacializar a ocupação do espaço marinho pelas diversas atividades produtivas, incluindo a localização proposta para o empreendimento.

b) Apresentar caracterização da atividade pesqueira, identificando e geoespacializando as atividades e rotas pesqueiras realizadas na área de estudo, tanto de caráter industrial quanto artesanal.

c) A pescaria artesanal deve ser caracterizada com enfoque nas comunidades pesqueiras que utilizam a área de estudo como área de pesca ou para trânsito a partir da comunidade até as respectivas áreas de pesca, apresentando: (i) número total de pescadores; (ii) artes de pesca utilizadas e respectivas espécies alvo; (iii) caracterização e quantificação da frota de cada comunidade, classificando quanto ao tipo de pesca praticado e quanto às distâncias percorridas até as áreas de pesca; (iv) mapeamento das áreas de pesca de cada comunidade e respectivas rotas de trânsito; (v) caracterização e localização dos pontos de desembarque de pescado utilizados por comunidade, bem como da infraestrutura utilizada por comunidade para armação das pescarias (pontos de abastecimento de combustível; gelo; venda e manutenção de redes e outros petrechos utilizados, como linha e anzol, dentre outros; etc.) (vi) estimativa da produção anual por espécie alvo, por período, por tipo e por arte de pesca em cada comunidade. Apresentar indicadores econômicos relacionados à atividade (empregos, renda ou outros indicadores relevantes), além dos programas governamentais de promoção ou fomento, iniciativas ou articulações do setor privado.

d) Caracterizar a pesca não embarcada, em naufrágios e recifes artificiais, se houver, informando: (i) época do ano; (ii) frequência; (iii) métodos empregados; (iv) espécies-alvo; (v) contribuição para a produção total local; (vi) possíveis conflitos de uso do naufrágio.

e) Geoespacializar e caracterizar atividades de aquicultura, quando houver.

f) Geoespacializar e caracterizar atividade de coleta de mariscos, quando houver, informando: (i) época do ano; (ii) espécies-alvo; (iii) áreas de uso; (iv) características dos grupos sociais envolvidos.

g) Geoespacializar e caracterizar a atividade de mergulho e/ou pesca amadora, informando a existência de pesca submarina.

h) Caracterizar a atividade/potencial turístico, quando houver, apresentando: (i) indicadores econômicos relacionados à sua exploração (empregos, renda ou outros indicadores relevantes); (ii) época do ano; (iii) localização e descrição de atrativos turísticos; (iv) presença de esportes náuticos; (v) população flutuante e taxa de ocupação por época; (vi) programas governamentais de promoção, iniciativas ou articulações do setor privado; (vii) infraestrutura disponível; (viii) identificar proposta de atividades compatíveis com o empreendimento que possa ser desenvolvida.

i) Identificar e geoespacializar as rotas de navegação marítima, descrevendo volume de carga, dimensões das embarcações e relevância para a região.

6.3.2.2. Arrecadação Municipal

a) Apresentar dados de arrecadação tributária dos municípios da área de estudo, atualizados até no mínimo o exercício fiscal do ano anterior ao protocolo do estudo, e caracterizados por setor da economia local.

6.3.3. Dinâmica Territorial

a) Identificar e geoespacializar os aglomerados populacionais e equipamentos públicos (escolas, postos de saúde, entre outros) interceptados ou localizados no entorno das vias e estruturas terrestres de apoio, que serão utilizadas pelo empreendimento na fase de implantação.

b) Identificar e geoespacializar o uso do solo na faixa costeira terrestre perpendicular à poligonal marinha da Área de Estudo, discriminando as localidades com fins de habitação, turismo, lazer, áreas de uso comercial urbanas, poligonais portuárias e/ou de terminais privativos, e outros usos para a dinâmica territorial local.

c) Identificar a passagem de cabos de exportação em terra, caracterizando as atividades do entorno e identificando grupos/instituições afetadas.

6.3.4. Dinâmica Sociocultural

6.3.4.1. Patrimônios Históricos, Culturais e Arqueológicos

a) Identificar os sítios históricos, arqueológicos e/ou edificações de interesse cultural na Área de Estudo, considerando também os que se encontram em processo de tombamento no âmbito federal, estadual e municipal.

b) Identificar, caracterizar e contextualizar bens culturais imateriais, indicando as comunidades a eles associadas.

6.3.4.2. Comunidades Tradicionais

a) Apresentar mapeamento com a localização das comunidades indígenas, quilombolas e demais comunidades tradicionais, conforme definição do Decreto nº 6040, de 07 de fevereiro de 2007, contendo as distâncias entre as localidades identificadas e a ADA.

b) Apresentar resultado de reuniões públicas com participação das entidades representativas de pescadores artesanais da área de influência do empreendimento. Em casos julgados pertinentes, o IBAMA promoverá novas reuniões ou audiências públicas após o protocolo dos estudos.

6.3.5. Dinâmica da Paisagem

a) Caracterizar a paisagem por meio de análise da evolução do contexto geográfico e histórico da ocupação, nos últimos 50 anos, nos municípios da Área de Estudo.

b) Destacar os atributos físicos do litoral que tenham interface com a percepção do empreendimento na paisagem.

c) Apresentar pesquisa de percepção da interferência sobre a paisagem local e dos aspectos positivos e negativos do empreendimento, utilizando modelagem do impacto visual e simulações da paisagem nas áreas ocupadas e atrações turísticas *offshore*, sugerindo-se apresentação em mídia que permita simulação virtual do efeito de aproximação das torres.

6.4. Análise Integrada do Diagnóstico Ambiental

a) Destacar, de forma sintética, os temas ambientais sensíveis da região que foram identificados nos diagnósticos setoriais, tais como: existência de rotas migratórias ou áreas vitais para reprodução ou alimentação da fauna, relação entre o risco de colisão da avifauna e períodos de visibilidade reduzida ou outros eventos climatológicos extremos, existência de corredores ecológicos ou de fragmentos de vegetação de grande valor para a preservação da biodiversidade, presença de sedimentos contaminados, sensibilidade do tipo de fundo, existência de comunidades tradicionais, áreas de pesca, entre outros.

b) Realizar análise contendo as relações e interações entre os meios físico, biótico e socioeconômico levantados, enfatizando os temas ambientais sensíveis. Este item, portanto, não deve ser constituído por um agrupamento de informações levantadas em cada um dos meios.

c) Empregar técnicas de geoprocessamento na avaliação integrada das diferentes temáticas ambientais, de forma a produzir um Mapa de Fragilidade Ambiental para a Área de Estudo, tendo como base o Mapa de Identificação de Usos Múltiplos Preexistentes, acrescido dos dados pertinentes obtidos no diagnóstico. Tal Mapa deve subsidiar a avaliação de viabilidade do projeto, definição do *layout* e proposição de medidas preventivas e mitigadoras.

d) Apresentar os critérios para determinação dos pesos relativos de cada temática, tendo como foco os aspectos socioambientais.

e) Considerar, pelo menos, as seguintes camadas de informação na composição do Mapa de Fragilidade (em acréscimo àquelas pertinentes do Mapa de Identificação de Usos Múltiplos Preexistentes):

- Comunidade bentônica: habitats ricos, vulneráveis e pouco resilientes;
- Ictiofauna: áreas de reprodução, desova, berçário, abrigo e alimentação;

- Avifauna: áreas de alimentação, reprodução, nidificação, rotas migratórias e ocupação do espaço aéreo de risco;
- Mamíferos marinhos: áreas de alimentação, reprodução e rotas migratórias;
- Quelônios: áreas de alimentação, reprodução, nidificação e rotas migratórias;
- Pesca: áreas de pesca, coleta de mariscos, aquicultura, naufrágio, pontos de desembarque de pescado;
- Usos múltiplos: delimitação das áreas utilizadas para prática de esportes náuticos, turismo, pontos de atrativos turísticos.

7. ÓRGÃOS ENVOLVIDOS, QUANDO COUBER

7.1. Secretaria de Vigilância em Saúde

Quando a atividade ou o empreendimento localizar-se na Amazônia Legal ou em área definida pelo Ministério da Saúde como sendo de risco ou endêmicas para a malária, o Ibama deverá consultar a SVS sobre Minuta de TR.

7.2. Funai

Quando a atividade ou o empreendimento submetido ao licenciamento ambiental localizar-se em terra indígena ou apresentar elementos que possam ocasionar impacto socioambiental direto na terra indígena, o Ibama deverá consultar a Funai sobre Minuta de TR.

7.3. Incra

Quando a atividade ou o empreendimento submetido ao licenciamento ambiental localizar-se em terra quilombola ou apresentar elementos que possam ocasionar impacto socioambiental direto na terra quilombola, o Ibama deverá consultar o Incra sobre Minuta de TR.

7.4. Iphan

Quando a área de influência direta da atividade ou o empreendimento submetido ao licenciamento ambiental localizar-se em área onde foi constatada a ocorrência dos bens culturais acautelados referidos no inciso II do caput do art. 2º da Portaria Interministerial nº 60/2015, o Ibama deverá consultar o Iphan sobre Minuta de TR.

7.5. ICMBio

Quando a atividade ou empreendimento afetar Unidade de Conservação (UC) federal específica ou sua zona de amortecimento (ZA). Os estudos específicos sobre a UC deverão ser geoespacializados e contemplar a identificação, a caracterização e a avaliação dos impactos ambientais do empreendimento ou atividade que se relacionam com os objetivos e atributos principais de cada uma das unidades de conservação afetadas e sua ZA, incluídos os estudos espeleológicos no interior das unidades, bem como das respectivas propostas de medidas de controle e mitigadoras.

O ICMBio deverá ser consultado, conforme previsto na Resolução CONAMA nº 428/2010 e Instrução Normativa Conjunta nº 8/2019/ICMBio/Ibama.

Quando identificadas espécies ameaçadas de extinção e potencialmente afetadas pelo empreendimento, estas deverão ser listadas e relacionadas às ações dos respectivos Planos de Ação Nacional que possam ter interface positiva ou negativa com o empreendimento pretendido.

Caso o empreendimento seja adjacente a praias onde ocorre a desova de tartarugas marinhas, deverá ser consultado o Centro de Tartarugas Marinhas - TAMAR/ICMBio, conforme especificado na Resolução CONAMA nº 10/1996.

7.6. Órgãos Gestores de UC Estaduais ou Municipais

Quando a atividade ou empreendimento afetar Unidade de Conservação (UC) estadual ou municipal específica ou sua zona de amortecimento, os estudos específicos sobre a UC deverão ser geoespacializados e contemplar a identificação, a caracterização e a avaliação dos impactos ambientais do empreendimento ou atividade que se relacionam com os objetivos e atributos principais de cada uma das unidades de conservação afetadas e sua ZA, incluídos os estudos espeleológicos no interior das unidades, bem como das respectivas propostas de medidas de controle e mitigadoras.

8. ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

a) Identificar, descrever e avaliar sistematicamente os impactos ambientais gerados nas fases de planejamento, instalação, operação (normal e anormal associado a desvios operacionais, incidentes, acidentes etc) e desativação do empreendimento ou da atividade, considerando a integralidade do projeto, nos ambientes terrestre e marinho, suas alternativas, os horizontes de tempo de incidência dos impactos e indicando os métodos, técnicas e critérios adotados para sua identificação, quantificação e interpretação. A seguir são apresentados alguns exemplos de aspectos ambientais que normalmente são avaliados em empreendimentos desta tipologia. Relacionados a cada um deles, são apresentados alguns efeitos que devem ser estudados de maneira a subsidiar a listagem dos principais impactos de cada aspecto ambiental:

Aspecto	Efeito
Movimentação de embarcações	Efeitos sobre tartarugas e mamíferos marinhos, efeitos sobre as atividades pesqueiras.
Ruídos e vibrações	Efeitos comportamentais e fisiológicos sobre diferentes grupos da fauna, em especial peixes, mamíferos marinhos e tartarugas marinhas. Utilizar dados da modelagem de emissões sonoras nas diferentes fases do empreendimento, em combinação com o diagnóstico da ictiofauna, quelônios e mamíferos marinhos, para estimar os efeitos sobre as mesmas.
Aumento da turbidez	Efeitos sobre a comunidade de organismos planctônicos, nectônicos e bentônicos e cadeias tróficas, atividades recreativas e atividades pesqueiras
Alterações no leito do mar e da linha de costa	Efeito sobre comunidade bentônica, cadeias tróficas, erosão de praias e prejuízos a edificações.
Criação de substrato artificial	Efeito sobre a composição de espécies, possibilidade de novo recurso para estabelecimento de espécies exóticas ou invasoras.
Introdução e dispersão de espécies exóticas e invasoras	Efeitos sobre as populações de espécies nativas, considerando aspectos estabelecidos nos Planos Nacionais de Prevenção, Erradicação, Controle e Monitoramento de Espécies Exóticas Invasoras.
Iluminação artificial	Efeitos sobre aves, quirópteros, tartarugas marinhas e paisagem.
Criação de campos eletromagnéticos	Efeitos sobre a migração e movimentação de peixes (principalmente elasmobrânquios), tartarugas e mamíferos marinhos.
Geração de área de restrição ao uso	Interferência nas cadeias tróficas, atividades pesqueiras, turísticas, navegação e outros usos.
Presença dos aerogeradores e/ou movimentação das pás	Efeitos sobre a avifauna e quiropterofauna (mortalidade, efeito barreira, fragmentação, supressão e deslocamento de habitats), atividades turísticas e comunidades litorâneas. Estimar o impacto potencial das colisões de espécies sensíveis ou ameaçadas sobre suas populações, contemplando dados quantitativos. Utilizar, para tanto, modelagem de risco de colisão ou metodologia cientificamente aceita. Avaliar o efeito esperado sobre as comunidades litorâneas e o potencial turístico, utilizando modelagem do impacto visual e simulações da paisagem nas áreas ocupadas e atrações turísticas <i>offshore</i> . Sugere-se o uso de apresentação em mídia que permita simulação virtual do efeito de aproximação das torres.
Alteração nas características do vento (Efeito esteira)	Redução no potencial eólico das áreas contíguas.

Geração de empregos e impostos	Efeitos sobre as comunidades locais.
Geração de energia	Efeito sobre a disponibilidade e segurança energética.
Geração de resíduos	Efeitos sobre a qualidade da água e organismos vivos.

Ressalta-se que os aspectos ambientais sugeridos são exemplificativos, e não esgotam o leque de opções que deverá ser considerado, cabendo ao empreendedor a verificação dos aspectos, em função das especificidades do empreendimento e da área de estudo.

Caso haja necessidade de dragagem, deverá ser realizada modelagem matemática da dispersão da pluma de turbidez a ser gerada nos locais de dragagem e de disposição do sedimento dragado, tendo em vista a potencialidade de geração de impactos, com suas respectivas magnitudes.

b) Analisar os impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, por meio de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazos, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade; suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais.

c) Indicar níveis de incerteza dos impactos, com base na disponibilidade e qualidade dos dados do diagnóstico e experiência internacional sobre os impactos confirmados da tipologia eólica *offshore*.

d) Descrever os efeitos esperados das medidas mitigadoras previstas em relação aos impactos negativos, mencionando aqueles que não puderam ser evitados, e o grau de alteração esperado.

e) Identificar as medidas para evitar, minimizar e/ou remediar, sempre nesta ordem de prioridade, conforme a hierarquia da mitigação e a efetividade da medida, ao menos para os impactos negativos significativos, de modo a torná-los aceitáveis. Identificar as medidas potencializadoras para os impactos positivos importantes.

f) Propor medidas compensatórias para os impactos negativos remanescentes (aqueles resultantes da aplicação de medidas para evitar, minimizar e/ou remediar, ou para os quais não existem medidas mitigadoras aplicáveis, embora estejam dentro dos limites considerados aceitáveis, e que possam ter sua importância reduzida).

g) Apresentar tabelas para as diferentes etapas (planejamento, instalação, operação e desativação), na qual constem as atividades geradoras, os aspectos ambientais, os fatores ambientais afetados, uma descrição sintética de cada impacto ambiental e a medida preventiva, mitigadora ou compensatória indicada. Sugere-se organizar os impactos a partir dos componentes do projeto (p.ex. usina eólica, subestações, linha de transmissão).

h) A partir dos indicadores quantitativos ou qualitativos de magnitude escolhidos para cada impacto, para subsidiar a classificação do item "b" supra, propor os parâmetros máximos de ocorrência aceitável para cada impacto negativo, como balizas de tomada de decisão a serem consideradas quando da Conclusão sobre a viabilidade socioambiental do empreendimento.

8.1. Compensação Ambiental, prevista no SNUC

Deverá ser apresentado o Plano de Compensação Ambiental, conforme determinado pela Instrução Normativa Ibama nº 08/11, contendo:

- Informações necessárias para o cálculo do Grau de Impacto, de acordo com as especificações constantes no Decreto nº 6.848/2009 e Norma de Execução Ibama nº 1/2017; e
- Indicação das Unidades de Conservação a serem beneficiadas com os recursos da compensação ambiental ou proposta de criação de novas Unidades de Conservação, considerando o previsto no art. 33 do Decreto nº 4.340/2002, nos art. 9º e 10 da Resolução CONAMA nº 371/06 e as diretrizes e prioridades estabelecidas pela Câmara Federal de Compensação Ambiental.

9. ÁREA DE INFLUÊNCIA AMBIENTAL

- a) Definir os limites da área geográfica a ser direta ou indiretamente afetada pelos impactos, denominada área de influência do projeto, considerando, em relação ao componente terrestre, a bacia hidrográfica na qual se localiza.
- b) Identificar, caracterizar, georreferenciar e mapear os elementos determinantes para as delimitações das áreas de influência.
- c) Considerar na definição das áreas de influência os dados obtidos e a análise dos impactos.
- d) Apresentar, no formato *shapefile*, os limites das áreas de influência, por meio (físico/biótico/socioeconômico).
- e) Distinguir as áreas de influência como segue:

9.1. Área Diretamente Afetada (ADA)

Área onde será desenvolvida a atividade ou onde se localizam as estruturas do empreendimento, incluindo as estruturas acessórias (p.ex. canteiros de obras, alojamentos, áreas portuárias). Essa área não é definida a partir dos impactos.

9.2. Área de Influência Direta (AID)

Área sujeita aos impactos diretos, reais ou potenciais durante todas as fases do empreendimento/atividade, normalmente diferenciada para cada um dos meios considerados (biótico, físico e socioeconômico). A sua delimitação deverá ser em função do alcance dos impactos diretos do empreendimento sobre as características socioeconômicas, físicas e biológicas dos sistemas a serem estudados e das particularidades do empreendimento/atividade, incluindo obras complementares, tais como captação da água, estradas de acesso e acampamentos.

9.3. Área de Influência Indireta (AII)

Área sujeita aos impactos indiretos, reais ou potenciais, durante todas as fases do empreendimento/atividade, normalmente diferenciada para cada um dos meios considerados (biótico, físico e socioeconômico). A sua delimitação deverá ser em função do alcance dos impactos indiretos do empreendimento/atividade sobre as características socioeconômicas, físicas e biológicas dos sistemas a serem estudados e das particularidades do empreendimento/atividade.

10. ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL

As consequências do mau funcionamento do empreendimento podem ser mais significativas do que os impactos provocados durante o funcionamento normal do empreendimento. Nesse sentido é prevista a Análise de Risco Ambiental, que tem como objetivo a identificação dos principais riscos do empreendimento ao meio ambiente e à comunidade externa. Não é foco deste estudo, portanto, a identificação de riscos aos trabalhadores e ao patrimônio.

Os riscos ambientais podem ser do tipo natural (tempestades, raios, inundações, escorregamentos, assoreamento, entre outros), tecnológico agudo (explosões, vazamentos, entre outros), ou tecnológico crônico (mau funcionamento de estação de tratamento, entre outros).

A Análise de Risco Ambiental deverá incluir as seguintes etapas:

- Apresentar em mapa com resolução e escala adequadas a localização do empreendimento e suas unidades.
- Apresentar descrição sucinta e objetiva da área de influência, utilizando sempre que possível mapas, destacando: (i) dados meteoclimatológicos, (ii) corpos hídricos, (iii) áreas povoadas no entorno do empreendimento, (iv) áreas ambientalmente sensíveis ou protegidas, (v) atividades

econômicas e/ou extrativistas, entre outras, que podem ser afetadas em caso de acidente do empreendimento.

Fase de Instalação

- Descrever as atividades envolvendo manipulação de produtos perigosos, como por exemplo: armazenamento de óleo, abastecimento de maquinários, abastecimento de embarcações, retirada de resíduos oleosos, entre outros, correlacionando com as áreas indicadas no *layout* do empreendimento.
- Apresentar histórico de acidentes ambientais dos últimos 20 anos em empreendimentos similares. Para cada acidente envolvendo derramamento de produto perigoso, informar o volume total derramado, volume total recolhido, áreas atingidas e ações de resposta adotadas, caso essas informações estejam disponíveis.
- Listar os produtos perigosos manipulados e sua respectiva classificação ONU. A listagem deve incluir, dentre outros, combustíveis, mercadorias e resíduos, quando pertinentes. As Fichas de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQs dos produtos perigosos identificados devem ser encaminhadas em anexo digital.
- Descrever outras atividades desenvolvidas durante a instalação do empreendimento que podem apresentar riscos ao meio ambiente ou à comunidade externa.
- Apresentar Análise Preliminar de Perigos (APP), no formato de planilha, abrangendo tanto as falhas intrínsecas de equipamentos, de instrumentos e de materiais, como erros operacionais. Na APP deverão ser identificados os perigos, as causas e os efeitos (consequências).
- Classificar cada perigo em categorias de frequência e severidade conforme modelo a seguir.

Quadro 2 - Categorias de frequência de ocorrência dos perigos identificados

Categoria	Denominação	Descrição
A	Remota	Não é esperado ocorrer.
B	Improvável	Esperado ocorrer até uma vez.
C	Provável	Esperado ocorrer algumas vezes.
D	Frequente	Esperado ocorrer várias vezes.

Quadro 3 - Categorias de severidade dos perigos identificados

Categoria	Denominação	Descrição
A	Baixa	Contaminação junto à fonte de vazamento, volume inferior a 200 litros (um tambor), degradação natural ou limpeza manual local de substrato (material absorvente). Incômodo a membros da comunidade externa.
B	Média	Contaminação se espalha, mas permanece no interior da instalação ou nas suas imediações, volume de 200 a mil litros, degradação natural ou limpeza manual local (material absorvente). Lesões leves em membros da comunidade externa.
C	Alta	Contaminação espalha-se afastando-se da fonte do vazamento, atingindo áreas externas à instalação, volumes de mil a 8 mil litros, necessidade de realizar operação de contenção e recolhimento mecânico e manual e/ou limpeza das áreas afetadas. Lesões de gravidade moderada em membros da comunidade externa.
		Contaminação espalha-se, atingindo extensa área

D	Catastrófica	(baía, estuário, outro município), volumes acima de 8 mil litros, necessidade de realizar operação de contenção e recolhimento mecânico e manual e limpeza das áreas afetadas. Provoca mortes ou lesões graves em membros da comunidade externa.
---	--------------	---

- Elaborar matriz estabelecendo a relação entre a frequência e a severidade, com o objetivo de identificar o nível de risco, conforme modelo abaixo.

Quadro 4. Matriz de risco

		Frequência			
		A	B	C	D
Severidade	D	3	4	4	4
	C	2	3	4	4
	B	1	2	3	4
	A	1	1	2	3

Severidade	Frequência	Risco
A - Baixa	A - Remota	1 - Baixo
B - Média	B - Improvável	2 - Moderado
C - Alta	C - Provável	3 - Sério
D - Catastrófica	D - Frequente	4 - Crítico

- Apresentar planilha contendo os perigos identificados, sua classificação quanto à frequência, consequência e nível do risco, bem como as ações preventivas e/ou mitigadoras, que deverão ser detalhadas no Programa de Gerenciamento de Riscos.
- Apresentar conclusão considerando a tolerabilidade dos riscos detectados em função da sensibilidade socioambiental da área do empreendimento.

Fase de Operação

- Descrever as principais atividades relacionadas a fase de operação, indicando no *layout* do empreendimento os locais de realização das ações.
- Apresentar histórico de acidentes ambientais dos últimos 20 anos em empreendimentos similares. Para cada acidente envolvendo derramamento de produto perigoso, informar o volume total derramado, volume total recolhido, áreas atingidas e ações de resposta adotadas, caso essas informações estejam disponíveis.
- Descrever as operações envolvendo manipulação de produtos perigosos, como por exemplo: armazenamento de óleo, abastecimento de maquinários, abastecimento de embarcações, retirada de resíduos oleosos, entre outros, correlacionando com as áreas indicadas no *layout*.
- Descrever outras atividades desenvolvidas durante a operação do empreendimento que podem apresentar riscos ao meio ambiente ou à comunidade externa.
- Apresentar Análise Preliminar de Perigos (APP), no formato de planilha, abrangendo tanto as falhas intrínsecas de equipamentos, de instrumentos e de materiais, como erros operacionais. Na APP deverão ser identificados os perigos, as causas e os efeitos (consequências).
- Classificar cada perigo em categorias de frequência e severidade conforme as tabelas e figura apresentadas para a fase de instalação.
- Apresentar planilha contendo os perigos identificados, sua classificação quanto à frequência, consequência e nível do risco, bem como as ações preventivas e/ou mitigadoras, que deverão

ser detalhadas no Programa de Gerenciamento de Riscos.

- Apresentar conclusão considerando a tolerabilidade dos riscos detectados em função da sensibilidade socioambiental da área do empreendimento.
- Listar os produtos perigosos manipulados e sua respectiva classificação ONU. A listagem deve incluir, dentre outros, combustíveis, mercadorias e resíduos, quando pertinentes. As Fichas de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQs dos produtos perigosos identificados devem ser encaminhadas em anexo apenas em meio digital.

10.1 Gerenciamento de Riscos Ambientais e Atendimento a Emergências

Com base nos riscos identificados, deverá ser apresentada proposta do Programa de Gerenciamento de Riscos – PGR, incluindo a fase de instalação e operação do empreendimento. O PGR deverá conter, para cada fase, a descrição das atividades que envolvem os riscos identificados (ex: procedimentos para abastecimento de maquinários), as medidas preventivas para evitar o acidente (ex.: medidas para evitar que o combustível vaze durante o abastecimento) e o Plano de Emergência, com estrutura de resposta para atendimento aos cenários acidentais identificados. Caso o empreendimento seja viável, o PGR deverá ser detalhado em fase posterior.

11. PLANO DE GESTÃO AMBIENTAL

a) Apresentar, de forma conceitual, os planos, programas e medidas a serem adotados em todas as fases do empreendimento para evitar, atenuar ou compensar os impactos adversos e potencializar os impactos benéficos, indicando os fatores e parâmetros a serem considerados.

b) Propor programas de acompanhamento e monitoramento (impactos positivos e negativos), que utilizem indicadores predefinidos, com o objetivo de verificar a eficácia das medidas e a ocorrência do impacto, bem como estabelecer as ações a serem tomadas. Preliminarmente, é indicada a apresentação dos seguintes programas, destacando-se que essa lista deve ser ampliada com os programas que atenuem ou compensem os impactos identificados na análise do EIA:

Programas Ambientais		Subprogramas	Fase de execução	
			Instalação	Operação
1	Plano Ambiental de Construção	Acessos, Segurança e Sinalização	x	
		Atendimento de emergência	x	
		Boas práticas construtivas	x	
		Controle de emissões atmosféricas	x	
		Controle de processos erosivos e assoreamento	x	
		Controle de ruídos e vibrações	x	
		Controle da fotopoluição	x	
		Desmobilização de mão de obra	x	
		Gerenciamento de resíduos sólidos e efluentes	x	
		Gestão e controle do tráfego de embarcações	x	
		Minimização de supressão de vegetação	x	
		Prevenção da contaminação do solo e água	x	
	Outros	x		
2	Programa de Gestão de Resíduos Sólidos e Efluentes			x
3	Programa de Monitoramento de Ruídos e Vibrações	x	x	
4	Programa de Recuperação de Áreas Degradadas	x		
5	Afugentamento e Salvamento de Fauna	x		
6	Projeto de Prevenção e Controle de Espécies Exóticas	x		x
		Bentos	x	x
		Peixes	x	x

7	Programa de Monitoramento da Biota	Tartarugas marinhas	x	x
		Aves	x	x
		Morcegos	x	x
		Mamíferos marinhos	x	x
8	Programa de Comunicação Social		x	x
9	Programa de Educação Ambiental	Componente I – Grupos sociais da área de influência	x	x
		Componente II – PEAT (Trabalhadores)	x	x
10	Programa de Gerenciamento de Riscos / Plano Ação de Emergência			x

12. CONCLUSÃO

a) Caracterizar a qualidade ambiental futura da área de influência, comparando as diferentes situações da adoção do projeto e suas alternativas, bem como com a hipótese de sua não realização e considerando a proposição ou a existência de outros empreendimentos na região.

b) Indicar de forma clara, objetiva e imparcial, com enfoque nos impactos ambientais significativos, se, a partir dos estudos e implementação dos programas e medidas pelo empreendedor, o empreendimento/atividade possui ou não viabilidade ambiental.

A conclusão não deverá considerar ações e medidas de terceiros para fins de atestar a viabilidade ambiental do empreendimento/atividade.

13. REFERÊNCIAS

a) Listar as referências utilizadas para a realização dos estudos, de acordo com as normas vigentes da ABNT.

14. GLOSSÁRIO

a) Listar os termos técnicos utilizados no estudo com respectivos significados.

15. RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL – RIMA

a) Apresentar o Rima de forma objetiva e adequada a sua compreensão. As informações devem ser traduzidas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que se possam entender as vantagens e desvantagens do projeto, bem como todas as consequências ambientais de sua implementação. Seu conteúdo mínimo é determinado no art. 9º da Resolução Conama 01/1986.



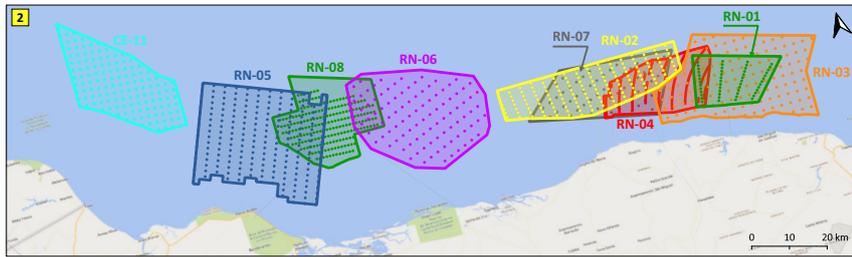
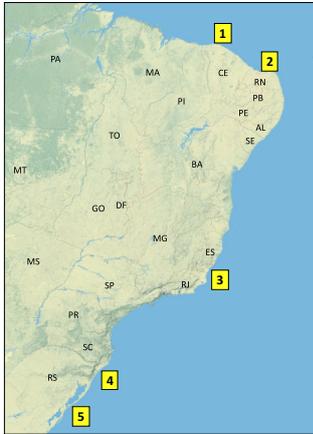
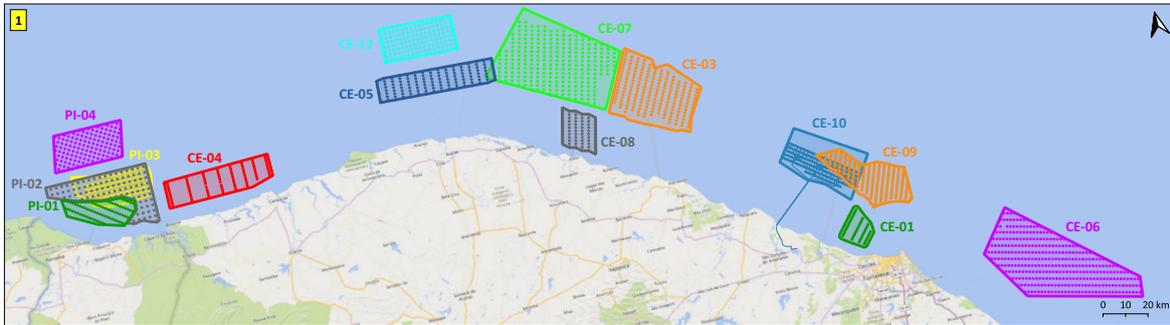
Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO WAGNER DA SILVA, Chefe de Divisão**, em 24/09/2020, às 14:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ibama.gov.br/autenticidade>, informando o código verificador **8432181** e o código CRC **612F0D92**.

**ANEXO B – PROCESSOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE EÓLICAS
OFFSHORE ABERTOS NO IBAMA ATÉ 20 DE ABRIL DE 2022**

O documento PDF anexado traz um compilado de informações sobre os projetos eólicos offshores com licenciamento ambiental aberto no IBAMA até dia 20 de abril de 2022.

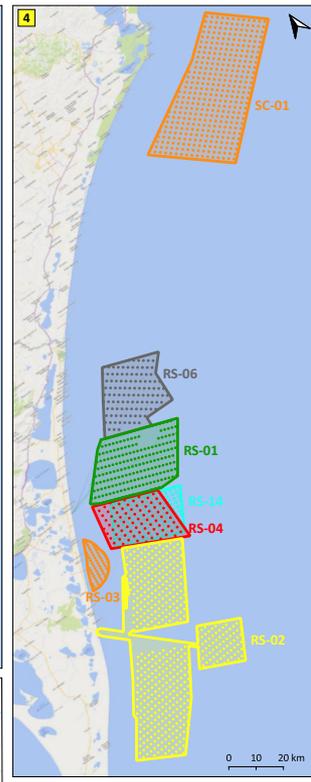
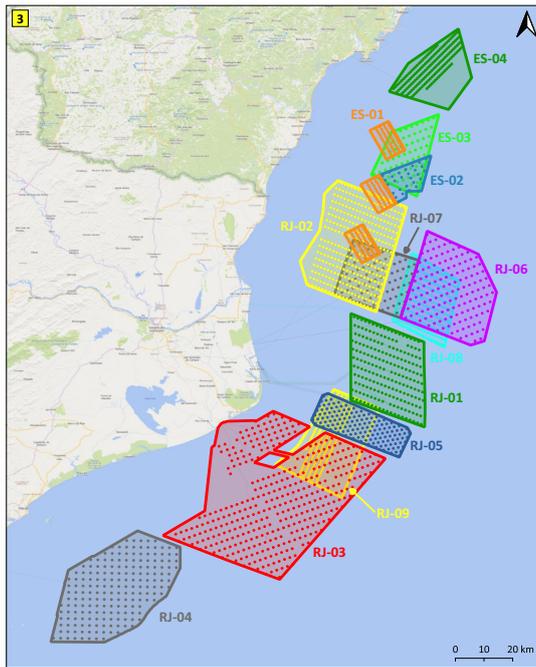


IBAMA Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
Diretoria de Licenciamento
DENE / COHID / CGTEF

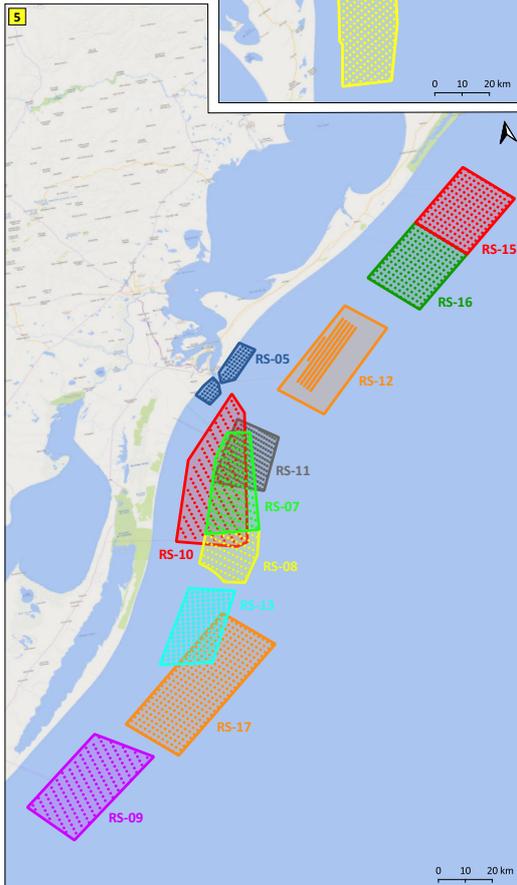
COMPLEXOS EÓLICOS OFFSHORE

PROJETOS COM PROCESSOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL ABERTOS NO IBAMA

Atualização: 20 de abril de 2022



Código	Empreendimento	Empreendedor	Processo	Data FCA	Aerogerador	Pot.Unid.(MW)	Quant.	Pot.Tot.(MW)
CE-01	Caucaia - Bi Energia	Bi Energia Ltda	02001.003915/2016-68	10/08/2016	Haliade-X	12	48	576
CE-03	Jangada	Neoenergia Renováveis SA	02001.035371/2019-46	27/01/2020	WTG-15.0-246	15	200	3.000
CE-04	Camocim	Camocim Eireli	02001.015445/2020-61	06/07/2020	Haliade-X	12	100	1.200
CE-05	Dragão do Mar	Qair Marine Brasil	02001.015184/2021-61	22/07/2021	MH Vestas 174	9,5	128	1.216
CE-06	Alpha	Alpha Wind Morro Branco	02001.018580/2021-40	01/09/2021	V236-15MW	15	400	6.000
CE-07	Costa Nordeste	Geradora Eólica Brigadeiro I	02001.001545/2022-72	21/01/2022	V236-15.0MW	15	256	3.840
CE-08	Asa Branca I	Eólica Brasil	02001.001606/2022-00	23/01/2022	VESTAS V236	15	72	1.080
CE-09	Sopros do Ceará	Totalenergias Petroleo&Gas	02001.004068/2022-05	17/02/2022	V236-15.0 MW	15	200	3.000
CE-10	Projeto Pecém	Shell Brasil	02001.006219/2022-51	16/03/2022	SG-14-222-DD	14	215	3.010
CE-11	Projeto Colibri	Equinor Brasil Energia	02001.008207/2022-61	05/04/2022	Turbog.15 MW	15	134	2.010
CE-12	Projeto Ibitucatu	Equinor Brasil Energia	02001.008209/2022-51	05/04/2022	Turbog.15 MW	15	134	2.010
ES-01	Votu Winds	Votu Winds	02001.029651/2020-59	28/12/2020	SG 10.0-193DD	10	144	1.440
ES-02	Vitória Offshore	Geradora Eólica Brigadeiro II	02001.001043/2022-11	14/01/2022	V236-15.0MW	15	33	495
ES-03	Quessnela	Bluefloat Energy do Brasil	02001.001549/2022-51	21/01/2022	WEC 265 20MW	20	62	1.240
ES-04	Projeto Ubu	Shell Brasil	02001.006228/2022-42	16/03/2022	SG-14-222-DD	14	180	2.520
PI-01	Vento Tupi	Ventos do Atlântico	02001.000178/2021-17	05/01/2021	NGT236	13,5	74	999
PI-02	Palmas do Mar	Bosford Participações	02001.007423/2021-17	13/04/2021	V236-15MW	15	93	1.395
PI-03	Projeto Piauí	Shell Brasil	02001.006221/2022-17	16/03/2022	SG-14-222-DD	14	180	2.520
PI-04	Projeto Mangará	Equinor Brasil Energia	02001.008210/2022-85	05/04/2022	Turbog. 15 MW	15	134	2.010
RJ-01	Maravilha	Neoenergia Renováveis SA	02001.035364/2019-44	04/04/2022	V236-15.0 MW	15	200	3.000
RJ-02	Aracatu	Equinor Brasil Energia	02001.019115/2020-45	20/08/2020	Não definido	12	320	3.840
RJ-03	Ventos do Atlântico	Ventos do Atlântico	02001.000230/2021-27	06/01/2021	NGT236	13,5	371	5.008
RJ-04	Ventos Fluminenses	Bosford Participações	02001.007463/2021-51	13/04/2021	V236-15MW	15	188	2.820
RJ-05	Ventos do Agu	Prumo Logística	02001.016348/2021-77	06/08/2021	IEA Wind 15-MW	15	144	2.160
RJ-06	Quaresmeira	Bluefloat Energy do Brasil	02001.001542/2022-39	21/01/2022	WEC 265 20MW	20	148	2.960
RJ-07	Bromélia	Bluefloat Energy do Brasil	02001.000215/2022-78	28/01/2022	WEC 265 20MW	20	85	1.700
RJ-08	Sopros do RJ	Totalenergias Petroleo&Gas	02001.004044/2022-48	17/02/2022	V236-15.0 MW	15	200	3.000
RJ-09	Projeto Agu	Shell Brasil	02001.006223/2022-10	16/03/2022	SG-14-222-DD	14	215	3.010
RN-01	Pedra Grande	Pedra Grande	02001.007228/2020-14	30/11/2020	Haliade-X	12	52	624
RN-02	Maril	Ventos do Atlântico	02001.000036/2021-41	04/01/2021	NGT236	13,5	149	2.011
RN-03	Alcides Pitagueres	Bosford Participações	02001.007450/2021-81	13/04/2021	V236-15MW	15	123	1.845
RN-04	Ventos Potiguar	Internacional Energias	02001.008803/2021-54	03/05/2021	Haliade-X	12	207	2.484
RN-05	Bela	Bela Wind Energias	02001.018349/2021-56	30/08/2021	V236-15MW	15	200	3.000
RN-06	Água Mansinha	Bluefloat Energy do Brasil	02001.001543/2022-83	21/01/2022	WEC 265 20MW	20	85	1.700
RN-07	Catlejo	Bluefloat Energy do Brasil	02001.001548/2022-14	21/01/2022	WEC 265 20MW	20	59	1.180
RN-08	Projeto Calhous	Shell Brasil	02001.006459/2022-56	17/03/2022	SG-14-222-DD	14	215	3.010
RS-01	Águas Claras	Neoenergia Renováveis SA	02001.035351/2019-75	10/12/2019	WTG-15.0-246	15	200	3.000
RS-02	Ventos do Sul	Ventos do Atlântico	02001.000176/2021-10	05/01/2021	NGT236	13,5	482	6.507
RS-03	Tramandai Offshore	Ventos do Atlântico	02001.000177/2021-64	05/01/2021	NGT236	13,5	52	702
RS-04	Ventos Litorâneos	Bosford Participações	02001.007465/2021-40	13/04/2021	V236-15MW	15	83	1.245
RS-05	Bravo Vento	SPE Bravo Vento	02001.018521/2021-71	01/09/2021	V236-15 MW	15	77	1.155
RS-06	Quarta Offshore	Geradora Eólica Brigadeiro III	02001.001399/2022-85	19/01/2022	V236-15.0MW	15	112	1.680
RS-07	Cassino Offshore	Geradora Eólica Brigadeiro IV	02001.001427/2022-64	20/01/2022	V236-15.0MW	15	128	1.920
RS-08	Rio Grande Offshore	Geradora Eólica Brigadeiro V	02001.001470/2022-20	20/01/2022	V236-15.0MW	15	80	1.200
RS-09	Amazonita	Bluefloat Energy do Brasil	02001.001540/2022-40	21/01/2022	WEC 265 20MW	20	150	3.000
RS-10	Turmalina	Bluefloat Energy do Brasil	02001.001541/2022-94	21/01/2022	WEC 265 20MW	20	159	3.180
RS-11	Sopros do RS	Totalenergias Petroleo&Gas	02001.004065/2022-63	17/02/2022	V236-15.0 MW	15	200	3.000
RS-12	Projeto White Shark	Shell Brasil	02001.006451/2022-90	17/03/2022	SG-14-222-DD	14	215	3.010
RS-13	Projeto Altabá	Equinor Brasil Energia	02001.008206/2022-17	05/04/2022	Turbog.15 MW	15	166	2.490
RS-14	Projeto Ibituaçu	Equinor Brasil Energia	02001.008208/2022-14	05/04/2022	Turbog.15 MW	15	134	2.010
RS-15	Península Wind	SPE Bravo Vento	02001.008966/2022-24	14/04/2022	V236-15 MW	15	180	2.700
RS-16	Tecnolift Wind	SPE Bravo Vento	02001.008975/2022-15	14/04/2022	V236-15 MW	15	180	2.700
RS-17	Marine Vórtice WOS	SPE Bravo Vento	02001.008977/2022-12	14/04/2022	V236-15 MW	15	348	5.220
SC-01	Fareol Wind Power	SPE Bravo Vento	02001.009129/2022-12	18/04/2022	V236-15 MW	15	380	5.700
						TOTALS	9.074	133.333



* Polígono (conforme definida na Ficha de Caracterização da Atividade - FCA) parcial ou totalmente sobreposta à polígono de empreendimento com FCA mais antiga.

ANEXO C – MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

O documento PDF anexado traz a tabela completa de métodos de produção de hidrogênio verde, especificando a fonte de energia verde e uma descrição do processo de conversão.

Fonte:(DINCER, 2012) - Adaptado e Traduzido pela Autora

Métodos de produção e processos de conversão de energia para gerar “Hidrogênio Verde”.

Método de produção de Hidrogênio	Fonte de energia verde	Processo de conversão	
Eletrólise (Energia verde com eletricidade gerada por eletrólise da água) ou decomposição de arco de plasma	Solar	Usina fotovoltaica ou usina solar concentrada para gerar eletricidade.	
	Geotérmica	Usina (Ciclo de Rankine Orgânico, Ciclo Flash etc).	
	Biomassa	Usina de biomassa, máquinas de combustão interna, plantas de célula a combustível.	
	Vento	Usina de energia eólica (conectada à rede ou autônoma).	
	Calor do oceano	Plantas de conversão de energia termal dos oceanos.	
	Outras renováveis	Marés, correntes no oceano e energia das ondas convertidas em eletricidade.	
	Nuclear	Usinas nucleares.	
	Reforma	Gás de aterros queimados em geradores a diesel. Industrial/outra reforma térmica usada para ciclo Rankine ou outras máquinas térmicas. Incineração com poluentes capturados da usina de Rankine.	
Termólise	Solar	Calor solar concentrado usados para gerar vapor a altas temperaturas.	
Termo catálise	Craqueamento de H2S	Solar	Calor solar concentrado usado para acionar processos a altas temperaturas.
		Biomassa	Combustão de biomassa de baixo grau gerar o calor do processo.
		Reforma	Combustão de gás de aterros, recuperação de calor industrial de alta temperatura
	Biomassa convencional	Solar	O calor solar concentrado em alta temperatura conduz o processo.
Biomassa		Auto processo térmico: calor da reação vem da combustão de biomassa.	
Processos termoquímicos	Divisão de água	Solar	A radiação solar concentrada gera calor de alta temperatura.
		Geotérmica	A geotérmica gera eletricidade para acionar bombas de calor de alta temperatura.
		Biomassa	A biomassa seca é queimada para gerar calor de alta temperatura.
		Nuclear	Energia elétrica nuclear usada para acionar bombas de calor de alta temperatura.
	Gaseificação	Reforma	Combustão de gás de aterro sanitário.
		Solar	O calor solar concentrado em alta temperatura conduz o processo.
	Reforma de combustível	Biomassa	Auto processo térmico: calor da reação vem da combustão de biomassa.
		Solar	O calor solar concentrado em alta temperatura conduz o processo.
	Divisão de	Biocombustíveis	Auto processo térmico: calor da reação vem da combustão de biomassa.
		Solar	O calor solar concentrado em alta temperatura conduz o processo.
		Geotérmica	O calor geotérmico de alta temperatura a ~200 ° C impulsiona o processo.
		Biomassa	A combustão de biomassa de baixo teor gera o calor do processo.
	Reforma	Combustão de gás de aterro sanitário, recuperação de calor industrial de alta temperatura.	
Módulos fotovoltaicos - Eletrólise	Solar	A radiação solar gera eletricidade através de painéis fotovoltaicos.	
Foto catálise	Solar	UV e radiação solar visível do espectro superior conduzem o processo.	
Foto eletroquímico	Solar	Todo o espectro solar usado pela célula foto eletroquímica.	
Bio fotólise	Solar	Todo o espectro solar pode ser usado.	
Fermentação escura	Biomassa	Os reatores de biogás são usados para fermentação escura para gerar hidrogênio.	
Enzimática	Biomassa	Polissacarídeos são manipulados por enzimas especiais para extrair hidrogênio.	
Eletrólise de altas temperaturas	Solar	A energia solar concentrada gera alta temperatura, calor e eletricidade.	
	Geotérmica	Eletricidade geotérmica acoplada a bombas de calor de alta temperatura.	
	Biomassa	A combustão de biomassa gera energia e calor de alta temperatura.	
	Nuclear	Energia nuclear usada para gerar eletricidade e calor de alta temperatura.	
	Reforma	A energia recuperada gera eletricidade e calor de alta temperatura.	
Ciclo termoquímico híbrido	Solar	A energia solar concentrada gera alta temperatura, calor e eletricidade.	
	Geotérmica	Eletricidade geotérmica acoplada a bombas de calor de alta temperatura.	
	Biomassa	A combustão de biomassa gera energia e calor de alta temperatura.	
	Nuclear	Energia nuclear usada para gerar eletricidade e calor de alta temperatura.	
Reforma	A energia recuperada gera eletricidade e calor de alta temperatura.		
Foto eletrólise	Solar	Módulos fotovoltaicos ou usinas solares concentradas + eletrólise imersas com foto eletrodos.	
Digestão termoflúca	Biomassa + outro	Energia de biomassa impulsiona o processo; Recuperação de calor ou solar fornece calor.	
Bio fotólise	Biomassa + solar	Biomassa + energia fotônica impulsiona o processo.	
Foto fermentação	Biomassa + solar	Biomassa + energia fotônica impulsiona o processo.	
Fotossíntese artificial	Solar	A energia solar impulsiona diretamente o processo de geração de hidrogênio.	

ANEXO D – DATASHEET ENERCON E-126 [7.5MW]

O documento anexado traz informações mais detalhadas sobre a turbina Enercon E-126 [7.5MW].

Fonte:(ENERCON, c2022)

Enercon E-126 7.580

Start / Turbines / Enercon / E-126 7.580

[Pictures](#)

[Datasheet](#)

[Power curve](#)

[Marketplace](#)

[Service](#)

[Models](#)

7,58 MW



- ✓ Power data
- ✓ 151 Pictures
- ✗ Models

Datasheet

Power

Rated power:	7,580.0 kW
Flexible power ratings:	-
Cut-in wind speed:	3.0 m/s
Rated wind speed:	16.5 m/s
Cut-out wind speed:	34.0 m/s
Survival wind speed:	-
Wind zone (DIBt):	III
Wind class (IEC):	Ia

Rotor

Diameter:	127.0 m
Swept area:	12,668.0 m ²
Number of blades:	3
Rotor speed, max:	12.1 U/min
Tipspeed:	80 m/s
Type:	-
Material:	GFK
Manufacturer:	Enercon
Power density 1:	598.4 W/m ²
Power density 2:	1.7 m ² /kW

Gear box

Type:	with out. direct drive
Stages:	-
Ratio:	-
Manufacturer:	-

Generator

Type:	Synchronous
Number:	1.0
Speed, max:	12.1 U/min
Voltage:	690.0 V
Grid connection:	IGBT
Grid frequency:	50.0 Hz
Manufacturer:	Enercon

Tower

Hub height:	135.0 m
Type:	concrete
Shape:	conical
Corrosion protection:	painted
Manufacturer:	Enercon

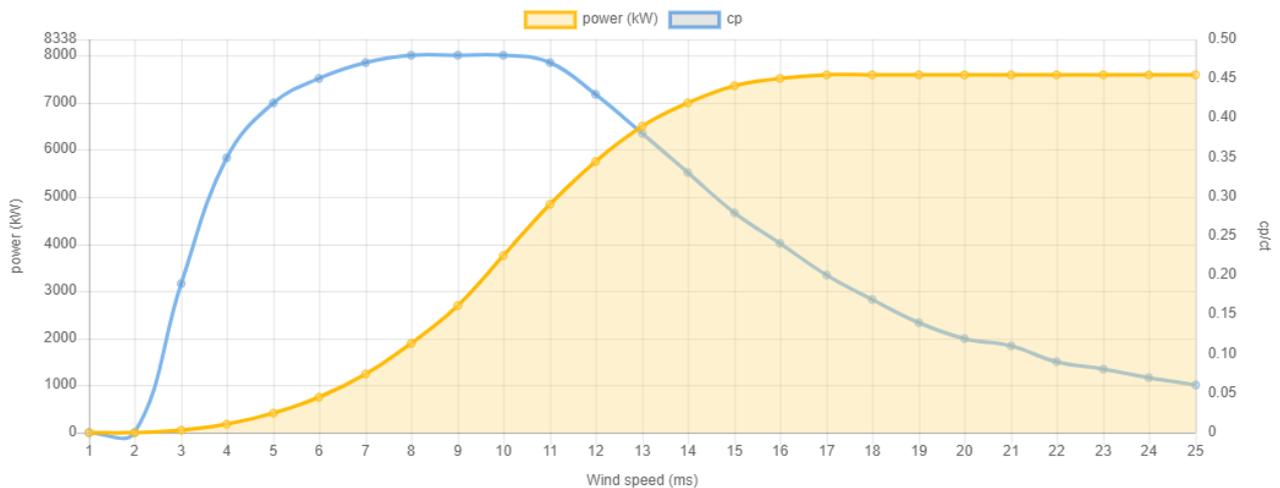
Weight

Single blade:	-
Hub:	-
Rotor:	-
Nacelle:	-
Tower, max:	-
Total weight:	-

Miscellaneous

Installation:	-
Offshore:	No
Onshore:	Yes

Power curve



Description

The wind turbine E-126 7.580 is a production of [Enercon GmbH](#), a manufacturer from Germany. This manufacturer has been in business since 1984.

The rated power of Enercon E-126 7.580 is 7,58 MW. At a wind speed of 3,0 m/s, the wind turbine starts its work. the cut-out wind speed is 34,0 m/s.

The rotor diameter of the Enercon E-126 7.580 is 127,0 m. The rotor area amounts to 12.668,0 m². The wind turbine is equipped with 3 rotor blades. The maximum rotor speed is 12,1 U/min.

The Enercon E-126 7.580 is fitted with a with out. direct drive gearbox.

In the generator, Enercon GmbH sets to Synchronous. The manufacturer has used one generator for the E-126 7.580. The maximum speed of the generator is 12,1 U/min. The voltage amounts to 690,0 V. At the mains frequency, the E-126 7.580 is at 50,0 Hz.

In the construction of the tower, the manufacturer uses concrete. As corrosion protection for the tower Enercon focuses on painted. Manufacturer of the tower is Enercon.

We have [151 pictures](#) of this wind turbine. There are no models for this wind turbine. We have power data on the E-126 7.580 from the Enercon in the system. You can see the powercurve in the [diagram](#) above.

The Enercon E-126 7.580 has been listed since 22.08.2011. The last modification of the master data was made on 26.04.2015.

**ANEXO E – PADRÃO DE CONSUMO HORÁRIO NO ANO DE 2021 PARA O PRÉDIO
ADMINISTRATIVO DA ZPE**

Fonte: (SEINFRA) - Elaborado pela autora.

Horário/Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
00:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
01:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
02:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
03:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
04:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
05:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
06:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
07:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
08:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
09:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
10:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
11:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
12:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
13:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
14:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
15:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
16:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
17:00	55.7371	75.3866	60.2024	69.9858	68.8345	66.5425	66.3148	68.4648	68.2658	71.4731	70.4283	67.7116
18:00	34.0484	46.5268	35.1532	48.7083	43.0806	43.1333	42.0645	43.5645	38.9083	46.3145	44.1583	41.3065
19:00	34.0484	46.5268	35.1532	48.7083	43.0806	43.1333	42.0645	43.5645	38.9083	46.3145	44.1583	41.3065
20:00	55.7371	75.3866	60.2024	69.9858	68.8345	66.5425	66.3148	68.4648	68.2658	71.4731	70.4283	67.7116
21:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
22:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167
23:00	77.4258	104.2464	85.2516	91.2633	94.5883	89.9517	90.5650	93.3650	97.6233	96.6317	96.6983	94.1167