



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

Christian Pereira Felicidade

**Projeto de Instalação de uma Usina de Hidrogênio Verde:** Produção com Energia  
Eólica e Potencial de Exportação Através da Amônia

Florianópolis  
2024

Christian Pereira Felicidade

**Projeto de Instalação de uma Usina de Hidrogênio Verde: Produção com Energia Eólica e Potencial de Exportação Através da Amônia**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico com habilitação em Engenharia de Produção.  
Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Caroline Rodrigues Vaz, Dra.

Florianópolis  
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Felicidade, Christian Pereira

Projeto de Instalação de uma Usina de Hidrogênio Verde :  
produção com energia eólica e potencial de exportação através  
da amônia / Christian Pereira Felicidade ; orientadora,  
Caroline Rodrigues Vaz, 2024.

127 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis,  
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Usina. 3. Energia  
Eólica. 4. Hidrogênio Verde. 5. Exportação. I. Vaz, Caroline  
Rodrigues. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. III. Título.

Christian Pereira Felicidade

**Projeto de Instalação de uma Usina de Hidrogênio Verde:** Produção com Energia Eólica e Potencial de Exportação Através da Amônia

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico com habilitação em Engenharia de Produção e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Produção Mecânica.

Florianópolis, 20 de Dezembro de 2024

---

Coordenação do Curso

**Banca Examinadora**

---

Prof.(a) Caroline Rodrigues Vaz, Dra.  
Orientadora

---

Prof. Diego de Castro Fettermann, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Mônica Abreu, Dra.  
Universidade Federal do Ceará

Florianópolis, 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre ter atendido às minhas orações e me sustentado de pé nos momentos mais difíceis da graduação.

À minha mãe, Michele Pereira, que me inspira todos os dias com sua determinação e capacidade de dar a volta por cima, independentemente da situação, sempre me tratando com amor e carinho. Agradeço por me ensinar que se vive um dia de cada vez, sempre exercendo o meu melhor em cada um deles.

Ao meu pai, Cláudio da Silva Felicidade, por nunca medir esforços para me ajudar. Agradeço por todo o sustento financeiro e também por me ensinar que, independentemente do caminho, quando se coloca esforço, determinação e amor, tudo prospera.

Ao meu irmão, Leonardo Pereira Felicidade, por ter me acompanhado lado a lado na graduação. Mesmo fazendo um curso diferente, sempre tentou cursar matérias junto a mim. Saiba que todo o esforço que despendemos juntos e todas as noites mal dormidas estão retornando resultados acima do que esperávamos.

À minha irmã, Beatriz Pereira Felicidade, que, mesmo sendo criança, me lembrou de que a vida precisa ser aproveitada de forma alegre. Espero estar sendo um bom exemplo para você ao me tornar engenheiro.

À minha namorada, Laís Silva Reis, por sempre me apoiar e me motivar, mantendo-me convicto em meus objetivos, dando-me forças para continuar e ser uma pessoa melhor a cada dia. Espero ter o privilégio de fazer o mesmo em sua trajetória.

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Caroline Rodrigues Vaz, por sempre acreditar que eu conseguiria. Agradeço pelos conhecimentos ensinados, pela paciência e pela prontidão durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pela excelência no ensino e pela infraestrutura, que contribuíram significativamente para o enriquecimento dos meus conhecimentos.

## RESUMO

Em um cenário global de crescente demanda por energias renováveis e descarbonização, o presente estudo propôs o projeto de uma usina de hidrogênio verde no Brasil, visando a exportação através da conversão do hidrogênio em amônia, utilizando energia eólica *offshore* como fonte primária. A metodologia empregada consistiu na elaboração de um *layout* otimizado por meio da aplicação da técnica *Systematic Layout Planning* (SLP), considerando critérios técnicos, econômicos e logísticos, em conjunto com análises de custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX), e simulações computacionais no *software AnyLogic* para validação da viabilidade do projeto. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica e econômica da usina, com índice de eficiência de *layout* de 85,71%, ocupando uma área total de 175.182 m<sup>2</sup> em instalações terrestres e 457 km<sup>2</sup> em área marítima para o parque eólico *offshore*, com tempo de retorno do investimento (*payback*) projetado entre 14 e 15 anos, mesmo considerando um investimento inicial de 20,5 bilhões de dólares. A localização estratégica da usina, próxima ao Porto de Pecém, associada à utilização de tecnologias de ponta, garante a competitividade do projeto no mercado internacional de exportação de hidrogênio verde. Este estudo contribui significativamente para o desenvolvimento de projetos de hidrogênio verde no Brasil, proporcionando um modelo metodológico replicável e sistemático para futuras pesquisas e fornecendo subsídios técnicos e econômicos para a implementação de projetos de grande escala, com impactos positivos na descarbonização da matriz energética, no desenvolvimento da economia local e no posicionamento estratégico do Brasil como um dos principais exportadores globais de energia limpa.

**Palavras-chave:** Usina; Hidrogênio Verde; Energia Eólica; Exportação

## ABSTRACT

In a global scenario of increasing demand for renewable energy and decarbonization, this study proposed the design of a green hydrogen plant in Brazil, aimed at export through the conversion of hydrogen into ammonia, using offshore wind energy as the primary source. The methodology employed involved the development of an optimized layout using the Systematic Layout Planning (SLP) technique, considering technical, economic, and logistical criteria, along with capital expenditure (CAPEX) and operational expenditure (OPEX) analyses and computational simulations in AnyLogic software to validate the project's feasibility. The results demonstrated the technical and economic feasibility of the plant, with a layout efficiency index of 85.71%, occupying a total area of 175,182 m<sup>2</sup> in onshore facilities and 457 km<sup>2</sup> in maritime area for the offshore wind farm, with a projected payback period between 14 and 15 years, even considering an initial investment of 20.5 billion dollars. The strategic location of the plant, near the Port of Pecém, combined with the use of cutting-edge technologies, ensures the project's competitiveness in the international green hydrogen export market. This study significantly contributes to the development of green hydrogen projects in Brazil, providing a replicable and systematic methodological model for future research and offering technical and economic support for the implementation of large-scale projects, with positive impacts on energy matrix decarbonization, local economic development, and Brazil's strategic positioning as one of the leading global exporters of clean energy.

**Keywords:** Power plant; Green Hydrogen; Wind Energy; Export

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira . . . . .	15
Figura 2 – Conceitos de Turbina Eólica . . . . .	24
Figura 3 – Turbina <i>Downwind</i> e <i>Upwind</i> . . . . .	25
Figura 4 – Diferença entre Eólica <i>Onshore</i> e <i>Offshore</i> . . . . .	26
Figura 5 – Cores Hidrogênio . . . . .	29
Figura 6 – Tecnologias de Eletrolisadores . . . . .	30
Figura 7 – Opções de Transporte . . . . .	33
Figura 8 – Cadeia Produtiva do Hidrogênio Verde . . . . .	34
Figura 9 – Fluxograma H2V . . . . .	35
Figura 10 – Classificação de Usinas de Hidrogênio . . . . .	36
Figura 11 – Arranjo Físico por Produto . . . . .	37
Figura 12 – Arranjo Físico por Processo . . . . .	38
Figura 13 – Arranjo Físico Celular . . . . .	39
Figura 14 – Arranjo Físico por Posição Fixa . . . . .	40
Figura 15 – Etapas da Revisão Estruturada . . . . .	45
Figura 16 – Sistema de Procedimentos SLP . . . . .	47
Figura 17 – Diagrama Relações . . . . .	48
Figura 18 – Simbologia Inter-Relação . . . . .	48
Figura 19 – Diagrama de Inter-Relações . . . . .	49
Figura 20 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços . . . . .	50
Figura 21 – Exemplo <i>Layout</i> após Diagrama . . . . .	51
Figura 22 – Velocidade do Vento Nordeste . . . . .	53
Figura 23 – Rotas de Exportação e Importação . . . . .	56
Figura 24 – Complexo Eólico . . . . .	58
Figura 25 – Estrutura Eletrolisadores Industriais . . . . .	60
Figura 26 – Representação Esquemática Módulo Eletrolisador Industrial . . . . .	61
Figura 27 – Eletrolisador Industrial . . . . .	62
Figura 28 – Forma de Armazenamento Intermediário . . . . .	63
Figura 29 – Planta Modelo H2V . . . . .	64
Figura 30 – Processo de Separação de Ar . . . . .	65
Figura 31 – Processo de Produção de Amônia . . . . .	67
Figura 32 – Chave Dados de Entrada . . . . .	68
Figura 33 – Fluxograma Geral . . . . .	69
Figura 34 – Razão de Proximidade . . . . .	70
Figura 35 – Agrupamento Setores . . . . .	72
Figura 36 – Inter-Relações H2V . . . . .	73
Figura 37 – Diagrama de Inter-Relações . . . . .	74

Figura 38 – Diagrama de Inter-Relações Proximidade Indesejável . . . . .	75
Figura 39 – Efeito Esteira . . . . .	76
Figura 40 – Módulo de Tratamento de Água . . . . .	79
Figura 41 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços Escala 1 . . . . .	82
Figura 42 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços Escala 2 . . . . .	83
Figura 43 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços Escala 3 . . . . .	84
Figura 44 – Pontuação de Adjacência Total . . . . .	84
Figura 45 – Pontuação de Adjacência Percebida . . . . .	85
Figura 46 – Planta Baixa . . . . .	86
Figura 47 – Complexo Eólico 3D . . . . .	87
Figura 48 – Planta 3D . . . . .	88
Figura 49 – Planta <i>NavisWork</i> . . . . .	89
Figura 50 – Classificação da Edificação Quanto à Ocupação ou Uso . . . . .	90
Figura 51 – Largura Saída de Emergência . . . . .	90
Figura 52 – Distância a ser Percorrida até Local Seguro . . . . .	91
Figura 53 – Planta com Rota de Fuga . . . . .	92
Figura 54 – Rota de Fuga Ampliada . . . . .	93
Figura 55 – Extintor de Incêndio em Suporte . . . . .	94
Figura 56 – Tipos de Riscos . . . . .	95
Figura 57 – Exemplo Mapa de Risco . . . . .	95
Figura 58 – Riscos Identificados . . . . .	96
Figura 59 – Mapa de Riscos Usina . . . . .	97
Figura 60 – Portos com Infraestrutura para Importação e Exportação de Amônia . . . . .	99
Figura 61 – Modelo <i>AnyLogic</i> . . . . .	100
Figura 62 – Simulação <i>AnyLogic</i> . . . . .	101
Figura 63 – Simulação <i>Anylogic</i> com Redução do CAPEX do Complexo Eólico . . . . .	102
Figura 64 – Simulação <i>Anylogic</i> com Redução do CAPEX do Eletrolisador . . . . .	103

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens da Energia Eólica . . . . .	22
Quadro 2 – Impactos Negativos da Energia Eólica . . . . .	23
Quadro 3 – Eficiências de Cada Eletrolisador . . . . .	31
Quadro 4 – Arranjo Físico para cada Processo . . . . .	41
Quadro 5 – Objetivos Específicos e Procedimentos Metodológicos . . . . .	43
Quadro 6 – Resultado Base <i>Scopus</i> . . . . .	44
Quadro 7 – Resultado Base <i>Web of Science</i> . . . . .	44
Quadro 8 – Resumo da Revisão Sistemática . . . . .	46
Quadro 9 – Escala de Usinas de Hidrogênio . . . . .	55
Quadro 10 – Detalhamento das Razões de Proximidade . . . . .	71
Quadro 11 – Normas Segurança Contra Incêncio Ceará . . . . .	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensionamento Eletrolisador . . . . .	77
Tabela 2 – Dimensionamento do Sistema de Resfriamento . . . . .	78
Tabela 3 – Dimensionamento Sistema de Tratamento de Água . . . . .	79
Tabela 4 – Dimensionamento Síntese de Amônia . . . . .	80
Tabela 5 – Resumo Áreas Necessárias . . . . .	81
Tabela 6 – CAPEX Específico . . . . .	98
Tabela 7 – OPEX . . . . .	98
Tabela 8 – Custos Porto Pecém . . . . .	99
Tabela 9 – Síntese dos Resultados . . . . .	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
AEM	<i>Anion Exchange Membrane</i>
BOP	Balanceamento da Planta
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CBMEC	Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Ceará
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>
CIPA	Comissão Interna de Prevenção de Acidentes
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
GEE	Gases de Efeito Estufa
H-	Hidróxido de Potássio
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> V	Hidrogênio Verde
HSO <sub>3</sub> -	Ácido Sulfuroso
KOH	Hidróxido de Potássio
O <sub>2</sub>	Oxigênio
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
RA	Razão de Adjacência
Se	Área de Circulação
SLP	<i>Systematic Layout Planning</i>
So	Área de Operação
SOE	<i>Solid Oxide Electrolyzers</i>
Sp	Área Projetada
SYSMAP	<i>Scientometric and sYStematic yielding MApping Process</i>
TEEH	Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal
TRF	Tempo de Resistência ao Fogo
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
WoS	<i>Web of Science</i>
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	PROBLEMÁTICA	16
1.3	OBJETIVOS	17
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>17</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>17</b>
<b>1.3.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>18</b>
<b>1.3.4</b>	<b>Delimitações da Pesquisa</b>	<b>19</b>
<b>1.3.5</b>	<b>Estrutura da Pesquisa</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	ENERGIA EÓLICA	21
2.2	TIPO DE TURBINAS DA ENERGIA EÓLICA	23
2.3	CLASSIFICAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA	26
2.4	POTENCIAL DA ENERGIA EÓLICA	27
2.5	HIDROGÊNIO VERDE	28
<b>2.5.1</b>	<b>Armazenamento de H2</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Transporte de H2</b>	<b>32</b>
2.6	CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO VERDE	33
2.7	USINAS DE HIDROGÊNIO VERDE	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>42</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	42
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	42
<b>3.2.1</b>	<b>Revisão Sistemática da Literatura</b>	<b>43</b>
3.2.1.1	Coleta de dados	45
<b>3.2.2</b>	<b>Método SLP</b>	<b>46</b>
3.2.2.1	Diagrama de Inter-Relações	47
3.2.2.2	Diagrama de Inter-Relação de Espaços	49
3.2.2.3	Validação de <i>layout</i>	50
<b>3.2.3</b>	<b>Softwares</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>52</b>
4.1	IDENTIFICAÇÃO DA USINA DE HIDROGÊNIO VERDE	52
<b>4.1.1</b>	<b>Localização</b>	<b>52</b>
4.1.1.1	Proximidade de Fontes de Energia Renovável	52
4.1.1.2	Infraestrutura Logística para Exportação	53
4.1.1.3	Disponibilidade de Recursos Hídricos	54
<b>4.1.2</b>	<b>Escolha Macrolocalização</b>	<b>55</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Nível de Produção</b>	<b>55</b>

<b>4.1.4</b>	<b>Componentes para Usina de Hidrogênio Verde</b>	<b>56</b>
4.1.4.1	Complexo Eólico	57
4.1.4.2	Planta de Produção H2V	59
4.1.4.3	Separação de Nitrogênio	64
4.1.4.4	Síntese Amônia e Exportação	66
4.2	CONSTRUÇÃO DO <i>LAYOUT</i> PARA USINA DE H2V COM <i>OFFSHORE</i>	68
<b>4.2.1</b>	<b>Norma de Segurança contra Incêndio</b>	<b>89</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Mapa de Risco</b>	<b>94</b>
4.3	ANÁLISE DE CUSTOS PARA EXPORTAÇÃO	97
4.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS	104
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>106</b>
5.1	CONCLUSÃO	106
5.2	RECOMENDAÇÕES FUTURAS	108
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo investiga o domínio da energia renovável e o tópico de pesquisa pertinente, além de elucidar a problemática da pesquisa e delinear objetivos gerais e específicos. Em última análise, a lógica do estudo é justificada, ao lado das delimitações da pesquisa e de sua estrutura geral.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A comunidade global está profundamente preocupada com o bem-estar geral e a sustentabilidade do planeta, especialmente à luz do fato de que 81,5% da energia mundial está sendo gerada a partir de fontes de combustíveis fósseis, conforme destacado no relatório da *International Energy Agency* (2024). A emissão de gases de efeito estufa (GEE) está ocasionando um impacto prejudicial no equilíbrio da atmosfera terrestre, levando a um aumento preocupante das temperaturas globais em 1,5° C no ano de 2023. Espera-se que as implicações de tais mudanças climáticas aumentem rapidamente se medidas substanciais não forem tomadas para se afastar da matriz energética composta majoritariamente por combustíveis fósseis. Além disso, a disponibilidade de produtos à base de petróleo é inerentemente finita em escala global, levando a constantes flutuações nos preços e, assim, impulsionando um interesse crescente na utilização de fontes de energia renováveis como alternativa sustentável (IEA, 2024; Gonzalez-Garcia *et al.*, 2016).

As energias renováveis, principalmente solar e eólica, têm emergido como as principais candidatas para substituir as fontes de combustíveis fósseis, devido à sua abundância e menor impacto ambiental.

No entanto, essas fontes de energia exibem padrões de geração intermitentes, o que exige o desenvolvimento de soluções para armazenamento e uso eficiente da energia gerada. É nesse ponto que o hidrogênio verde se destaca como uma solução complementar e inovadora (Costa, P.; Nunes; Oliveira, V., 2023).

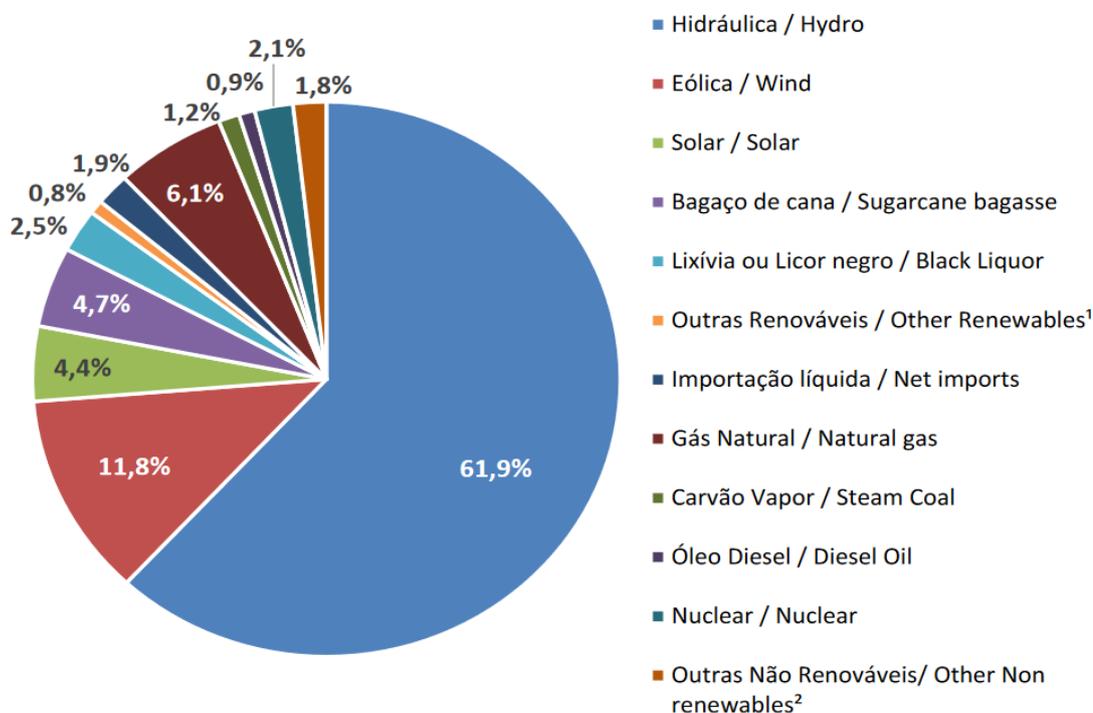
Estudos recentes de Barroso *et al.* (2022) ressaltam o potencial que o hidrogênio verde tem para facilitar a transição energética global e reduzir significativamente as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em processos industriais e químicos. Além disso, o hidrogênio verde está sendo cada vez mais reconhecido como um combustível alternativo viável com diversas aplicações, particularmente nas áreas de transporte e aquecimento.

Nações, como Estados Unidos da América e Chile, estão ativamente engajadas em esforços de pesquisa pioneiros que visam aproveitar o hidrogênio verde, preparando efetivamente o cenário para uma “corrida” quase competitiva entre elas. A Alemanha, Austrália e China assumem a liderança investindo substancialmente em pesquisas e desenvolvimentos de infraestrutura relacionados à produção de hidrogênio

verde. Notavelmente, o Brasil emerge como um ator proeminente nesse cenário, fazendo avanços significativos em iniciativas de pesquisa e estabelecendo parcerias com outras nações, como Alemanha, Austrália, França, Holanda e Portugal (Barroso *et al.*, 2022; Smink, 2021; Oliveira, R., 2022).

A produção de hidrogênio verde exige um pré-requisito crítico pelo qual a entrada de energia para o processo de eletrólise deve provir inteiramente de fontes renováveis, uma área na qual o Brasil se destaca e serve como referência global. Isso é atribuído principalmente ao fato de que 88% da rede elétrica do Brasil é alimentada por fontes de energia renováveis, conforme ilustrado na Figura 1 (Garcia, 2024; Barroso *et al.*, 2022).

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: PE (2023)

É imperativo reconhecer que 61,9% da eletricidade do país é derivada de fontes hidráulicas, seguida pela energia eólica com 11,8% e pela energia solar com 4,4%. Esses dados ressaltam a vantagem relativa do Brasil no contexto global de transição energética, posicionando-o como uma das nações com a proporção mais significativa de fontes renováveis em seu portfólio de geração de eletricidade. Consequentemente, o Brasil possui todos os atributos necessários para emergir como um proeminente produtor e exportador de hidrogênio verde (Fernandes *et al.*, 2023).

Internamente, o hidrogênio verde encontra ampla utilidade como matéria-prima para a produção de minerais verdes, amônia e como transportador de energia para ar-

mazenar energia renovável durante períodos de pico de produção e demanda reduzida, aumentando assim a eficiência e a resiliência da rede elétrica interna. Externamente, o Brasil tem um potencial significativo para exportar hidrogênio de baixo carbono. Dada a crescente ênfase do mercado global em soluções de energia sustentáveis e ecologicamente corretas, o Brasil está estrategicamente posicionado para atender a essa demanda em expansão. Confrontado com esse cenário, o Brasil possui todos os atributos essenciais para solidificar seu status de líder global na produção e exportação de hidrogênio verde, aproveitando suas vantagens inerentes e de infraestrutura para se destacar nesse setor em expansão (Barroso *et al.*, 2022; Oliveira, R., 2022; Fernandes *et al.*, 2023).

Dada essa posição privilegiada, o Brasil tem uma oportunidade sem precedentes para consolidar seu papel mundialmente. No entanto, esse potencial vem acompanhado de uma série de desafios que envolvem não apenas questões econômicas e tecnológicas, mas também a necessidade de políticas públicas robustas e incentivos governamentais, conforme será detalhado na próxima seção.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

A utilização do hidrogênio verde no Brasil encara como principal desafio o substancial investimento inicial necessário para estabelecer instalações de hidrogênio. Devido à sua complexidade tecnológica, essas instalações incorrem em custos elevados e, apesar dos esforços do Brasil para agilizar esse processo, ainda carecem de propostas robustas e tangíveis para incentivar políticas que possam impulsionar projetos. Apesar de ser um importante produtor de energia renovável, o setor de hidrogênio verde do Brasil terá dificuldades para competir sem incentivos para apoiar investimentos privados. É uma tecnologia nascente que exige investimentos em escalabilidade, diminuindo gradualmente a curva de aprendizado e as despesas (Stiftung, 2021; Viga, 2024).

Além disso, a infraestrutura de transporte precisa ser aprimorada para corresponder à eficiência do movimento de gás natural. Isso implica adaptar a atual rede de gás natural para transportar hidrogênio por longas distâncias, o que pode ser economicamente impraticável em comparação com as opções tradicionais. A expansão da rede específica de hidrogênio também acarreta despesas substanciais. Em relação ao transporte internacional, os principais obstáculos envolvem permitir a escalabilidade e a dispersão geográfica das aplicações, considerando os requisitos de segurança operacional e os elevados custos logísticos (Viga, 2024).

O custo da energia para usinas conectadas à rede elétrica representa uma barreira, já que aproximadamente 70% das despesas de produção de hidrogênio em certos projetos decorrem de tarifas de energia (Novacana, 2024).

Outro obstáculo é verificar a origem do hidrogênio de baixa emissão, especial-

mente quando a produção está vinculada à rede de energia. Estabelecer uma estrutura de certificação é necessário para garantir a classificação do hidrogênio verde sem inflar os custos da cadeia de produção ou inviabilizá-la (Stiftung, 2021).

Além dos desafios econômicos e tecnológicos mencionados, a instalação de usinas de hidrogênio verde enfrenta entraves no que se refere à integração com a geração de energia eólica como sua principal fonte para o processo de eletrólise. A planta de hidrogênio verde demanda uma energia constante e de baixo custo para perfeito funcionamento, no entanto a intermitência da energia eólica pode levar a ineficiências de produção, tornando-a insuficiente como fonte de energia única (Adedoja *et al.*, 2023).

A exportação de hidrogênio verde necessita da liquefação do hidrogênio ou sua conversão em amônia para permitir o transporte em volumes significativos; no entanto, esses processos são tecnologicamente complexos e energeticamente intensivos, exigindo maior desenvolvimento de infraestrutura nos portos brasileiros. Essa situação exacerba as restrições relativas à localização geográfica adequada para a instalação de tais usinas, que devem, portanto, estar situadas em áreas com alta produção de energia eólica e infraestrutura adequada para apoiar os processos de conversão para transporte, levando a uma escalada considerável nos custos associados (Stiftung, 2021).

Cada rota de produção e transporte de hidrogênio verde culmina em investimentos substanciais, portanto é de suma importância delinear os componentes necessários para a geração de hidrogênio para facilitar estratégias de incentivo e premeditar os fatores capazes de diminuir o custo, juntamente com avaliar suas implicações individuais nas despesas gerais incorridas no estabelecimento de uma instalação de produção de hidrogênio, com isso, a investigação focal deste estudo é: Quais são os elementos necessários para a implementação de uma usina de hidrogênio verde baseada em energia eólica, com foco na exportação?

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Projetar uma usina de hidrogênio verde no Brasil, visando a exportação através da conversão do hidrogênio em amônia, utilizando energia eólica *offshore* como fonte primária

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

1. Identificar os principais desafios e oportunidades no desenvolvimento de usinas de hidrogênio verde no Brasil, com base na energia eólica;
2. Projetar uma usina de hidrogênio verde a partir de energia eólica;

3. Avaliar a viabilidade econômica da usina projetada de hidrogênio verde;
4. Avaliar o potencial de exportação da usina projetada de hidrogênio verde.

### 1.3.3 Justificativa

O Brasil possui um potencial significativo para gerar hidrogênio verde a partir de recursos eólicos, um setor caracterizado pela competitividade no estado. No entanto, manter essa vantagem competitiva se mostra um desafio devido à pesquisa e inovação insuficientes neste domínio (Murat, 2023). Além disso, dada a necessidade premente de minimizar as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, o Brasil deve determinar o melhor curso de ação em relação à produção de hidrogênio verde (USP, 2022).

O objetivo deste estudo é oferecer orientação aos interessados sobre o estabelecimento de usinas de hidrogênio verde usando uma abordagem bem fundamentada. Isso permitirá a análise de custos e a avaliação das compensações associadas a várias fontes de energia renováveis e ao projeto de instalações de energia a hidrogênio.

O desenvolvimento metódico de uma planta surge como um elemento importante nesse campo, pois introduz uma perspectiva deliberativa em cada processo de tomada de decisão, desde a seleção de produtos ou equipamentos até os modelos de produção e a organização espacial dos componentes dentro da instalação. Essa avaliação de pré-projeto dos *layouts* escolhidos ajuda a reduzir os riscos à saúde e segurança dos trabalhadores, dado o alto potencial destrutivo do hidrogênio quando inflamado (Moura *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a escolha da energia eólica *offshore* como fonte principal se justifica por diversos fatores. A energia eólica *offshore* possui uma capacidade de geração superior devido à constância e intensidade dos ventos em alto-mar, reduzindo as variações sazonais comuns em instalações *onshore* ou em sistemas fotovoltaicos. Além disso, a proximidade com portos facilita a integração logística para exportação do hidrogênio produzido, um aspecto estratégico para atender ao mercado internacional. Esse tipo de energia também mitiga os impactos sobre o uso do solo, considerando que a implantação das turbinas ocorre em áreas marítimas, preservando terras que podem ser destinadas a outros usos (Cerutti *et al.*, 2023; Liponi, A.; Baccioli, A.; Ferrari, L., 2023; Lucas *et al.*, 2022).

Embora o Brasil tenha um alto potencial para energia solar devido à sua localização geográfica, a escolha pela energia eólica *offshore* considera desafios práticos, como a menor eficiência de painéis solares em dias nublados e durante a noite. Além disso, a energia solar exige grandes áreas de terra para instalação, o que pode entrar em conflito com outros usos econômicos ou ambientais, e especialmente em regiões costeiras densamente ocupadas. A energia eólica *offshore*, por sua vez, oferece maior previsibilidade de geração e aproveita as condições favoráveis de ventos marítimos ao longo da extensa costa brasileira (Cerutti *et al.*, 2023; Liponi, A.; Baccioli,

A. Ferrari, L., 2023; Lucas *et al.*, 2022).

Nessa estrutura, a metodologia SLP é adotada devido à sua replicabilidade e flexibilidade, em que cada fase visa aumentar a eficiência e a produtividade da planta em alinhamento com os dados fornecidos, um aspecto crítico, dados os investimentos substanciais e os diversos métodos de produção de hidrogênio verde disponíveis (Petry, 2015).

Em última análise, este estudo visa preencher a lacuna existente nos ambientes acadêmico e empresarial, oferecendo uma abordagem sistemática para o desenvolvimento de usinas de hidrogênio verde com foco em exportação, utilizando energia eólica. Isso permitirá que as partes interessadas apliquem e personalizem a metodologia descrita aqui para atender a requisitos específicos.

#### **1.3.4 Delimitações da Pesquisa**

A proposta apresentada no trabalho gira em torno do desenvolvimento de um *layout* para uma instalação de produção de hidrogênio verde, especificamente confinada aos parâmetros dos níveis 1 e 2 da metodologia *Systematic Layout Planning* (SLP). Esse *design* não se estende ao *layout* detalhado de máquinas, equipamentos específicos ou o processo de instalação, limitações atribuídas ao considerável período de tempo e aos recursos necessários para esses empreendimentos.

Dentro dessa usina de hidrogênio prevista, a principal fonte de insumo foi derivada da energia eólica *offshore*, enfatizando a utilização de recursos renováveis. Não foram considerados, neste estudo, os impactos detalhados da variabilidade na geração de energia eólica sobre o dimensionamento dinâmico do sistema, sendo adotados valores médios para fins de simulação. Além disso, o *layout* incluiu uma área destinada ao armazenamento do hidrogênio produzido, mas sem o detalhamento do dimensionamento específico, que requer uma análise aprofundada do balanço de massa e energia, o que excede o escopo deste trabalho.

O objetivo principal desta instalação foi centrado na produção do produto final de hidrogênio destinado exclusivamente para fins de exportação. Assim, foram omitidas quaisquer considerações sobre a distribuição interna de hidrogênio dentro das fronteiras do Brasil, bem como os aspectos regulatórios ou logísticos associados à integração do hidrogênio verde ao mercado interno.

Por fim, as análises realizadas não abordaram questões ambientais específicas, como os impactos do uso do solo e das operações marítimas, que poderiam ser tema de estudos complementares. A abordagem do presente trabalho focou-se estritamente na viabilidade técnica e econômica, apresentando uma proposta integrada e replicável dentro do escopo proposto.

### 1.3.5 Estrutura da Pesquisa

O estudo atual foi organizado em cinco capítulos para atingir os objetivos delineados. Este capítulo inicial abrange a apresentação e contextualização do fenômeno da pesquisa. Implica a exposição do tema, suas questões associadas, objetivos gerais e específicos, bem como a justificativa e o escopo do estudo.

O capítulo seguinte, capítulo dois, aborda a fundamentação teórica, explorando os principais conceitos relacionados a energia eólica, hidrogênio verde, classificações de usinas e arranjo físico.

O capítulo três elucida a metodologia de pesquisa e descreve os procedimentos adotados. Este capítulo aborda a classificação da pesquisa, as etapas de desenvolvimento do modelo de *layout* com base na abordagem SLP, a revisão sistemática da literatura utilizando o método SYSMAP e os *softwares* utilizados para modelagem e simulação.

O capítulo quatro investiga os resultados obtidos em cada fase, incluindo a análise de localização e dos componentes principais, a criação do *layout* final, e a avaliação técnica e econômica do projeto por meio de simulações computacionais.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais do estudo e seu alinhamento com os objetivos traçados, além de oferecer recomendações para futuras pesquisas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo oferece um exame teórico abrangente centrado nos conceitos fundamentais pertinentes às instalações de geração de hidrogênio verde, energia eólica e produção de hidrogênio. Definições, classificações e categorias significativas são analisadas, estabelecendo uma base sólida para a progressão da investigação. Além disso, se esforça para situar as tecnologias ligadas à produção e exportação de hidrogênio verde, enfatizando os avanços contemporâneos, bem como os obstáculos técnicos e econômicos. Na busca de investigar a literatura científica, objetiva-se compreender os principais processos e terminologias que são parte integrante do domínio do hidrogênio verde.

### 2.1 ENERGIA EÓLICA

A energia elétrica aproveitada a partir da energia cinética gerada pelas forças do vento que atuam sobre uma turbina eólica é chamada de energia eólica, que se caracteriza como uma fonte de energia renovável, eficiente, madura e segura (Carvalho, E.).

Para que essa forma específica de energia alcance competitividade e facilite a produção substancial para o fornecimento adequado de energia elétrica, é imperativo implantar um aglomerado de aerogeradores em um único local, todas envolvidas na transmutação da energia cinética em energia elétrica, coletivamente denominado parque eólico. (Carvalho, E., 2022).

Esse tipo de energia apresenta características vantajosas com relação a usinas termoelétricas para produção de energia elétrica, além também de possuir vantagens substanciais em relação aos seus equivalentes de energia renovável, como a hidrelétrica. O Quadro 1 lista as vantagens desse tipo de energia.

Quadro 1 – Vantagens da Energia Eólica

<b>Vantagem</b>	<b>Descrição</b>
Não emissão de GEE	Por usar apenas a energia cinética do vento, a energia eólica não libera nenhum tipo de gás na atmosfera
Redução da dependência de combustíveis fósseis	Com o aumento da geração de energia eólica e a diminuição do custo de investimento devido a escala mundial que esse tipo de energia chegou, menos carvão é queimado para suprir a intermitência das energias renováveis, portando dependendo menos de geração com emissão de GEE
Pouco espaço físico demandado para escritórios	Diferentemente da energia hidrelétrica, a energia eólica não necessita de uma central de manutenção, devido a simplicidade de seus componentes, ao qual são compostos apenas de turbina eólica e rede de transmissão
Desenvolvimento regional	Um parque gera empregos para a região ao qual está instalada

Fonte: Adaptado de E. Carvalho (2022)

Nota-se que a principal vantagem, que caracteriza as energias renováveis, é a não emissão de GEE, o que torna a energia eólica um pilar essencial no processo de descarbonização mundial. A geração de energia limpa a partir do vento contribui diretamente para a redução da pegada de carbono, promovendo uma matriz energética mais sustentável e alinhada às metas globais de redução de emissões (Ferreira, E., 2021).

Outro benefício significativo é o impacto econômico positivo que os parques eólicos geram nas regiões onde são instalados. A criação de empregos diretos e indiretos, desde a construção até a manutenção das turbinas, proporciona desenvolvimento socioeconômico local. Esse fator é especialmente relevante em áreas menos desenvolvidas, onde os parques eólicos podem impulsionar novas oportunidades econômicas e melhorar a qualidade de vida da população (Simas; Pacca, 2013; Santos, R., 2016).

Além disso, a energia eólica apresenta uma elevada eficiência no uso do espaço físico. Ao contrário de outras fontes renováveis, como a energia hidrelétrica, que exige áreas extensas para reservatórios, os aerogeradores ocupam espaços relativamente pequenos e podem coexistir com outras atividades, como a agricultura e a pecuária. Essa característica torna a energia eólica uma opção versátil e com menor impacto sobre o uso do solo (Simas; Pacca, 2013; Santos, R., 2016)

Por fim, o custo de produção de energia eólica tem caído de forma significativa nas últimas décadas, impulsionado por avanços tecnológicos e pela escala global do

setor. Isso torna essa fonte de energia cada vez mais competitiva em relação a combustíveis fósseis, contribuindo para a transição energética com um modelo financeiramente viável e ambientalmente responsável (Gannoum, 2021).

Porém, mesmo com essas vantagens a energia eólica não é livre de gerar impactos negativos no ambiente e na sociedade, o Quadro 2 descreve esses impactos

Quadro 2 – Impactos Negativos da Energia Eólica

<b>Tipo do Impacto</b>	<b>Descrição</b>
Impacto no local de instalação	Há a necessidade de grandes espaços de instalação para os parques eólicos, alterando paisagens naturais, desmatando e destruição de regiões de proteção ambiental
Impacto na fauna	Além do desmatamento, a fauna é prejudicada devido a invasão das rotas de imigração das aves, ocorrendo o choque entre a ave e o aerogerador
Impacto regional	O aerogerador devido ao seu funcionamento gera dois tipos de ruídos, o primeiro sendo o ruído mecânico da caixa de engrenagens e gerador, na maioria das vezes um isolamento acústico resolve. O segundo tipo de ruído advém da rotação das pás, ao qual não há como diminuir, gerando um ruído de 35 a 45 decibéis em uma distância de 350 metros.
Impacto no solo	Destruição do solo devido ao processo de instalação que engloba terraplanagem e compactação do solo.

Fonte: Adaptado de E. Carvalho (2022)

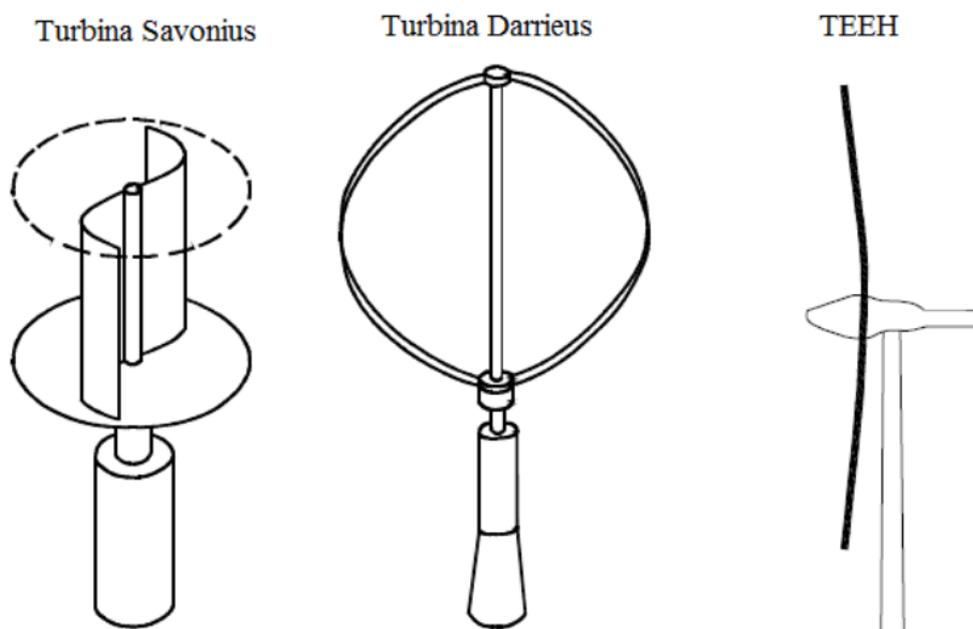
Diante das vantagens e limitações da energia eólica, a escolha e o uso eficiente de turbinas eólicas se torna fundamental para maximizar o aproveitamento do potencial energético disponível. As diferentes tecnologias de turbinas eólicas, desempenham um papel importante na conversão da energia cinética do vento em eletricidade, permitindo a criação de parques eólicos mais eficientes e adaptáveis às condições locais. Essa escolha impacta diretamente na capacidade de produção de energia e, por consequência, na viabilidade econômica e ambiental da energia eólica como fonte primária para projetos de hidrogênio verde.

## 2.2 TIPO DE TURBINAS DA ENERGIA EÓLICA

O processo de conversão da energia cinética, advinda do vento, em eletricidade requer a presença de um aerogerador, mais conhecido como turbina eólica. Essas turbinas abrangem várias tecnologias, sendo as mais predominantes a turbina *Savonius*,

a turbina *Darrieus* e as turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Conceitos de Turbina Eólica



Fonte: Nogueira (2019)

Essas turbinas fazem parte da categoria de máquinas rotativas, que é classificada com base no tipo de suporte e arrasto, com foco especial nos princípios aerodinâmicos que regem a interação entre as pás da turbina e o fluxo de vento. As turbinas TEEH e *Darrieus* funcionam com base na sustentação, onde a força aerodinâmica atua perpendicularmente à direção do vento. Em contraste, a turbina *Savonius* opera sob a classificação de arrasto, com a força atuando paralelamente à direção do vento em vez de perpendicular (Nogueira, 2019; Carvalho, J., 2024).

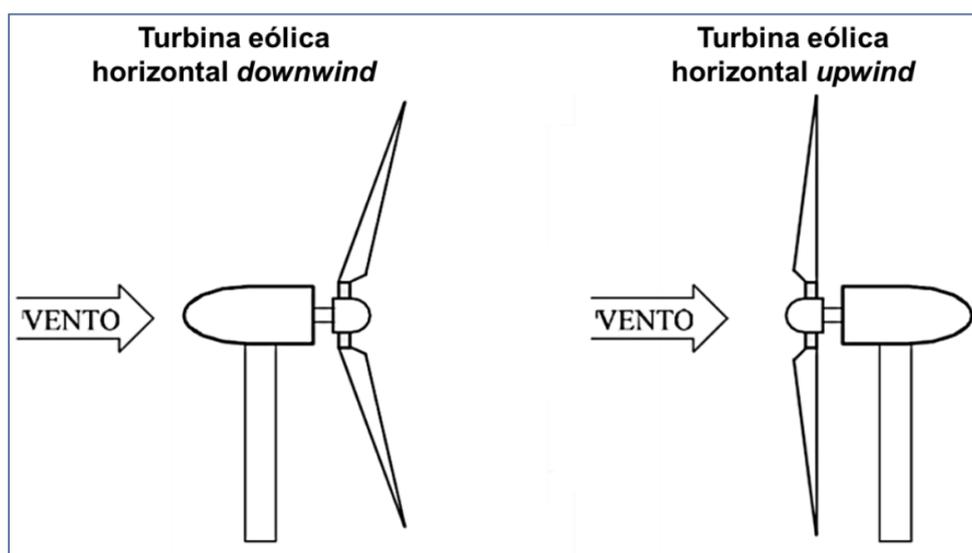
A turbina do tipo *Savonius* pode aproveitar os ventos de qualquer direção, produzindo alto torque de partida mesmo em baixas velocidades de vento. Consequentemente, é comumente utilizado em áreas urbanas ou ambientes de produção descentralizados, geralmente no topo de edifícios, com baixos custos de instalação e impacto ambiental mínimo. No entanto, uma desvantagem está em sua velocidade de rotação restrita e eficiência energética relativamente menor em comparação com rotores baseados em princípios de forças de sustentação (Carvalho, J., 2024; Akwa, 2010).

A turbina do tipo *Darrieus* supera em todos os aspectos a anterior, possuindo hélices de lâminas curvas, retas ou helicoidais, sendo geralmente de duas a três, conectadas ao centro em um eixo vertical, os rotores são capazes de atingir altas

velocidades, com uma força necessária de partida praticamente zero quando na presença de pás helicoidais, porém como desvantagem possui maior complexidade de projeto e fabricação devido a configuração e formato da hélice. (Carvalho, J., 2024; Purificação; Fonte, 2012).

Apesar das características e vantagens exclusivas de outras turbinas, a mais usada para geração de energia eólica continua sendo a TEEH. Com até 200 metros de altura, uma única turbina TEEH pode produzir até 8 MW de energia, o suficiente para abastecer várias residências. Dentro dessa classificação de turbinas, existem duas variações: as turbinas *downwind* e *upwind*. Nas turbinas *upwind*, o rotor eólico é posicionado diretamente em frente à torre, guiando o vento diretamente pelas pás, uma tecnologia predominante em grandes instalações de TEEH. Por outro lado, as turbinas *downwind* exibem uma inclinação do sistema que permite que os ventos passem primeiro por trás da turbina antes de atingirem as pás. Essas variações estão representadas na Figura 3 (Carvalho, J., 2024; Cruz *et al.*, 2015).

Figura 3 – Turbina *Downwind* e *Upwind*



Fonte: Adaptado de J. Carvalho

Para que ocorra o processo de conversão de energia, as turbinas são equipadas com alguns componentes base, como o rotor (pás) e um gerador, alojados dentro da nacela da turbina. Além disso, um transformador é colocado estrategicamente na seção inferior da torre. Conseqüentemente, a energia cinética aproveitada pelo vento que passa pelo rotor é transformada em energia elétrica pelo gerador, que é então transmitida para outros sistemas por meio do transformador (Nogueira, 2019).

Após elucidar as diferentes tecnologias de turbinas eólicas e suas variações operacionais, torna-se importante considerar que o desempenho e a eficiência des-

As turbinas também estão diretamente ligadas ao ambiente em que são instaladas. Dependendo das características geográficas e das condições de vento locais, as turbinas podem ser instaladas tanto em terra (*onshore*) quanto em regiões submersas, como lagos e oceanos (*offshore*), o que traz novas variáveis a serem consideradas na eficiência e nos custos de implementação.

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA

A diferença entre turbinas eólicas *onshore* e *offshore* reside apenas no fato do local em que são instaladas, sendo *onshore* em terra firme, ao qual é mais comumente encontrado, já *offshore* é instalada em regiões alagadas, como lagos e, principalmente, mares (Trapp, 2009). Diferentemente dos parques eólicos, quando há a junção de várias turbinas eólicas *offshore* dá-se o nome de complexo eólico (Cerutti *et al.*, 2023). A Figura 4 ilustra a diferença entre os dois tipos.

Figura 4 – Diferença entre Eólica *Onshore* e *Offshore*



(a) *Onshore*



(b) *Offshore*

Fonte: Petrosolgas (2023) e Neoenergia (2024)

A tecnologia entre os dois tipos de turbina pouco muda, nos dois modos são empregados comumente turbinas do tipo TEEH, porém as turbinas eólicas *offshore* são maiores devido à parte submersa necessária, possuem um revestimento, geralmente de epóxi de zinco ou silicato de zinco, por conta da alta corrosão e abrasividade do ambiente, possuem fundações mais complexas e difíceis de se construir e a transmissão elétrica da turbina até uma bateria ou rede de distribuição é realizada por cabos submarinos (Trapp, 2009; Cerutti *et al.*, 2023).

Por conta disso, as turbinas *offshore* possuem um investimento inicial maior quando comparada as *onshore*, porém mesmo com isso há um grande interesse e aumento de projetos para *offshore* por conta da pouca diferença entre instalar uma

turbina com uma lâmina do rotor pequena ou grande, o que torna o sistema mais eficiente (Trapp, 2009).

A forma de instalação *offshore* apresenta como desvantagem o elevado investimento inicial, porém possui vantagens de ser mais eficiente, sendo capaz de aproveitar melhor a energia cinética do vento, além de não ocupar espaço em terra firme, evitando impactos negativos na fauna e flora terrestre e também impactos negativos regionais (Mundial, 2024).

Porém, a fauna e flora aquática sofre esse impacto, com a turbina eólica gerando ruído subaquático, o que prejudica os animais marinhos. Além de serem altas, o que impacta diretamente na rota de imigração das aves. Outra limitação que esse tipo de turbina tem é o fato de acabar sendo construída em locais reprodutivos ou de repouso dos animais aquáticos (CERUTTI *et al.*, 2023; SILVA, A., 2019).

À medida que as tecnologias *onshore* e *offshore* evoluem e se tornam mais viáveis, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, torna-se necessário compreender como o mercado global de energia eólica está se expandindo e quais são as oportunidades que o Brasil pode explorar nesse cenário internacional.

## 2.4 POTENCIAL DA ENERGIA EÓLICA

A tendência de crescimento da energia eólica é acentuada, não só no Brasil, mas no mundo inteiro, o crescimento ocorre devido a sua facilidade de acesso e a abundância de vento presente na natureza. O Brasil possui cerca de 22 GW de potência instalada de energia eólica *onshore*, onde 20 GW está instalada apenas na região nordeste (Abeeólica, 2021; Carvalho, E., 2022), possuindo várias formas de atuação, a energia eólica é um elemento versátil dentro da matriz energética brasileira.

Porém, para o Brasil mostrar destaque dentro do cenário mundial é necessário investimentos em projetos e implementações de energias eólicas *offshore* pelo fato do Brasil possuir cerca de 7000 km de costa litorânea, apresentando ventos fortes com pouca chuva (Cerutti *et al.*, 2023).

Um estudo realizado pelo Banco Mundial (Program, 2019) indicou que apenas a região Nordeste, Sudeste e Litoral Sul do Brasil é capaz de gerar 1,2 TW de potência com energia eólica *offshore*, ultrapassando, portanto, a potência das eólicas *onshore* existentes (Cerutti *et al.*, 2023). Essa possibilidade coloca o Brasil em uma posição estratégica no desenvolvimento de energia renovável, não só para atender a demanda interna, mas também para se tornar um exportador de tecnologia e energia limpa.

Por fim, além de seu papel crescente na matriz energética global, especialmente no Brasil, a energia eólica destaca-se pela possibilidade de integrar-se a tecnologias inovadoras, como a produção de hidrogênio verde. O Brasil, com seu vasto potencial

de energia eólica *offshore*, tem a capacidade de expandir sua participação nesse mercado, especialmente com projetos em áreas costeiras, que oferecem ventos fortes e constantes. Além disso, a integração da energia eólica com a eletrólise da água para a produção de hidrogênio verde é uma solução promissora para o equilíbrio entre oferta e demanda energética, permitindo que o excesso de energia seja armazenado em baterias ou aproveitado diretamente no processo de eletrólise. Isso contribui para um sistema mais eficiente e sustentável, alinhado com as tendências globais de descarbonização (Liponi *et al.*, 2021; Liponi A.; Baccioli, A.; Ferrari, L., 2023).

Portanto, a energia eólica se posiciona não apenas como um pilar na matriz energética, mas também como uma alavanca para o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis, como a produção de hidrogênio verde.

## 2.5 HIDROGÊNIO VERDE

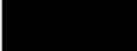
O hidrogênio (H<sub>2</sub>) é um elemento químico amplamente encontrado na natureza, muitas vezes presente na forma de água (H<sub>2</sub>O). Ele possui características distintas, como inflamabilidade, sendo incolor, inodoro e insolúvel em água (Calf, 2021). Essas propriedades fazem do hidrogênio um elemento versátil, com potencial para diferentes aplicações, especialmente no setor energético.

Com o maior poder calorífico entre os combustíveis, atingindo cerca de 141,86 KJ/g, o hidrogênio apresenta uma capacidade energética três vezes superior à da gasolina. Esse fator torna o hidrogênio um vetor energético emergente, com o potencial de reduzir a dependência de combustíveis fósseis (Santos, F. M.; Santos, F. A., 2005).

No entanto, para que o hidrogênio seja efetivamente utilizado como fonte de energia, é necessário o desenvolvimento de uma cadeia produtiva eficiente, que inclua processos seguros de produção, transporte e armazenamento. Além disso, soluções tecnológicas inovadoras são imperativas para garantir a competitividade do hidrogênio em relação a outras fontes de energia (Santos, F. M.; Santos, F. A., 2005).

Dado que esse elemento é encontrado na natureza tipicamente interconectado, o processo de separação se torna necessário. Existem diversos métodos de separação, onde cada método confere características distintas ao hidrogênio, como está ilustrado na Figura 5, evidenciando suas diferentes classificações e formas de obtenção.

Figura 5 – Cores Hidrogênio

	<i>COR</i>	<i>PROCESSO DE PRODUÇÃO</i>
	Preto	Gaseificação do carvão mineral(betuminoso)
	Marrom	Gaseificação do carvão mineral(lignito)
	Cinza	Reforma a vapor do gás natural
	Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
	Turquesa	Pirolise do metano sem gerar CO2
	Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis
	Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão de biomassa
	Rosa	Eletrolise com energia nuclear
	Amarelo	Energia da rede elétrica
	Vermelho	Decomposição térmica com energia nuclear
	Branco	Extração de fontes naturais

Fonte: Nunes e V. Oliveira (2023)

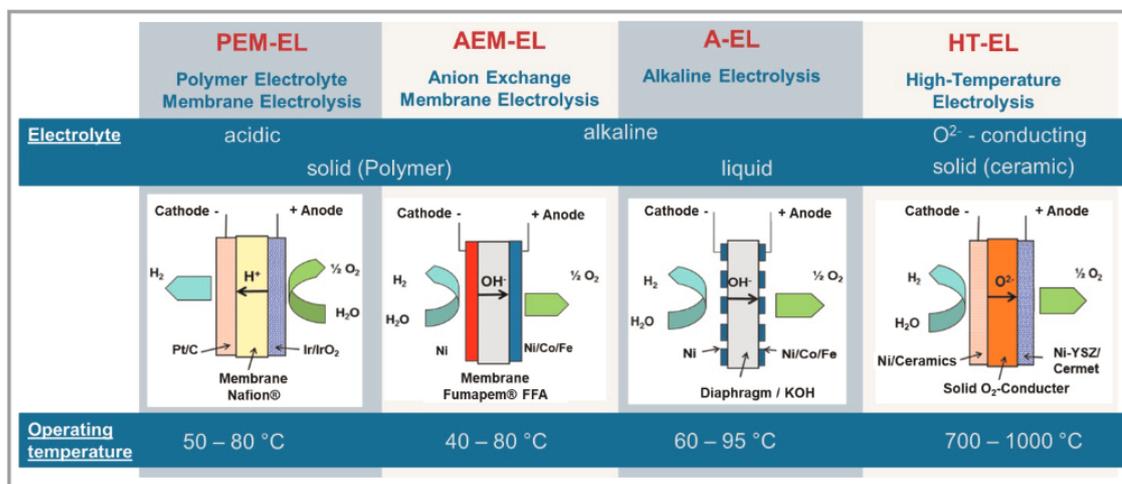
Além do método de produção, um aspecto definidor do hidrogênio é o impacto ambiental dos produtos resultantes após a separação. O método predominante de produção de H<sub>2</sub> a partir do gás natural resulta em hidrogênio cinza; no entanto, a utilização da tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) pode transformá-lo em hidrogênio azul, reduzindo assim as emissões. Além do hidrogênio verde, há também o hidrogênio vermelho e rosa que não emitem CO<sub>2</sub>, ao quais provêm da energia nuclear. (Costa, P.; Nunes; Oliveira, V., 2023; Incer-Valverde *et al.*, 2023)

Como este estudo se concentra principalmente em usinas de hidrogênio verde, é imperativo manter esse foco.

O hidrogênio verde é fabricado por meio da eletrólise da água, um processo facilitado por um eletrolisador. Esse dispositivo separa moléculas de hidrogênio e oxigênio na água usando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como energia solar, hidrelétrica ou eólica, que são ecologicamente corretas e não emitem gases poluentes na atmosfera (Abdin *et al.*, 2020).

Existem vários métodos para eletrólise da água, incluindo alcalina, membrana de troca de prótons (PEM), membrana de troca aniônica (AEM) e óxido sólido, cada um empregando tecnologias de eletrolisador correspondentes, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Tecnologias de Eletrolisadores



Fonte: Trattner *et al.* (2021)

Os eletrolisadores alcalinos utilizam uma solução alcalina, normalmente hidróxido de potássio (KOH) com concentrações de massa variando de 25% a 30% (Palhares *et al.*, 2016). Em contraste, os eletrolisadores de membrana polimérica empregam um eletrólito sólido impermeável a gases, geralmente feito de Nafion, com grupos de ácido sulfônico (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>) responsáveis pela condução de íons H<sup>-</sup>. Os eletrolisadores PEM apresentam maior eficiência energética e taxas de produção em comparação aos eletrolisadores alcalinos, além de serem mais compactos (Ursua; Gandia; San-Chis, 2011; Zeng; Zhang, D., 2010).

Os eletrolisadores AEM ainda estão em fase experimental, com implementação limitada. Apesar de seu menor custo em comparação com as membranas PEM, os eletrolisadores AEM sofrem instabilidade química e mecânica, levando a um desempenho abaixo do ideal (Cazanova, 2023).

Por fim, os eletrolisadores de óxido sólido, também conhecidos como eletrolisadores *Solid Oxide Electrolyzers* (SOE), conduzem a eletrólise de vapor de água em altas temperaturas em torno de 700 °C, resultando em maior eficiência em comparação com outros tipos. No entanto, esses eletrolisadores enfrentam desafios de estabilidade de longo prazo devido à sua operação em condições extremas, levando ao rápido envelhecimento dos eletrólitos (Palhares *et al.*, 2016; Ursua; Gandia; Sanchis, 2011). O Quadro 3 ilustra as eficiências de cada tipo de eletrolisador.

Quadro 3 – Eficiências de Cada Eletrolisador

TIPO	EFICIÊNCIA
Alcalino	59 a 70%
PEM	65 a 82%
AEM	50 a 60%
SOE	40 a 60%

Fonte: EPE (2023)

Devido ao seu desempenho superior em termos de eficiência e seu avanço significativo no mercado, a variante específica do eletrolisador que será utilizada para os fins deste estudo é o eletrolisador de membrana de troca de prótons (PEM).

### 2.5.1 Armazenamento de H<sub>2</sub>

O hidrogênio é percebido como um gás perigoso devido à sua elevada densidade de energia, exibindo uma densidade volumétrica de 0,089 kg/m<sup>3</sup> sob condições padrão de temperatura ambiente (25 °C) e pressão atmosférica (1 atm). Além disso, o hidrogênio possui um ponto de ebulição notavelmente baixo de aproximadamente -252,9 °C. Esses atributos particulares tornam o armazenamento e o transporte de hidrogênio bastante complexos para as economias, necessitando de uma infraestrutura especializada para atender à demanda em áreas distantes das instalações de eletrolisadores. Essa infraestrutura é importante para atender à demanda e também garantir a segurança do sistema de abastecimento e energia (Irena, R., 2021; Cazanova, 2023).

Porém, mesmo com essas dificuldades, ainda é possível armazenar hidrogênio verde, tanto no estado líquido quanto no gasoso. No caso do armazenamento no estado líquido, o gás hidrogênio é comprimido e resfriado até sua forma líquida, posteriormente armazenado em tanques criogênicos. No entanto, esse método requer uma elevada entrada de energia para o funcionamento de compressores e, principalmente, trocadores de calor, aumentando portanto o gasto energético, além disso, essa forma de armazenamento leva a perdas diárias de H<sub>2</sub> para a atmosfera (Cazanova, 2023).

Por outro lado, o armazenamento gasoso envolve o uso de tanques de gás onde o hidrogênio é comprimido a altas pressões, normalmente em torno de 1000 bar. Essa forma de armazenamento de hidrogênio à alta pressão é comumente utilizado diariamente em várias indústrias, geralmente em pequenas quantidades de até 10000 m<sup>3</sup>. No entanto, para armazenamento de longo prazo, o armazenamento geológico é empregado e está em expansão, utilizando estruturas como cavernas de sal, aquíferos e reservatórios profundos dentro de camadas de hidrocarbonetos. Essa forma de armazenamento exige níveis de compressão mais baixos, variando entre 20 e 180 bar (Cazanova, 2023; Pinho, 2017).

Além disso, um método alternativo de armazenamento de hidrogênio envolve combiná-lo com outros elementos para formar amônia. No entanto, um processo químico adicional é necessário posteriormente para extrair apenas o componente de hidrogênio (Cazanova, 2023).

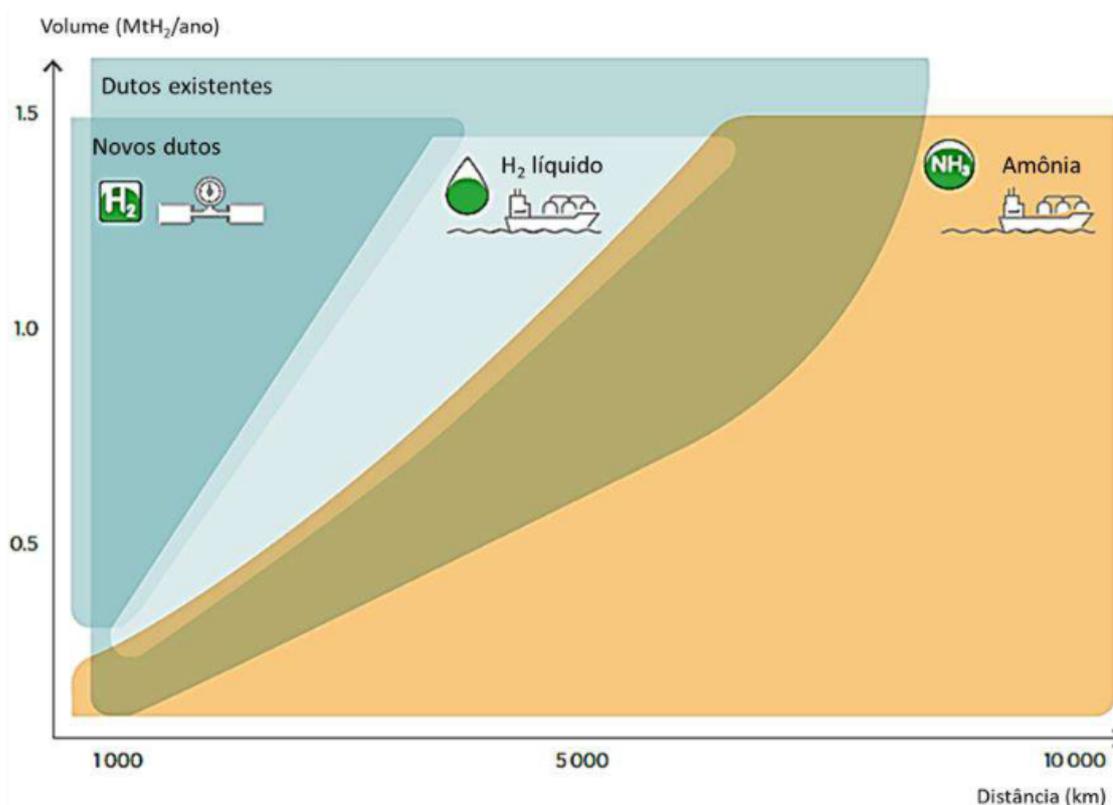
À luz da natureza dessa pesquisa, o armazenamento de hidrogênio será explorado de duas maneiras distintas. A primeira abordagem diz respeito ao armazenamento intermediário do excesso de produção de hidrogênio, com foco na exploração do armazenamento na forma gasosa em tanques de metais. O segundo método envolve armazenamento para transporte posterior, enfatizando a conversão de hidrogênio em amônia como um meio de transporte mais seguro.

### **2.5.2 Transporte de H<sub>2</sub>**

O hidrogênio pode ser transportado por vários meios, como caminhões, navios e gasodutos. Além disso, o processo de conversão de hidrogênio em amônia abre a possibilidade de alavancar a infraestrutura de transporte existente. A seleção de um método de transporte específico para o hidrogênio depende em grande parte de fatores como a aplicação pretendida do hidrogênio, a distância entre seu ponto de origem e seu destino, bem como a escala do volume transportado (Gurlit *et al.*, 2021).

A representação esquemática na Figura 7 mostra uma variedade de alternativas de transporte adaptadas para viagens de longa distância ou para exportação internacional, cada método sendo escolhido com base em considerações de volume e distância.

Figura 7 – Opções de Transporte



Fonte: Adaptado de IRENA (2022)

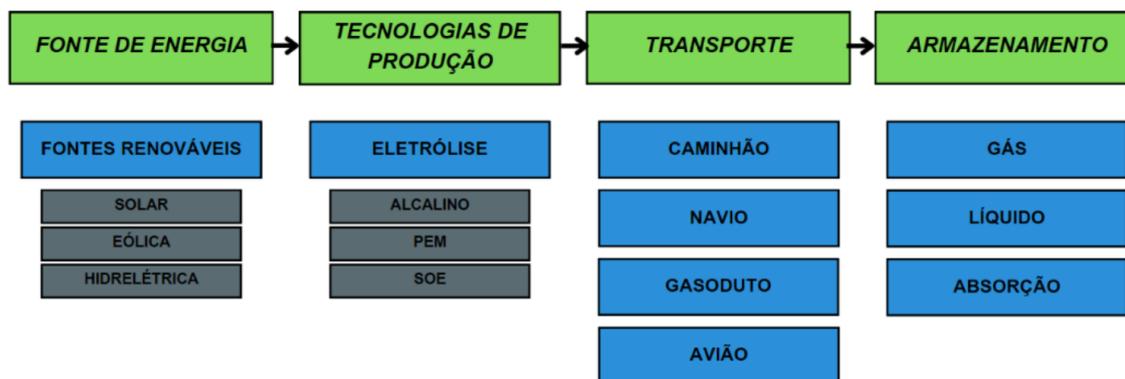
Para distâncias menores que 1000 km, a distribuição de hidrogênio em uma região geralmente depende do transporte rodoviário por meio de caminhões. Esse meio de transporte envolve armazenar hidrogênio em tanques de pequena escala e transportá-lo até o consumidor final (Cazanova, 2023).

Portanto, como o objetivo é produzir hidrogênio para fins de exportação, uma estratégia viável envolve convertê-lo em amônia e, em seguida, utilizar o transporte marítimo para seu deslocamento. Essa abordagem capitaliza de forma inteligente a infraestrutura pré-existente adaptada ao transporte marítimo, garantindo eficiência e confiabilidade no processo de entrega.

## 2.6 CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO VERDE

Após explorar a cadeia produtiva do hidrogênio verde, demonstrada na Figura 8 torna-se evidente que sua viabilidade e eficácia estão relacionadas a quatro fatores decisórios, sendo eles, fonte de energia, tecnologia de produção, armazenamento e transporte.

Figura 8 – Cadeia Produtiva do Hidrogênio Verde



Fonte: Costa, Nunes e V. Oliveira (2023)

A cadeia produtiva do hidrogênio verde, inicia-se com a obtenção de fontes de energia limpa e renovável, como a energia solar e eólica, que desempenham um papel de fornecer a eletricidade necessária para produzir hidrogênio verde de forma sustentável e com baixo impacto ambiental. A próxima etapa envolve o processo de eletrólise da água, um componente central na produção de hidrogênio verde. Após sua produção, o hidrogênio precisa ser armazenado de maneira eficiente, sendo que vários métodos de armazenamento estão em desenvolvimento, como a compressão, liquefação, armazenamento em hidretos metálicos ou em estruturas de armazenamento subterrâneo. Cada aplicação ou objetivo demanda uma rota a ser tomada dentro da cadeia de produção do hidrogênio verde, com cada processo tendo suas vantagens e desvantagens. (Irena, R., 2021; Costa, P.; Nunes; Oliveira, V., 2023)

Ao examinar a cadeia produtiva do hidrogênio verde, torna-se evidente que sua eficiência depende de processos interligados, desde a captação de energia renovável até o armazenamento e transporte. Nesse contexto, as usinas de hidrogênio verde desempenham um papel fundamental, sendo responsáveis por interligar a energia renovável com o processo de eletrólise. Essas usinas, além de abrigarem a tecnologia necessária para a produção de hidrogênio, possuem diversos componentes e sistemas críticos que garantem a viabilidade da cadeia produtiva.

## 2.7 USINAS DE HIDROGÊNIO VERDE

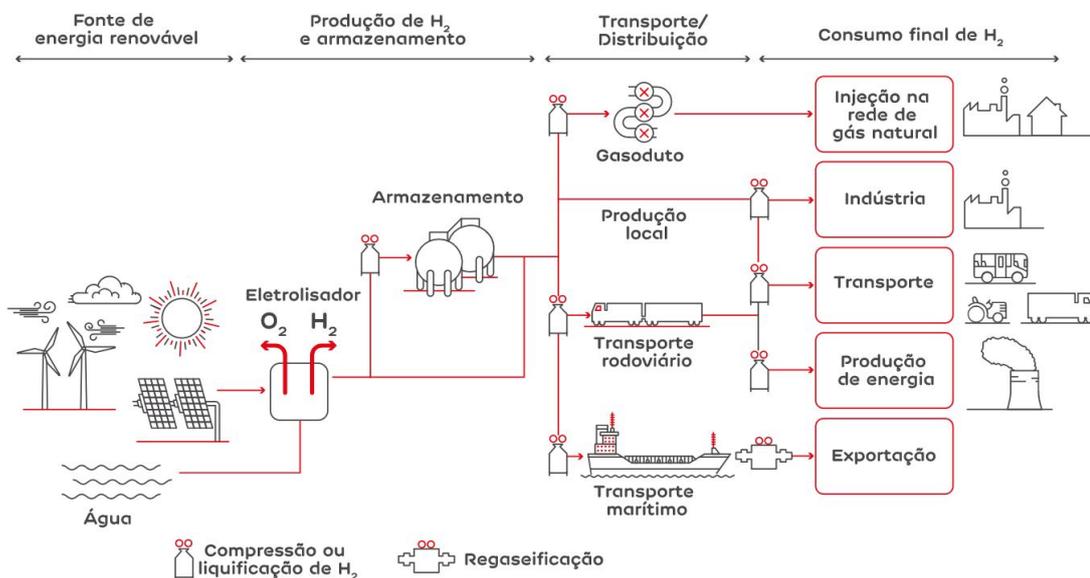
Uma usina industrial é uma instalação projetada para atender às demandas energéticas de processos produtivos em empreendimentos industriais. Essas usinas podem ser de diferentes tipos, como termelétricas, hidrelétricas ou outras fontes de geração, dependendo dos recursos disponíveis e das necessidades do empreendimento. Elas são estruturadas para garantir confiabilidade e continuidade no fornecimento de energia, utilizando sistemas como subestações, quadros de distribuição e equipa-

mentos de proteção para atender aos requisitos operacionais da indústria. Além de fornecer energia para o consumo próprio, algumas usinas também podem comercializar o excedente gerado, contribuindo para a eficiência energética e econômica do empreendimento (Mamede Filho, 2017).

Uma usina de hidrogênio verde é um tipo especializado de instalação de conversão de energia em que a energia proveniente do vento, do sol ou da água é convertida em eletricidade, facilitando a produção de hidrogênio verde por meio da utilização de equipamentos de eletrólise (Cfr, 2023; ENEL, 2024).

Os componentes fundamentais das usinas de hidrogênio verde (H2V) são essenciais para o processo de geração de hidrogênio, necessitando de uma fonte de energia sustentável para fornecer eletricidade, um sistema de bombeamento para pressurizar e transferir água, levando à operação do eletrolisador. Além disso, o eletrolisador desempenha um papel crítico na separação do hidrogênio da água, enquanto um compressor é vital para elevar a pressão do gás ao nível necessário para armazenamento ou utilização em diversas aplicações, conforme ilustra a Figura 9 (Rodrigues *et al.*, 2023).

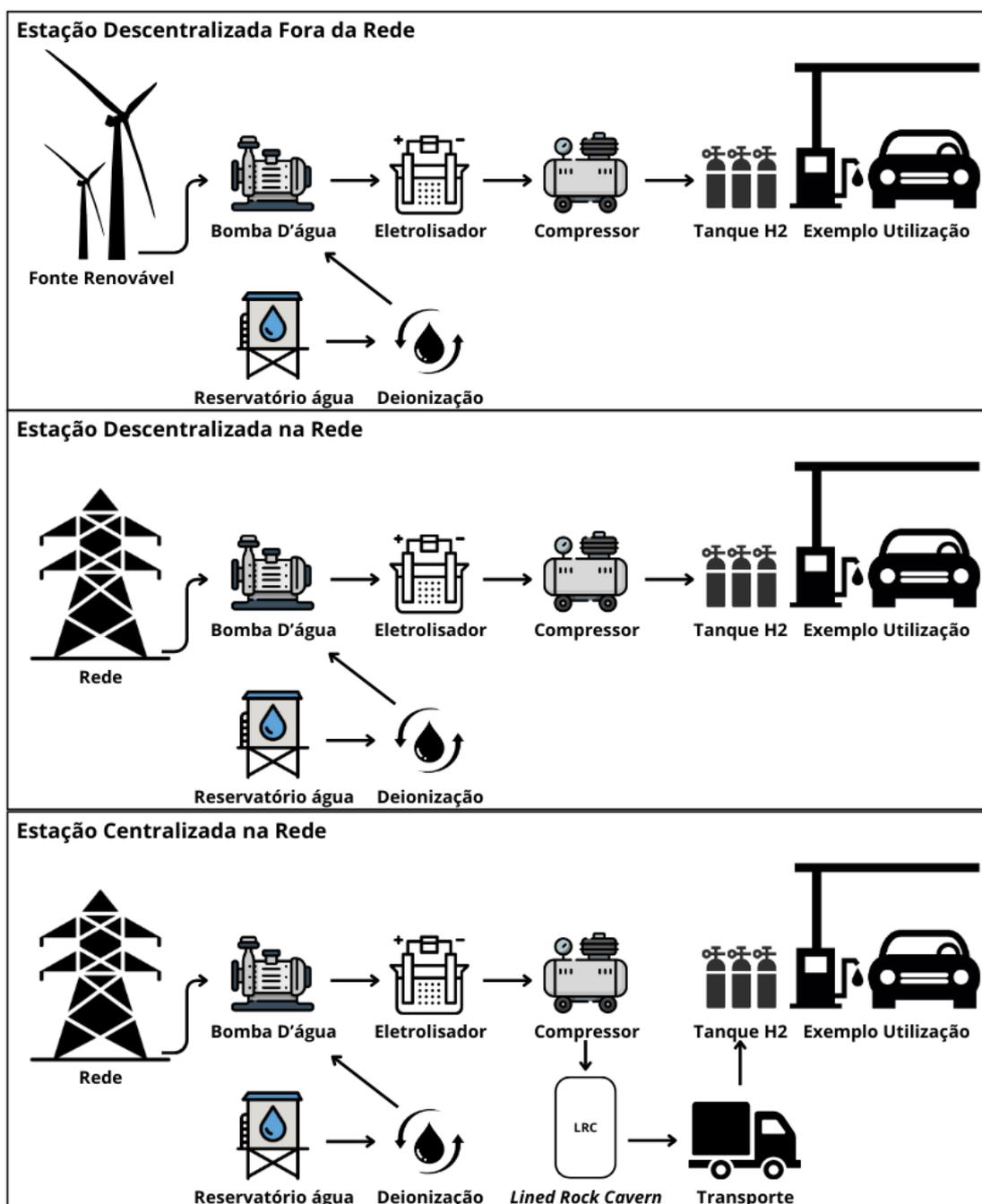
Figura 9 – Fluxograma H2V



Fonte: Portugal (2024)

As usinas de hidrogênio podem ser classificadas de várias maneiras, como usinas centralizadas ou descentralizadas, conectadas à rede e fora da rede, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Classificação de Usinas de Hidrogênio



Fonte: Autor (2024)

As estações descentralizadas fora da rede funcionam de forma independente, contando com instalações de energia eólica dedicadas situadas perto da usina de hidrogênio, normalmente localizadas nas proximidades do ponto de consumo, o que é particularmente adequado para produção em pequena escala (Bhandari; Shah, R., 2021).

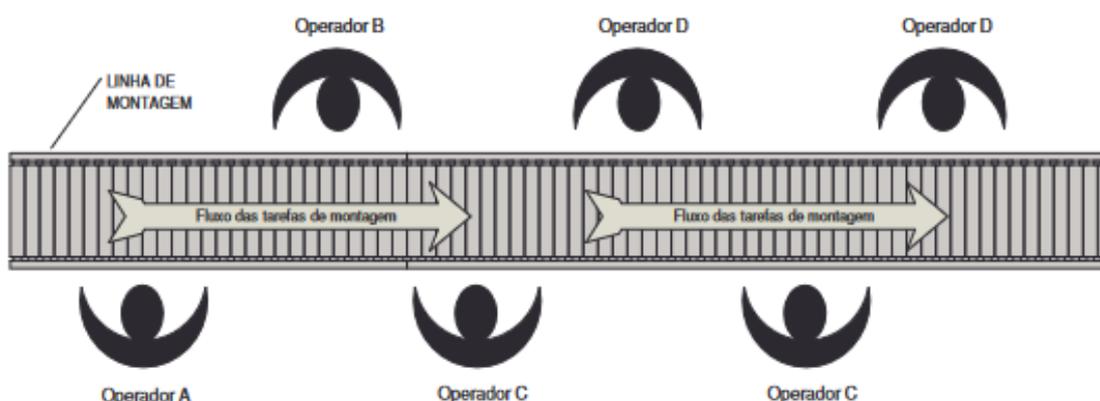
Por outro lado, estações descentralizadas conectadas à rede retiram eletricidade da rede elétrica local, evitando a necessidade de usinas eólicas adjacentes, embora a instalação de hidrogênio permaneça próxima do ponto de uso, adaptada para produção em média escala (Lundblad; Taljegard; Johnsson, 2023).

Finalmente, as estações centralizadas conectadas à rede são projetadas para produção em grande escala, conectadas à rede sem locais próximos de produção de hidrogênio renovável. Essas estações não estão situadas próximas ao ponto de consumo, necessitando de transporte eficiente de hidrogênio e duas metodologias de armazenamento: armazenamento excessivo de hidrogênio dentro da planta, geralmente utilizando cavernas rochosas revestidas (LRC) e armazenamento em locais de consumo de hidrogênio (Lundblad; Taljegard; Johnsson, 2023).

Para este estudo, a estação centralizada conectada à rede foi empregada, com foco na exportação onde é economicamente viável apenas em quantidades substanciais. No entanto, apesar da definição do tipo de produção, é necessário avaliar as diferentes formas de distribuir espacialmente os equipamentos e áreas de produção. Essa distribuição é denominada arranjo físico, e pode ser realizada de acordo com cinco tipos principais: por produto, por processo, celular, fixo e misto (Slack, 2024).

O arranjo físico por produto, popularizado por Henry Ford, caracteriza-se pela disposição dos processos em sequência, de forma contínua, onde cada etapa é posicionada imediatamente após a anterior. Nesse modelo, o fluxo segue um padrão fixo, o que resulta em um aumento da produtividade e eficiência, especialmente em linhas de produção em massa. A Figura 11 ilustra esse tipo de arranjo. Contudo, apesar de sua eficiência em produções de grande escala, esse arranjo pode ser pouco flexível em processos que demandam variações na linha produtiva (Peinado; Graeml, 2007; Leite, 2022).

Figura 11 – Arranjo Físico por Produto

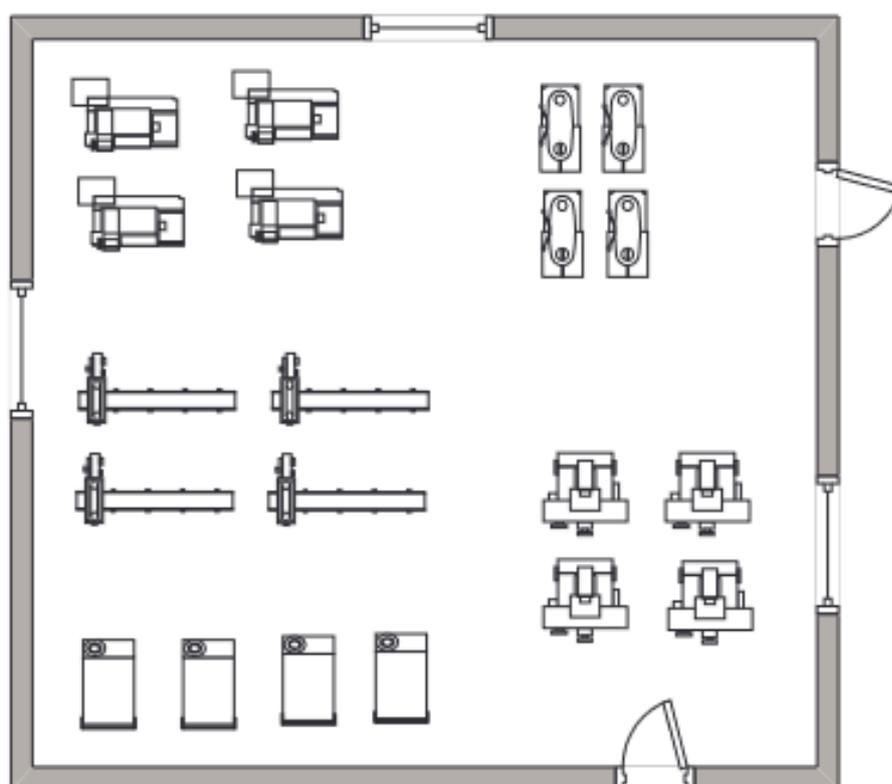


Fonte: Peinado e Graeml (2007)

Por outro lado, o arranjo por processo organiza os equipamentos e atividades

produtivas de forma que processos semelhantes sejam agrupados em setores específicos. Nesse modelo, o produto é movimentado entre os diferentes setores, conforme a necessidade de passar por determinadas operações. Isso permite maior flexibilidade, uma vez que nem todos os produtos precisam passar por todas as etapas produtivas, possibilitando a diversificação do portfólio. A Figura 12 exemplifica esse tipo de arranjo (Contador, 2010).

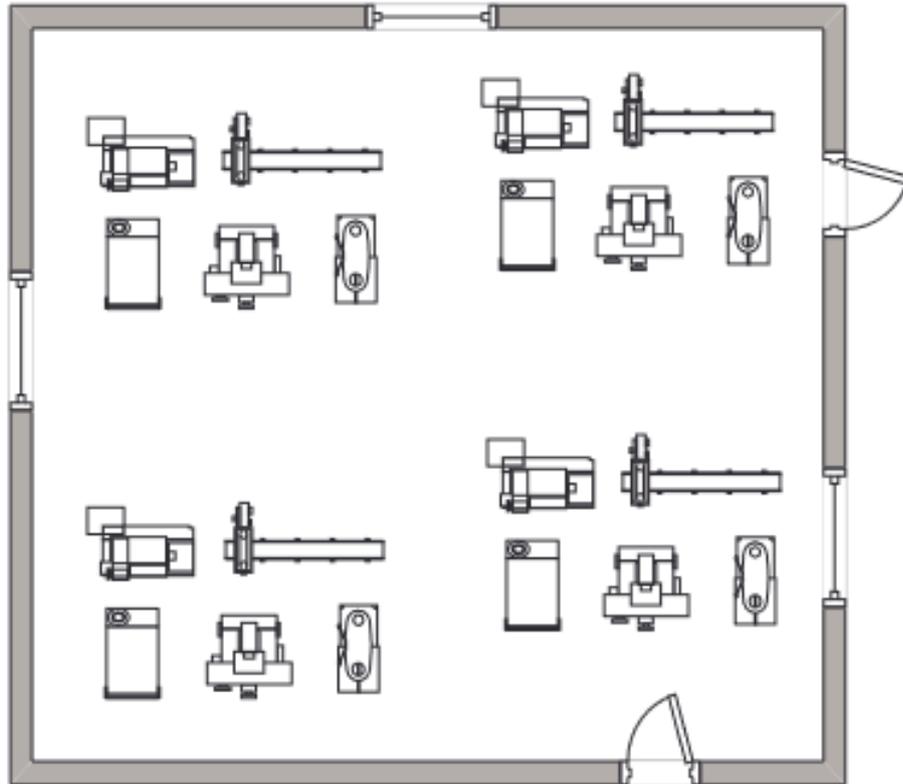
Figura 12 – Arranjo Físico por Processo



Fonte: Peinado e Graeml (2007)

O arranjo físico celular envolve a criação de células de produção, onde máquinas e equipamentos específicos são agrupados e em torno de um único produto ou uma pequena família de produtos. Esse arranjo se assemelha a uma mini linha de produção dentro de uma célula, onde todas as etapas necessárias para a fabricação de um determinado produto estão próximas, conforme ilustrado na Figura 13. O arranjo celular é mais eficiente quando o produto já está consolidado no mercado e não há grandes variações no design ou no processo produtivo. Alterações no produto podem acarretar custos significativos para reconfigurar a célula de produção (Peinado; Graeml, 2007; Leite, 2022).

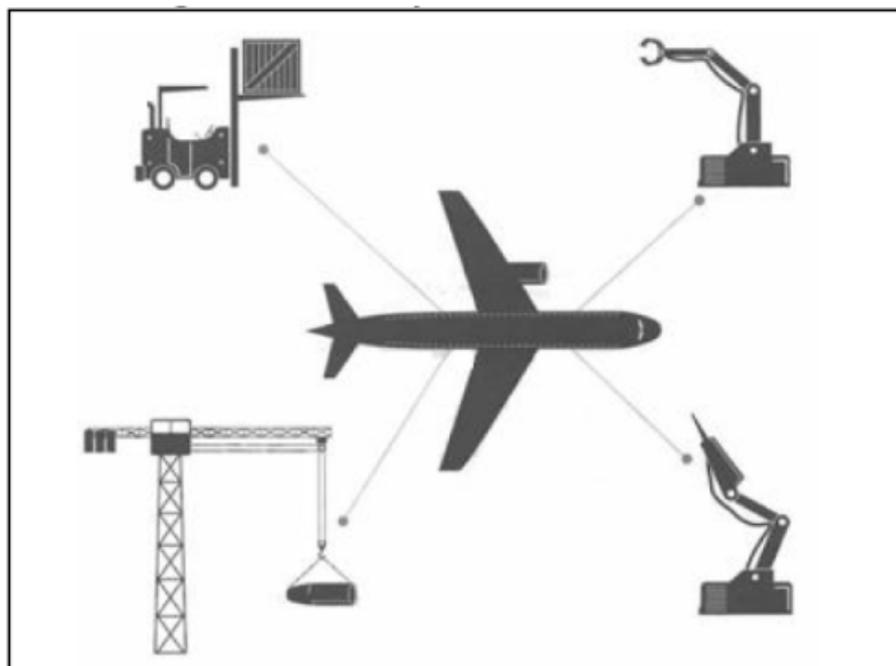
Figura 13 – Arranjo Físico Celular



Fonte: Peinado e Graeml (2007)

Já o arranjo por posição fixa é utilizado quando o produto é grande ou difícil de ser movido, como na construção de navios ou grandes equipamentos industriais. Nesse caso, os recursos, como máquinas, equipamentos e mão de obra, são deslocados até o local onde o produto está, e o processamento é realizado *in loco*. Esse tipo de arranjo é adequado para produções de grande porte ou produtos personalizados que exigem alta complexidade logística (Slack, 2024). A Figura 14 revela um exemplo da fabricação de um avião.

Figura 14 – Arranjo Físico por Posição Fixa



Fonte: Martins e Laugeni (2015)

Por fim, de acordo com Peinado e Graeml (2007) o arranjo misto combina dois ou mais dos tipos de arranjo físico, visando otimizar o processo produtivo ao aproveitar as vantagens de cada um. Esse arranjo busca flexibilidade e eficiência, permitindo que diferentes setores ou produtos utilizem diferentes formas de organização conforme suas características específicas.

Segundo Leite (2022), a escolha do arranjo físico ideal depende de diversos fatores, como o tipo de produto, o volume de produção, a necessidade de flexibilidade e as características do processo produtivo. No contexto de uma usina de hidrogênio verde voltada para exportação, a flexibilidade proporcionada pelo arranjo misto pode ser a mais adequada, permitindo a adaptação dos processos conforme a demanda e a necessidade de ajustes na produção. O Quadro 4 demonstra qual arranjo físico é melhor adequado em cada processo produtivo para produção de H<sub>2</sub>V e amônia.

Quadro 4 – Arranjo Físico para cada Processo

<b>PROCESSO</b>	<b>ARRANJO FÍSICO</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>
Geração de Energia Eólica	Arranjo por Posição Fixa	As turbinas são fisicamente fixas em um local externo, seja <i>onshore</i> ou <i>offshore</i> , portanto como não há forma de mobilidade, os recursos de equipamentos e manutenção se deslocam até as turbinas.
Tratamento de água	Arranjo por Produto	Devido ao alto nível de produção e o processo padronizado, esse tipo de arranjo garante continuidade do processo
Separador Criogênico	Arranjo Celuar	O processo de separação de ar utiliza tecnologia complexa, sendo necessário agrupar os componentes em pequenas linhas de produção para que se consiga escalar o processo.
Produção de Hidrogênio	Arranjo por Processo	Devido à necessidade de alta taxa de eletrólise, vários eletrolisadores são agrupados em um mesmo local, otimizando espaço e efetividade, permitindo expansão sem comprometer a planta.
Produção de Amônia	Arranjo por Processo	Agrupa os equipamentos necessários para a conversão de hidrogênio em amônia, como reatores de síntese e compressores, permitindo maior flexibilidade de produção.

Fonte: Autor (2024)

Com base nos conceitos apresentados ao longo deste capítulo, torna-se evidente que o desenvolvimento de uma usina de hidrogênio verde exige não apenas a compreensão das tecnologias envolvidas, mas também uma abordagem metódica para planejar a implementação dos processos produtivos e a distribuição espacial dos equipamentos. Desta forma, este capítulo apresentou definições e conceitos que serviram de base para a análise dos dados deste trabalho. Antes, porém, de prosseguir para os resultados e discussões, será apresentada a metodologia utilizada para a coleta e organização dos dados, assegurando a fundamentação técnica necessária para o desenvolvimento do estudo.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi elaborada com o intuito de garantir um desenvolvimento sistemático e detalhado do projeto de usina de hidrogênio verde no Brasil, com foco em energia eólica e exportação para a Europa. Para isso, as abordagens metodológicas foram selecionadas de modo a assegurar que os objetivos específicos fossem alcançados de maneira estruturada e coerente com a problemática apresentada. A aplicação de técnicas de análise de conteúdo e modelagem garantiu que as especificidades da produção de hidrogênio fossem contempladas em todas as etapas, desde a revisão bibliográfica até a simulação dos custos envolvidos.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo é categorizado no campo da metodologia qualitativa, pois se concentra na coleta de informações relativas ao *layout* das usinas de hidrogênio para analisar e modelar os intrincados processos envolvidos. A pesquisa qualitativa investiga aspectos da realidade que escapam à quantificação, enfatizando a compreensão e elucidação da dinâmica relacional. Em relação às metodologias técnicas, o estudo é definido como uma investigação bibliográfica e documental, dada sua dependência de dados e *insights* extraídos diretamente da literatura existente sobre o assunto, ao lado de fontes não científicas (Sampieri; Collado; Lucio, 2014).

Em termos de abordagens técnicas, a utilização de modelagem e simulação foi empregada para conceituar o comportamento do estudo (Gil, 2008). Os processos de modelagem e simulação oferecem uma ferramenta valiosa para diagnosticar problemas de desempenho e explorar complexidades dinâmicas, aprimorando assim a compreensão do contexto em questão e simplificando o processo de tomada de decisão (Morecroft, 2015; Oliveira, 2008).

À luz de seus objetivos, a pesquisa se caracteriza como descritiva, pois busca delinear as propriedades e atributos do fenômeno sob análise (Sampieri; Collado; Lucio, 2014).

Por fim, o estudo está enquadrado, com base na ABEPRO, na área de Engenharia de Operações e Processos da Produção, com a subárea em projeto de Fábrica e de Instalações Industriais: organização industrial, *layout/arranjo* físico.

#### 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para cada objetivo específico um procedimento metodológico foi adotado. O Quadro 5 elucida os objetivos específicos e como foram alcançados.

Quadro 5 – Objetivos Específicos e Procedimentos Metodológicos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROCEDIMENTO
1. Identificar os principais desafios e oportunidades no desenvolvimento de usinas de hidrogênio verde no Brasil, com base na energia eólica	Pesquisa Bibliográfica
2. Projetar uma usina de hidrogênio verde a partir de energia eólica	Método SLP + Pesquisa Documental + Método SYSMAP + Modelagem utilizando <i>softwares</i> CAD
3. Avaliar a viabilidade econômica da usina projetada de hidrogênio verde	Simulação utilizando o <i>Anylogic</i>
4. Avaliar o potencial de exportação da usina projetada de hidrogênio verde	Simulação utilizando o <i>Anylogic</i>

Fonte: Autor (2024)

Para concluir o objetivo 1, uma revisão da literatura foi conduzida para identificar os desafios e oportunidades para o estabelecimento de usinas de hidrogênio no Brasil.

Para finalizar o objetivo 2, o *layout* foi organizado com base na metodologia SLP, embasado pela pesquisa realizada nos bancos de dados *Scopus* e *web of science* (WoS) para reunir uma coleção abrangente de artigos relacionados aos termos de pesquisa especificados. Esses bancos de dados foram selecionados devido ao seu amplo uso no campo da engenharia de produção, seguido pela implementação de uma revisão estruturada da literatura usando a abordagem SYSMAP, por fim a modelagem foi conduzida utilizando o pacote *Factory Design* para desenvolver um modelo 3D da planta

Para alcançar os objetivos 3 e 4, foi utilizado o *software AnyLogic* para avaliar a viabilidade técnica da usina e seu potencial de exportação, considerando os custos envolvidos na exportação e o preço de compra da amônia.

### 3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura

O modelo utilizado é o *Scientometric and sYStematic yielding MApping Process* (SYSMAP) ao qual possui 4 fases bem estruturadas segundo Vaz e Maldonado (2017), sendo elas:

- i) Construção da coleção de artigos;
- ii) processo de filtragens;
- iii) Análise cientométrica
- iv) Contrução das lacunas/oportunidades de pesquisa

Para a primeira fase do estudo, o desenvolvimento do portfólio bibliográfico foi elaborado com base na pesquisa realizada em junho de 2024. Utilizando os recursos do banco de dados *Scopus* e do *Web of science*, em conjunto com o *software*

*Endnote*, compilando e organizando os arquivos de pesquisas em bancos de dados e posteriormente filtrando-os.

Dentro do banco de dados *Scopus*, a pesquisa foi conduzida utilizando parâmetros como título do artigo, resumo e palavras-chave. O processo de filtragem foi limitado exclusivamente aos artigos, com restrições específicas para artigos contendo as palavras-chave: *green hydrogen* e *power plant* e *wind energy* e *components* ou *equipment*. O resultado desse esforço de pesquisa é apresentado de forma eloquente no Quadro 6.

Quadro 6 – Resultado Base *Scopus*

<b>PALAVRAS RELACIONADAS</b>	<b>ARTIGOS ENCONTRADOS</b>
<i>green hydrogen e power plant e wind energy e components ou equipment</i>	25

Fonte: Autor (2024)

Além disso, dentro da extensão do banco de dados *Web of Science*, palavras-chave idênticas foram empregadas para a pesquisa, com uma exploração abrangente conduzida em todos os campos do banco de dados. Os resultados dessa exploração são apresentados no Quadro 7.

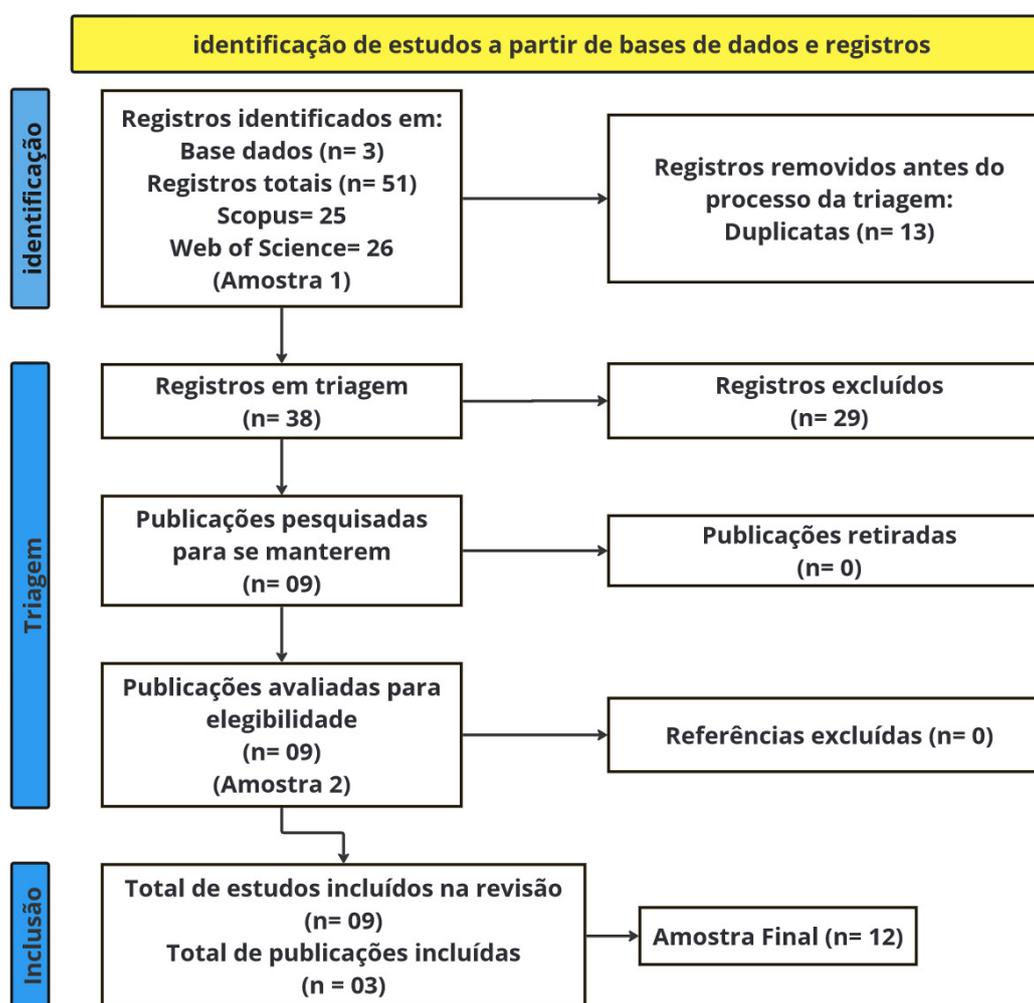
Quadro 7 – Resultado Base *Web of Science*

<b>PALAVRAS RELACIONADAS</b>	<b>ARTIGOS ENCONTRADOS</b>
<i>green hydrogen e power plant e wind energy e components ou equipment</i>	26

Fonte: Autor (2024)

Em essência, um total de 25 artigos foram adquiridos da *Scopus* e outros 26 artigos foram retirados do banco de dados *Web of Science*, resultando em um total combinado de 51 artigos para análise, sendo esses a amostra 1. A fase subsequente envolve uma filtragem para eliminar artigos duplicados, seguida por uma análise completa dos artigos retidos com base no título, palavras-chave e resumo. Artigos que não se alinham com o tópico da pesquisa são sistematicamente excluídos. Após o processo de filtragem, restaram um total de 9 artigos, que foram lidos na íntegra. Isso marca a fase final da metodologia SYSMAP, onde o alinhamento dos artigos com o estudo em andamento é verificado mais uma vez. Além disso, foram incluídos mais 3 artigos, considerados relevantes para o estudo, apesar de não fazerem parte da amostra inicial, resultando em um total de 12 artigos que compõem a amostra definitiva. As etapas detalhadas desse processo são ilustradas na Figura 15.

Figura 15 – Etapas da Revisão Estruturada



Fonte: Autor (2024)

### 3.2.1.1 Coleta de dados

A coleta de dados para a identificação dos componentes de um complexo eólico, uma usina de hidrogênio verde, uma unidade de separação de ar e uma unidade de produção de amônia ocorreu através da revisão sistemática, ao qual o Quadro 8 elucida um resumo dos principais pontos de cada artigo presente na revisão.

Quadro 8 – Resumo da Revisão Sistemática

<b>Componente Identificado</b>	<b>Autor</b>
Tanque de H <sub>2</sub> ; Tanque de NH <sub>3</sub> ; Navios	(Osorio-Tejada; Tran; Hessel, 2022)
Composição eletrolisadores industriais	(Zhong <i>et al.</i> , 2023)
Turbinas Eólicas; Subestação <i>offshore</i>	(Woznicki; Sollicec; Loisel, 2020)
Turbinas Eólicas; Eletrolisadores industriais; Estação de tratamento de água	(Lucas <i>et al.</i> , 2022)
Eletrolisador; Sistema de resfriamento	(Jacob; Zhang, J., 2023)
Tanque de H <sub>2</sub> ; Eletrolisador; Retificador	(Kudrya <i>et al.</i> , 2023)
Composição eletrolisadores industriais; Sistema de resfriamento	(Keller <i>et al.</i> , 2022)
Tanque de H <sub>2</sub> ; Eletrolisador	(Borge-Diez <i>et al.</i> , 2023)
Tanque de H <sub>2</sub> ; Eletrolisador	(Adedoja <i>et al.</i> , 2023)
Tanque de H <sub>2</sub> ; Eletrolisador	(Al-Mufachi; Shah, N., 2022)
Haber-Bosch; Unidade de Separação de Ar; Eletrolisador	(Nayak-Luke; Banares-Alcántara; Wilkinson, 2018)
Turbinas Eólicas	(Trapp, 2009)

Fonte: Autor (2024)

No entanto, os artigos utilizados na revisão sistemática não foram suficientes para mapear integralmente o processo produtivo e os componentes envolvidos. Por isso, foi necessário complementar a pesquisa com consultas descentralizadas na *internet* e em catálogos comerciais, a fim de identificar as soluções tecnológicas disponíveis e em desenvolvimento.

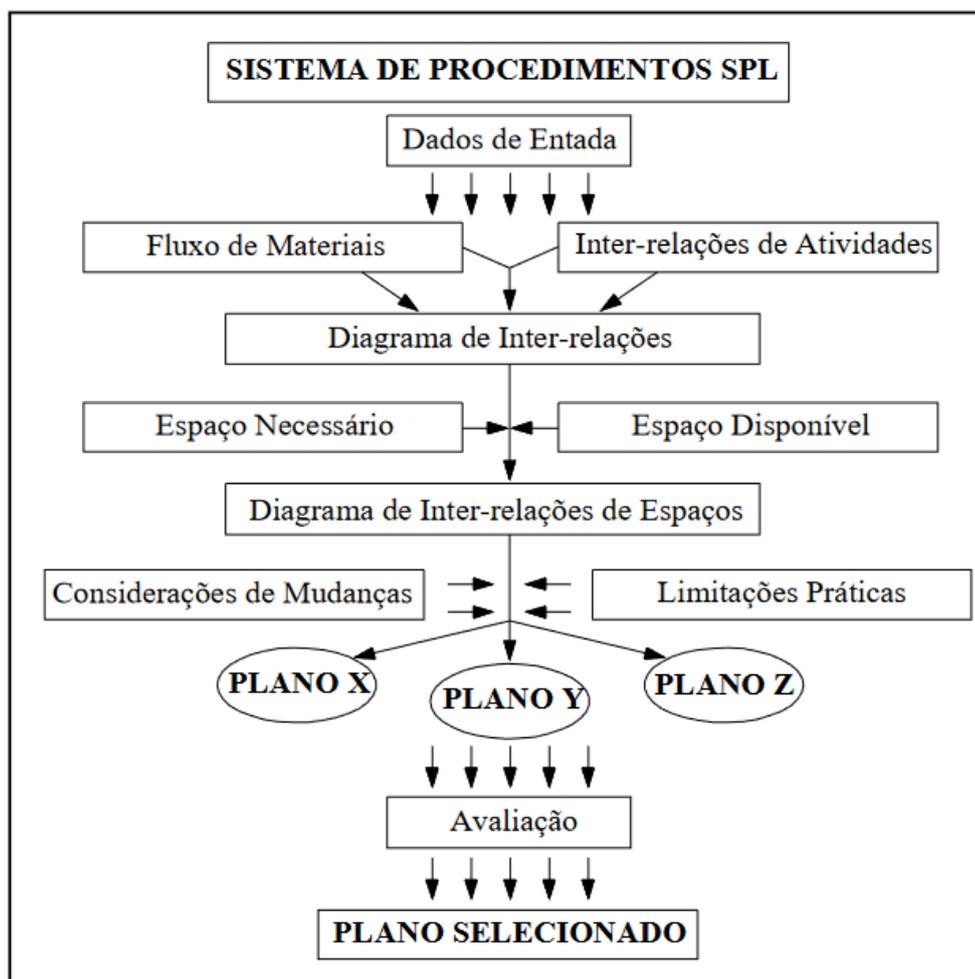
### 3.2.2 Método SLP

O método SLP, desenvolvido por Muther (1978), se destaca como uma abordagem amplamente reconhecida para criar novos *layouts* ou reestruturar os existentes. O objetivo fundamental desse método é otimizar a eficiência analisando cuidadosamente as relações entre diferentes setores dentro de uma organização, abrangendo os intrincados fluxos de colaboradores, materiais e informações (Tortorella; Fogliatto, 2008; Amorim *et al.*, 2023).

Estruturado em quatro fases distintas, conforme exposto por Muther (1978), a saber, localização, arranjo físico geral, arranjo físico detalhado e implantação, o método oferece uma estrutura sistemática para aprimorar os projetos de *layout*. Dadas as restrições deste estudo, somente as fases de localização e arranjo físico geral serão executadas.

No domínio do arranjo físico, Muther (1978) fornece um fluxograma abrangente delineando as etapas sequenciais para o desenvolvimento de um *layout* eficiente, representado na Figura 16.

Figura 16 – Sistema de Procedimentos SLP

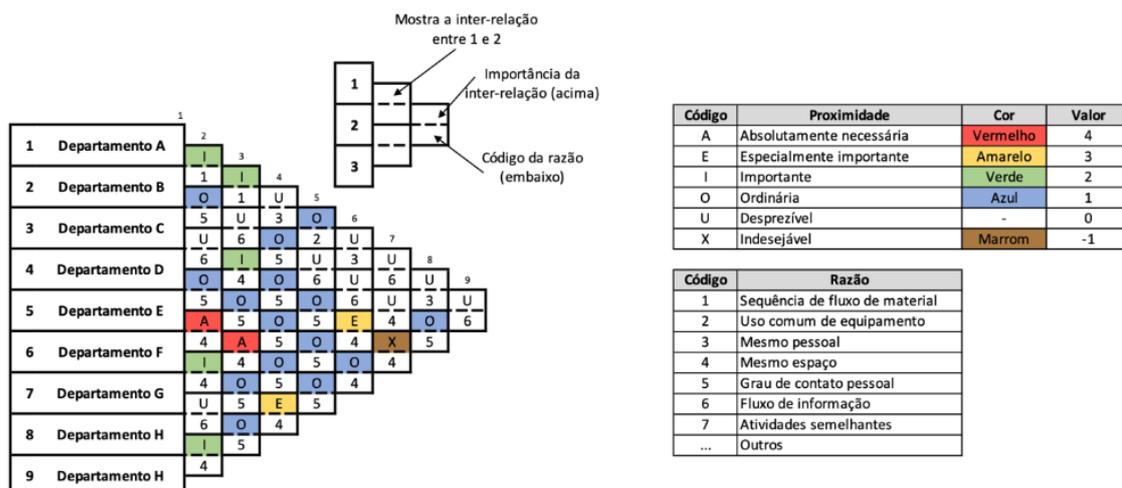


Fonte: Elias *et al.* (1998)

### 3.2.2.1 Diagrama de Inter-Relações

O diagrama de inter-relações serve como uma representação visual dos níveis de interconexão e afinidade entre diferentes setores dentro de uma fábrica. A criação desse diagrama requer o desenvolvimento preliminar de um diagrama de relações, com o objetivo de avaliar os setores em termos de fluxos de materiais e equipamentos. Esse processo é claramente exemplificado na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama Relações



Fonte: Amorim *et al.* (2023)

Posteriormente, o diagrama de inter-relação é montado, aderindo aos níveis de proximidade estabelecidos no diagrama de relação inicial, representado na Figura 18.

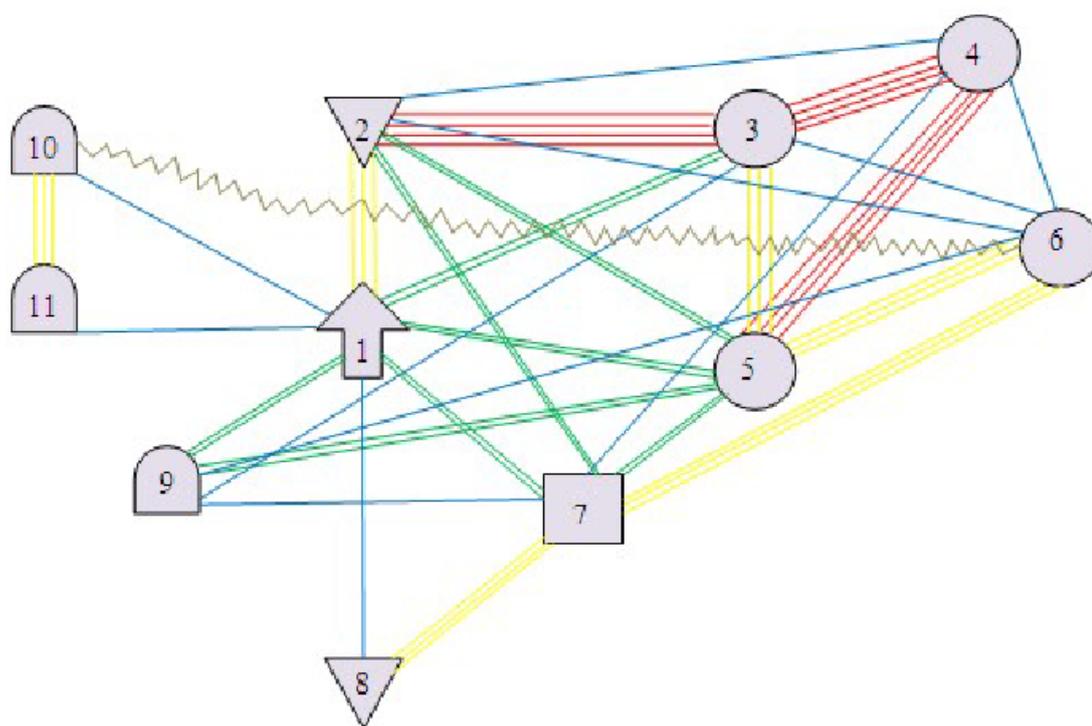
Figura 18 – Simbologia Inter-Relação

Valor	Inter-relação	Símbolo	Cor
A	Absolutamente necessária		Vermelho
E	Especialmente importante		Amarelo
I	Importante		Verde
O	Ordinária		Azul
U	Desprezível		-
X	Indesejável		Marrom

Fonte: Amorim *et al.* (2023)

O processo de construção do diagrama de interação envolve uma abordagem sistemática, começando com o *design* de inter-relações essenciais e progredindo para outras menos cruciais. Esse método é iterativo, exigindo tentativa e erro para alcançar o arranjo ideal das relações entre os setores, conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de Inter-Relações

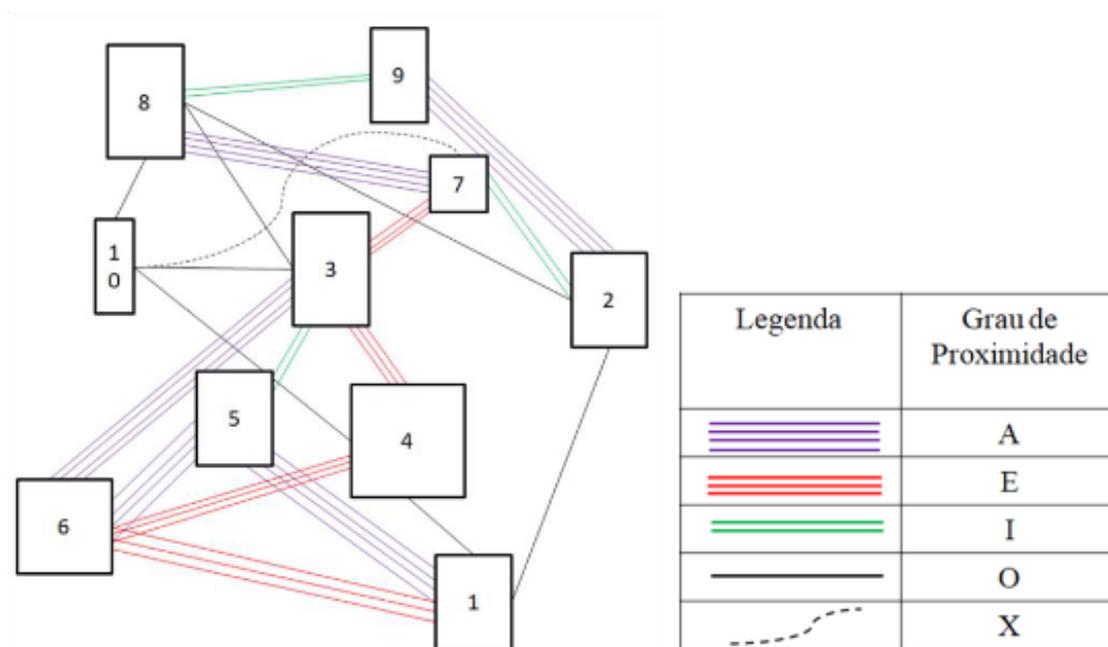


Fonte: Britto e Gois (2015)

### 3.2.2.2 Diagrama de Inter-Relação de Espaços

O Diagrama de Inter-relação de Espaços leva em consideração a capacidade de disposição física de elementos-chave, como mão de obra, materiais e equipamentos utilizados em várias atividades, influenciando o *layout* físico. Com base nessas informações e no diagrama de inter-relações, o diagrama espacial é elaborado para definir as posições dos setores dentro da instalação. Inúmeros ajustes são essenciais para alcançar um *layout* satisfatório e viável (Muther, 1978; Corrêa; Volante, 2019). O diagrama está representado na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços



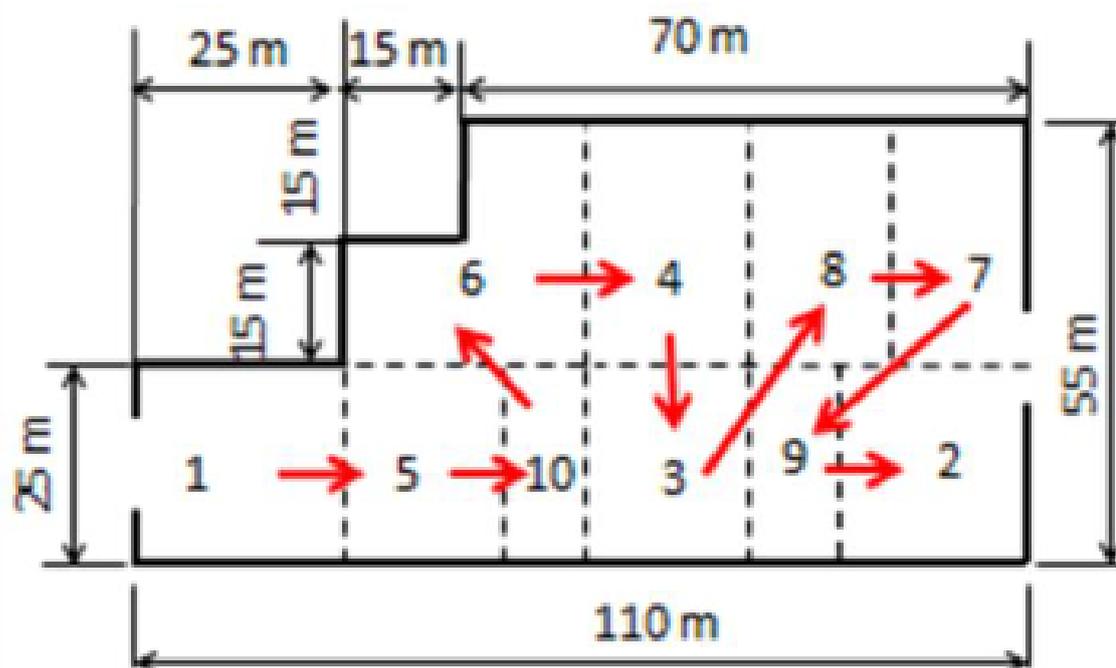
Fonte: Corrêa e Volante (2019)

### 3.2.2.3 Validação de *layout*

Ao finalizar o diagrama de inter-relação espacial, uma avaliação é necessária para determinar a adequação do *layout*, sendo um método comumente utilizado, a Razão de Adjacência (RA), ao qual sua fórmula é descrita pela Equação 1 (OJAGHI *et al.*, 2015).

$$RA = \frac{\text{Conexões Percebidas}}{\text{Conexões Totais}} \quad (1)$$

Esta avaliação examina a presença de adjacência entre os blocos do diagrama de inter-relação espacial, conforme ilustrado na Figura 21. Ao observar a convergência do *layout*, é possível identificar proximidades ativas e descontinuadas, com a métrica RA precisando exceder 85% para que o *layout* possa ser considerado funcional (Muther, 1978; Ojaghi *et al.*, 2015).

Figura 21 – Exemplo *Layout* após Diagrama

Fonte: Corrêa e Volante (2019)

### 3.2.3 Softwares

O *layout* da usina de hidrogênio foi criado com base no diagrama de espaços usando o pacote de *software Autodesk Factory Design Utilities*. Composta por *AutoCAD*, *Inventor* e *Naviswork*, essa integração combina dados de construção e equipamentos para formar *layouts* de instalações de produção (Antonov, 2018).

Inicialmente, o *AutoCAD* foi empregado para dimensionar e alinhar com os requisitos do projeto descritos na metodologia SLP, resultando em um modelo 3D. Posteriormente, o *Inventor* foi utilizado para manipular a linha de produção considerando materiais, pessoal, maquinário e ferramentas. O *layout* 3D final do *Inventor* foi refinado no *Navisworks* para detectar problemas como interferência de máquinas ou restrições de espaço (González *et al.*, 2021; Carreiró, 2018).

Além disso, o *AnyLogic* foi utilizado para modelar cenários de investimento, considerando a redução dos custos de investimento inicial projetada para o ano de 2030, e para avaliar o impacto dessas variações no *payback* do projeto. O software aproveita seus recursos de simulação em diversos domínios, como manufatura e logística, para oferecer uma análise integrada e dinâmica. A interface do *AnyLogic* facilita a modelagem de ambientes complexos, utilizando sistemas dinâmicos, eventos discretos e métodos de programação baseados em agentes (Almeida, 2023; Grigoryev, 2015).

## 4 RESULTADOS

Este capítulo delinea as descobertas derivadas dos procedimentos metodológicos previamente articulados e aborda um discurso sobre suas implicações no âmbito do projeto de uma usina de hidrogênio verde. Os componentes e a localização do *layout*, as as inter-relações estabelecidas entre os setores e os critérios técnicos empregados para garantir uma configuração eficiente e integrada são examinados.

Além disso, este capítulo avalia a viabilidade técnica e econômica da iniciativa, examinando os custos associados e os efeitos prospectivos dos avanços tecnológicos no desempenho da usina.

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DA USINA DE HIDROGÊNIO VERDE

A definição da localização ideal e a seleção dos componentes necessários para a planta de hidrogênio verde são etapas fundamentais que orientam o desenvolvimento do *layout*, tornando-se, assim, o primeiro tópico a ser explorado.

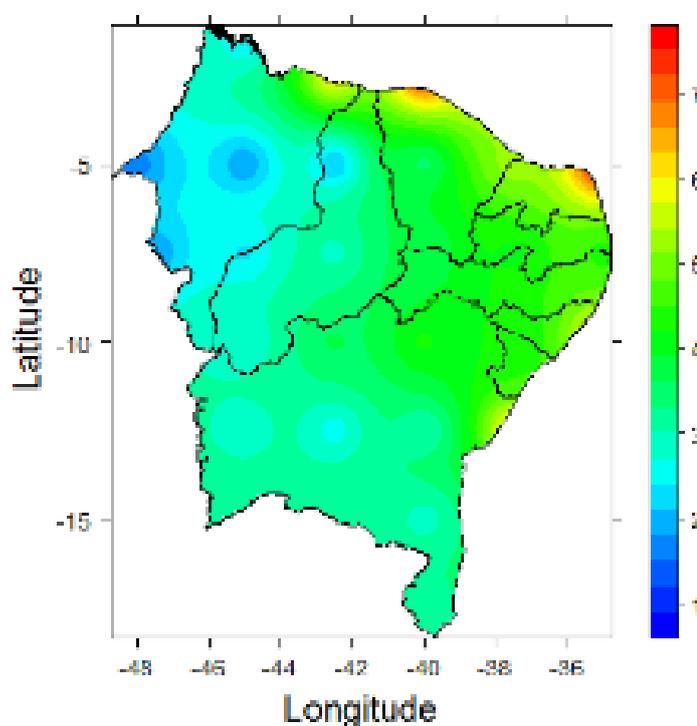
#### 4.1.1 Localização

A escolha da localização ideal para a instalação de uma usina de hidrogênio verde determina a eficiência operacional e a viabilidade econômica do projeto. De acordo com M. Costa (2024), a análise de macrolocalização deve levar em consideração fatores relacionados à proximidade de fontes de energia renováveis, infraestrutura logística para exportação e disponibilidade de recursos hídricos, todos fundamentais para a implementação de uma usina desse porte.

##### 4.1.1.1 Proximidade de Fontes de Energia Renovável

A energia renovável, neste caso a eólica *offshore*, é essencial para garantir a produção contínua de hidrogênio verde por eletrólise, que depende de um fornecimento estável de eletricidade. O litoral nordestino do Brasil, especialmente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, conforme ilustrado na Figura 22, apresenta condições ideais para a geração de energia eólica *offshore*, com ventos constantes e de maior intensidade, proporcionando uma base sólida para a produção de hidrogênio verde (Murat, 2023; Abdin *et al.*, 2020).

Figura 22 – Velocidade do Vento Nordeste



(a)

Fonte: Santana (2018)

Embora a velocidade média dos ventos nessas regiões atinja 7 m/s em algumas áreas específicas, como indicado no estudo de Santana (2018), a regularidade e consistência tornam o litoral nordestino altamente favorável para a geração contínua de eletricidade por meio de turbinas eólicas *offshore* (Akwa, 2010; Abeeólica, 2021).

#### 4.1.1.2 Infraestrutura Logística para Exportação

A proximidade da usina com portos e rodovias é outro critério essencial, já que o hidrogênio produzido deverá ser exportado para mercados internacionais. O Porto de Pecém, no Ceará, é um dos principais *hubs* logísticos do Brasil, localizado em uma região estratégica, próxima aos mercados da Europa, América do Norte e Oriente Médio. O porto tem crescido rapidamente, com um aumento médio de 19,5% ao ano, nos últimos dez anos, demonstrando seu importante papel na movimentação de cargas industriais (Pecém, 2021).

Além disso, o Complexo do Pecém oferece uma Zona de Processamento de Exportação (ZPE), que proporciona benefícios fiscais altamente competitivos, como

isenção de impostos federais, estaduais e municipais, para empresas voltadas para a exportação. O porto também possui infraestrutura portuária robusta e está em expansão, com a construção de novas conexões ferroviárias para melhorar ainda mais o acesso logístico. O acordo com o Porto de Roterdã visa criar um corredor logístico eficiente para a exportação de hidrogênio verde, posicionando Pecém como um *player* global na cadeia de valor do hidrogênio (Teixeira; Silva, V.; Artsenk, 2023).

O porto já conta com infraestrutura de suporte para produção, armazenamento e exportação de hidrogênio verde, com metas de exportar 1,3 milhão de toneladas por ano até 2030. Além disso, a proximidade com as rotas marítimas que conectam a América do Sul à Europa e América do Norte fortalece sua posição estratégica para o escoamento da produção de hidrogênio verde, facilitando o comércio internacional (Pecém, 2021)

Nesse sentido, o Porto de Suape, em Pernambuco, e outras infraestruturas costeiras do Nordeste, oferecem condições adequadas para a exportação, incluindo rotas marítimas eficientes que facilitam o transporte do hidrogênio para mercados externos (Carvalho, E., 2022). A boa conectividade rodoviária e a proximidade com o porto são vantagens logísticas que reduzem os custos de transporte interno e agilizam a cadeia produtiva (Barroso *et al.*, 2022).

#### 4.1.1.3 Disponibilidade de Recursos Hídricos

O processo de eletrólise utilizado para a produção de hidrogênio requer grandes quantidades de água, sendo necessário garantir o acesso a recursos hídricos adequados. A proximidade com fontes de água doce, como rios ou lagos, é essencial para abastecer a usina, evitando a necessidade de dessalinização, que implica em custos operacionais adicionais (Abeeólica, 2021).

A região Nordeste, especialmente o estado do Ceará, conta com importantes reservatórios de água doce, como o Açude Castanhão, que possui capacidade de armazenamento de 6,7 bilhões de metros cúbicos, sendo o maior reservatório da região. O Canal da Integração conecta o Castanhão ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém, garantindo o abastecimento de água para o desenvolvimento industrial e para projetos produtivos regionais (Cabral; Sousa; Oliveira, V., 2015). Essa infraestrutura permite um fornecimento contínuo de água doce, suprindo de forma sustentável as necessidades da usina de hidrogênio verde.

A gestão eficiente desses recursos hídricos, com práticas de captação e reutilização de água, pode minimizar o impacto ambiental, assegurando a continuidade do fornecimento hídrico para a produção de hidrogênio (Murat, 2023).

#### 4.1.2 Escolha Macrolocalização

Considerando os critérios propostos por M. Costa (2024), a região Nordeste do Brasil, especialmente os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, é ideal para a instalação de uma usina de hidrogênio verde. A proximidade de fontes de energia renovável, como a energia eólica offshore, aliada à infraestrutura logística avançada e ao acesso sustentável a recursos hídricos, garante que essa localização seja altamente eficiente e econômica para o projeto. Esses fatores proporcionam uma base sólida para o desenvolvimento da usina, permitindo a produção de hidrogênio verde em larga escala com impacto ambiental minimizado (Abdin *et al.*, 2020; Murat, 2023; Costa, P.; Nunes; Oliveira, V., 2023).

#### 4.1.3 Nível de Produção

O nível de produção da usina de hidrogênio verde é um fator determinante da escala e viabilidade econômica do projeto. Segundo Barroso *et al.* (2022) e R. Oliveira (2022), projetos de hidrogênio verde em diferentes partes do mundo variam em escala, como demonstra o Quadro 9, e indicam uma tendência de megaprojetos, com produção anual de hidrogênio que ultrapassa centenas de milhares de toneladas. Esses projetos são necessários para atender à crescente demanda global por energia limpa.

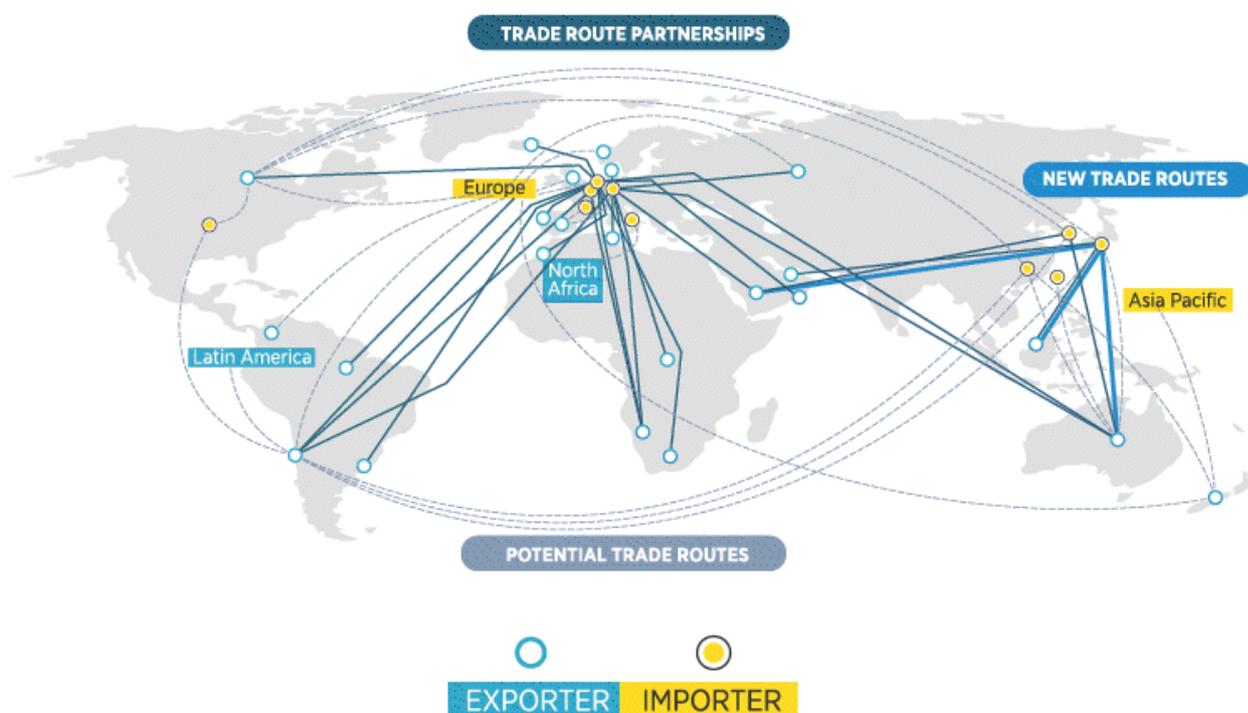
Quadro 9 – Escala de Usinas de Hidrogênio

<b>LOCAL</b>	<b>ESCALA DE PRODUÇÃO</b>
Austrália	830375 toneladas/ano
Austrália	500000 toneladas/ano
China	11863 toneladas/ano
China	296563 toneladas/ano
Arábia Saudita	237250 toneladas/ano

Fonte: Adaptado de Barroso *et al.* (2022) e R. Oliveira (2022)

Nota-se que os projetos são de grande escala, no entanto, muitos países ainda não conseguem suprir a demanda doméstica, o que cria oportunidades para o Brasil se posicionar como um exportador de hidrogênio verde. A Figura 23 ilustra as principais rotas de importação e exportação de hidrogênio verde, com destaque para o papel do Brasil como fornecedor para mercados na Europa.

Figura 23 – Rotas de Exportação e Importação



Fonte: IRENA (2022)

Concentrando-se no mercado europeu, a necessidade prevista de hidrogênio verde no ano de 2030 é estimada em 30 TWh dentro de uma estrutura conservadora, e pode aumentar para 140 TWh em um cenário alternativo que englobe a descarbonização total da economia até o ano de 2050. (Wietschel *et al.*, 2020). Para converter esse consumo energético em quilogramas de hidrogênio, considera-se que são necessários 47 kWh para produzir 1 kg de H<sub>2</sub>, o que resulta em uma produção total projetada de até 2,98E+9 toneladas/ano (Bertuccioli *et al.*, 2014). A alta demanda indica que qualquer capacidade produtiva implantada será integralmente absorvida.

Portanto a escolha da capacidade da usina de hidrogênio em estudo se dará pelas usinas já em construção, tendo como escopo a capacidade de planta de 3 GW, com uma produção anual de aproximadamente 510000 toneladas de hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), considerando operação de 8.000 horas por ano.

A duração operacional anual foi estabelecida em 8.000 horas, com base na recorrência desse valor na literatura referente às instalações de produção de hidrogênio (Asuachem, 2022; Singh; Ratn; Jha, 2024; Magazine, 2024).

#### 4.1.4 Componentes para Usina de Hidrogênio Verde

Cada componente é indispensável em uma instalação de produção de hidrogênio; portanto, esta seção é dedicada a elucidar os mecanismos operacionais de cada

constituente dentro do fluxo produtivo do hidrogênio, englobando desde a geração de energia eólica até a exportação da amônia, passando pelo processo de eletrólise da água, separação do nitrogênio do ar e síntese da amônia.

#### 4.1.4.1 Complexo Eólico

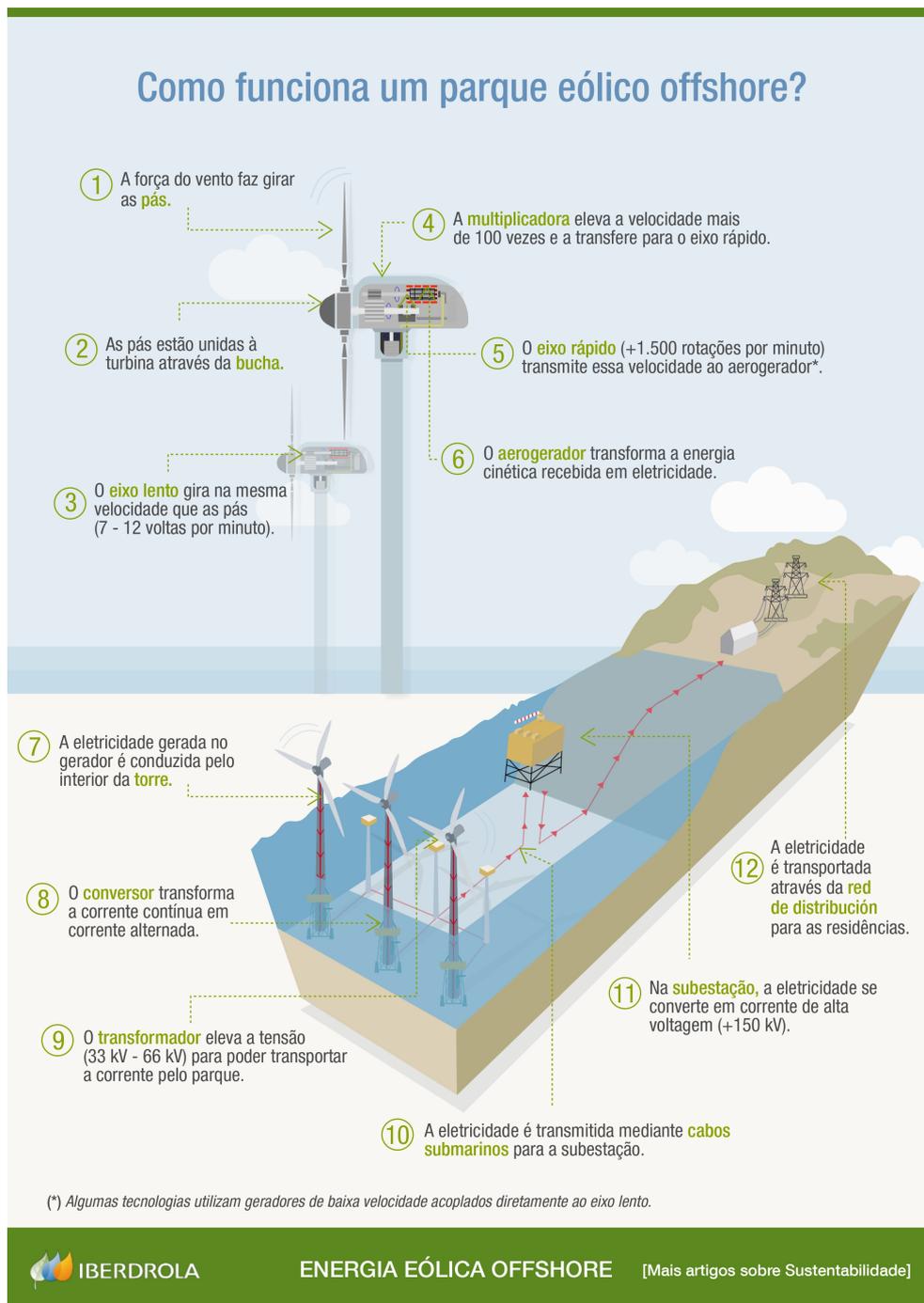
A energia eólica *offshore*, estudada neste trabalho, utiliza turbinas posicionadas em regiões marinhas com profundidade de até 50 metros. Esse tipo de geração de energia vem crescendo globalmente devido à maior disponibilidade de recursos eólicos de qualidade em mar aberto, além da limitação de espaço em terra. A previsão é que a capacidade instalada dos complexos eólicos offshore atinja 500 GW até o ano de 2050 (Lucas *et al.*, 2022; Woznicki; SOLLIEC; Loisel, 2020).

Os complexos eólicos *offshore* são constituídos por turbinas similares às tecnologias utilizadas em terra, porém com pás de maior diâmetro, a fim de aumentar a eficiência energética. As turbinas eólicas possuem os principais componentes responsáveis pela conversão de energia mecânica em energia elétrica, tais como: caixa multiplicadora, aerogerador, conversor e transformador. A energia gerada por essas turbinas é transmitida para uma subestação elétrica *offshore* por meio de cabos submarinos interligados, onde a tensão é elevada para reduzir as perdas durante a transmissão para a costa (Woznicki; Sollic; Loisel, 2020; Trapp, 2009).

A subestação elétrica *offshore* desempenha um papel crucial ao elevar a tensão da corrente gerada para níveis de até 600 kV (Ferreira, L., 2019), o que minimiza as perdas elétricas durante o transporte da energia até a costa. Essa transmissão ocorre por meio de cabos submarinos projetados para resistir às condições adversas do ambiente marinho, como a salinidade e a pressão da água (Woznicki; Sollic; Loisel, 2020).

A Figura 24 ilustra o funcionamento de um complexo eólico *offshore* e a utilidade de cada componente no processo de geração de energia.

Figura 24 – Complexo Eólico



Fonte: Iberdrola (2024)

Entretanto, diferentemente do que foi descrito na etapa 12 a conexão final será feita diretamente com uma subestação *onshore* conectada a um eletrolisador, conforme recomendado por Kudrya *et al.* (2023). A conexão direta da eletricidade gerada pelas turbinas com o eletrolisador, utilizando um retificador antes de chegar ao eletrolisador, é considerada uma das melhores práticas para maximizar a eficiência do processo de

eletrólise, uma vez que elimina as perdas associadas à conexão via rede elétrica, No entanto, para níveis elevados de tensão provenientes de geração na escala de GW, torna-se mais seguro e eficaz realizar a conexão prévia com a subestação *onshore*, desde que esta esteja a uma curta distância do eletrolisador. (Kudrya *et al.*, 2023).

Além da infraestrutura de geração de energia, o complexo eólico offshore necessita de uma unidade de apoio para operação e manutenção. Esta unidade é localizada em um porto industrial próximo, garantindo o suporte logístico necessário para o transporte de materiais e mão de obra, que ocorre por meio de barcos ou helicópteros (Hersenius; Moller, 2011).

Com base nos estudos de Correia e Azevedo (2023), optou-se por utilizar turbinas eólicas de 15 MW, que já estão disponíveis comercialmente e são consideradas altamente eficientes. Para atender à exigência de 3 GW de produção de energia, seria imperativo instalar 200 turbinas com essa capacidade de geração. Essa quantidade é considerada viável, uma vez que existem processos de licenciamento para complexos de energia eólica no Brasil com capacidades superiores a 9 GW (Correia; Azevedo, 2023).

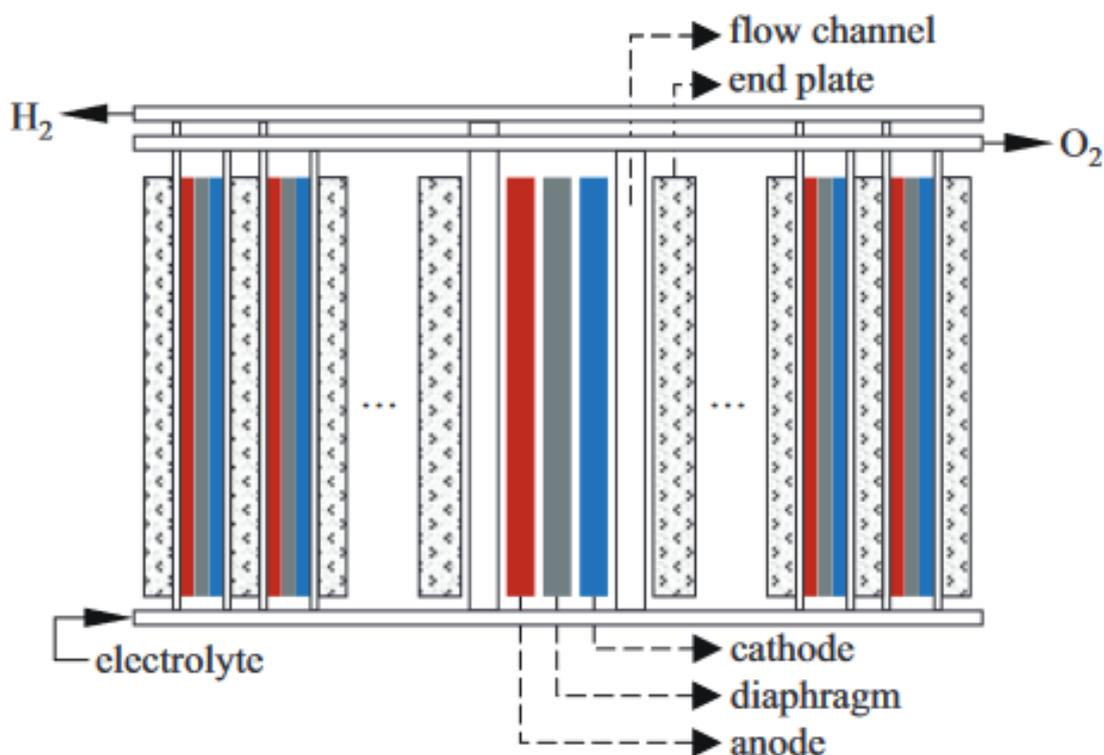
#### 4.1.4.2 Planta de Produção H2V

A planta de produção de H2V consiste em um grupo de eletrolisadores, uma unidade de tratamento de água, tanques de armazenamento de hidrogênio e uma unidade de resfriamento, interconectados para garantir um fluxo contínuo e um baixo risco de explosões. O eletrolisador desempenha o papel central, utilizando eletrólise para dividir a água em hidrogênio e oxigênio, um processo altamente sensível a flutuações de carga (Woznicki; Sollicec; Loisel, 2020; Lucas *et al.*, 2022; Jacob; Zhang, J., 2023)

No contexto deste projeto, escolheu-se o eletrolisador PEM, conhecido por sua alta eficiência e capacidade de reagir rapidamente às variações de carga associadas à energia eólica e outras fontes renováveis. Essa tecnologia é particularmente eficaz em cargas parciais, além de ser modular e compacta, facilitando a instalação de várias unidades em paralelo para alcançar a produção em grande escala. Um exemplo dessa modularidade é uma célula eletrolítica de 100 kW, composta por duas pilhas de 50 kW, ocupando uma área de apenas 300 cm<sup>2</sup> (Lucas *et al.*, 2022; Keller *et al.*, 2022; Al-Mufachi; Shah, N., 2022).

Cada eletrolisador industrial contém múltiplas células empilhadas como mostra a Figura 25, com a eficiência do sistema dependendo da soma das tensões individuais das células e a eficiência do eletrolisador sendo aproximadamente a eficiência de um único módulo (Keller *et al.*, 2022; Lucas *et al.*, 2022).

Figura 25 – Estrutura Eletrolisadores Industriais



Fonte: Zhong *et al.* (2023)

A estrutura multicamadas típica dos eletrolisadores inclui placas terminais, canais de fluxo, eletrodos (ânodo e cátodo) e o diafragma seletivo, cada um desempenhando uma função crítica no processo de eletrólise (Zhong *et al.*, 2023). A eficiência do eletrolisador está diretamente relacionada à qualidade do fluxo do eletrólito nos canais e ao contato com os catalisadores nos eletrodos.

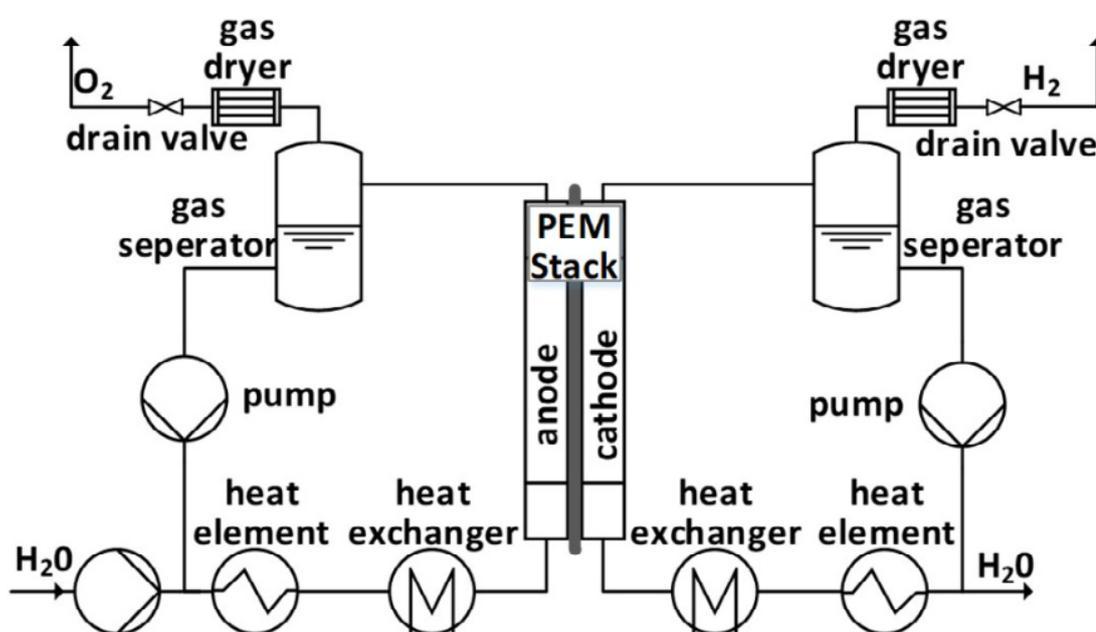
O eletrólito percorre os canais internos, onde entra em contato com o catalisador presente nos eletrodos. Durante o processo de eletrólise, a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio. Nesse processo, partículas carregadas são geradas ou consumidas nos eletrodos, exigindo sua transferência através do diafragma seletivo. Esse transporte de partículas carregadas completa o circuito de corrente das células de eletrólise, que são conectadas à fonte de alimentação de corrente contínua (CC). Além disso, os canais de fluxo possuem lacunas estreitas, o que diminui a resistência elétrica e aumenta a densidade de corrente, melhorando a eficiência geral do processo em comparação com os protótipos laboratoriais (Zhong *et al.*, 2023).

Um eletrolisador PEM opera entre 20-80 °C, porém durante a operação do eletrolisador, calor é gerado, necessitando, portanto, do controle por trocadores de calor, principalmente em eletrolisadores PEM em grandes escalas, pois isso impacta

diretamente em sua vida útil (Keller *et al.*, 2022; Jacob; Zhang, J., 2023).

Devido a essa complexidade das múltiplas camadas e também o controle de temperatura, os sistemas PEM modernos são comercializados como módulos completos (Lucas *et al.*, 2022), já contendo componentes como bombas de água, separadores de gases e secadores conforme ilustrado esquematicamente na Figura 26. Isso torna a operação mais eficiente e segura, minimizando o risco de contaminação por gases explosivos, como H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> (Keller *et al.*, 2022). A capacidade nominal dos eletrolisadores já alcança cerca de 150 kW, mas há previsões de eletrolisadores maiores sendo desenvolvidos para o mercado (Borge-Diez *et al.*, 2023; Energy, 2023).

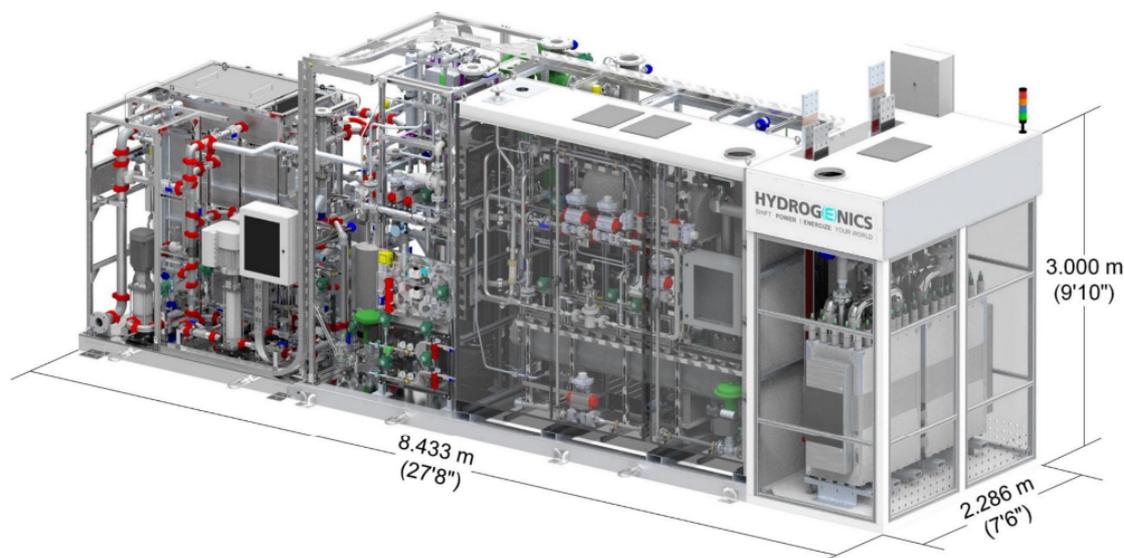
Figura 26 – Representação Esquemática Módulo Eletrolisador Industrial



Fonte: Keller *et al.* (2022)

Portanto utilizou-se a tecnologia desenvolvida pela *Cummins*, com um sistema modular de eletrolisadores de 5 MW, ao qual está presente na Figura 27.

Figura 27 – Eletrolisador Industrial



Fonte: Energy (2023)

Além da energia elétrica, o eletrolisador precisa ser abastecido continuamente por água para que o processo de eletrólise ocorra, com um máximo de 0,5 ppm de sólidos dissolvidos na água (Lucas *et al.*, 2022). Em média, 10 litros de água são necessários para produzir 1 kg de hidrogênio devido às perdas do sistema (Kudrya *et al.*, 2023).

A água utilizada no processo de eletrólise é geralmente obtida do abastecimento comum, tratada para atender aos padrões de pureza necessários. Embora existam tecnologias em fase de desenvolvimento para permitir o uso de água salgada diretamente no eletrolisador, essas soluções ainda não estão disponíveis comercialmente e continuam em fase de testes (Lucas *et al.*, 2022).

Para obter água pura, utiliza-se um processo de pré-tratamento, que pode envolver ultrafiltração ou tratamento por radiação ultravioleta, seguido por um sistema de purificação. Esse sistema geralmente é baseado na destilação por membrana, para garantir a qualidade necessária da água para o processo de eletrólise (Lucas *et al.*, 2022).

Além disso, o armazenamento intermediário de hidrogênio na forma gasosa é essencial para manter a operação estável da planta (Borge-Diez *et al.*, 2023; Kudrya *et al.*, 2023; Adedoya *et al.*, 2023). Durante os períodos de alta produção de energia eólica, o hidrogênio gerado pode exceder a capacidade de processamento da instalação de produção de amônia, o que pode causar interrupções na cadeia de suprimentos. A implementação de um sistema de armazenamento intermediário mitiga esse problema, permitindo um fornecimento contínuo para a unidade de conversão de

amônia, mesmo em períodos de baixa produção de energia eólica (Council, 2022).

Segundo Gahleitner (2013), o método ideal para armazenamento intermediário de hidrogênio é o uso de tanques de alta pressão, ideia que é reforçada por Sigfusson (2009), que destaca a vantagem de tanques metálicos para grandes volumes de hidrogênio, especialmente para armazenamento de longo prazo (acima de 30 horas). Adicionalmente, Gorre *et al.* (2020) explica que as capacidades de armazenamento intermediário podem variar de 100 kg a 3.000 kg de H<sub>2</sub>, com custos de investimento de cerca de 490 euros por quilograma armazenado. A Figura 28 ilustra a configuração dos tanques de metal usados para esse tipo de armazenamento.

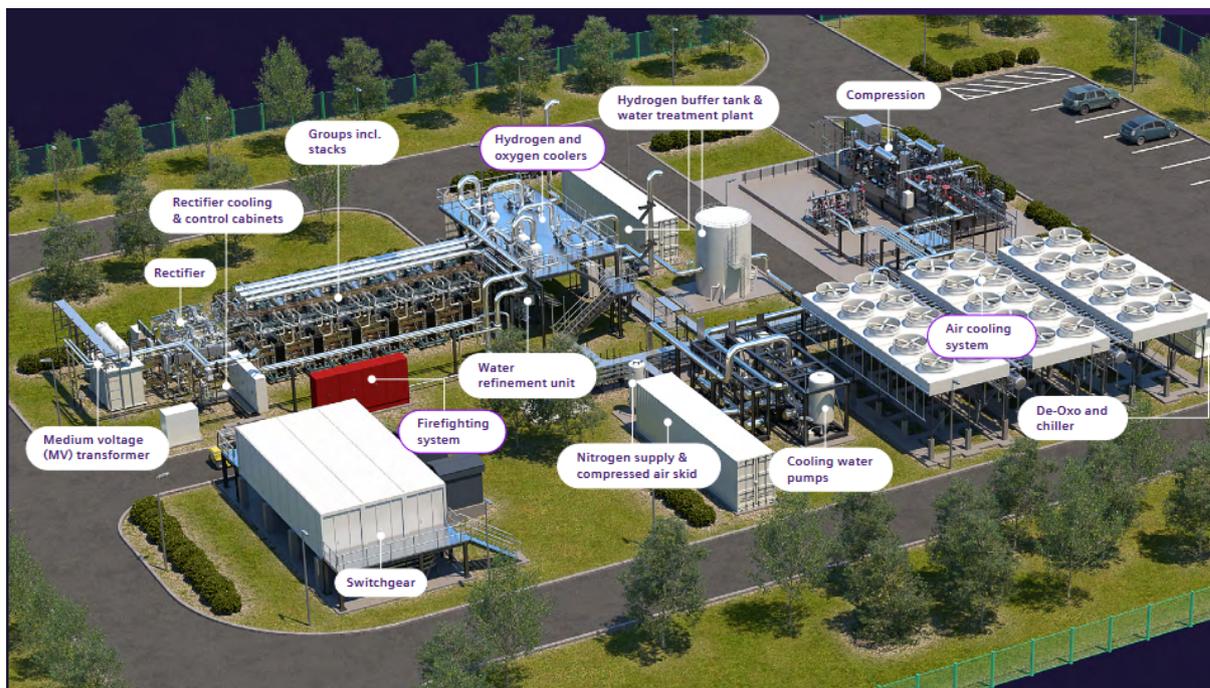
Figura 28 – Forma de Armazenamento Intermediário



Fonte: IRENA (2022)

O maior componente dentro da planta de H<sub>2</sub>V é o eletrolisador, formado por diversos módulos interligados, além de contar com os periféricos essenciais para seu funcionamento adequado, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Planta Modelo H2V

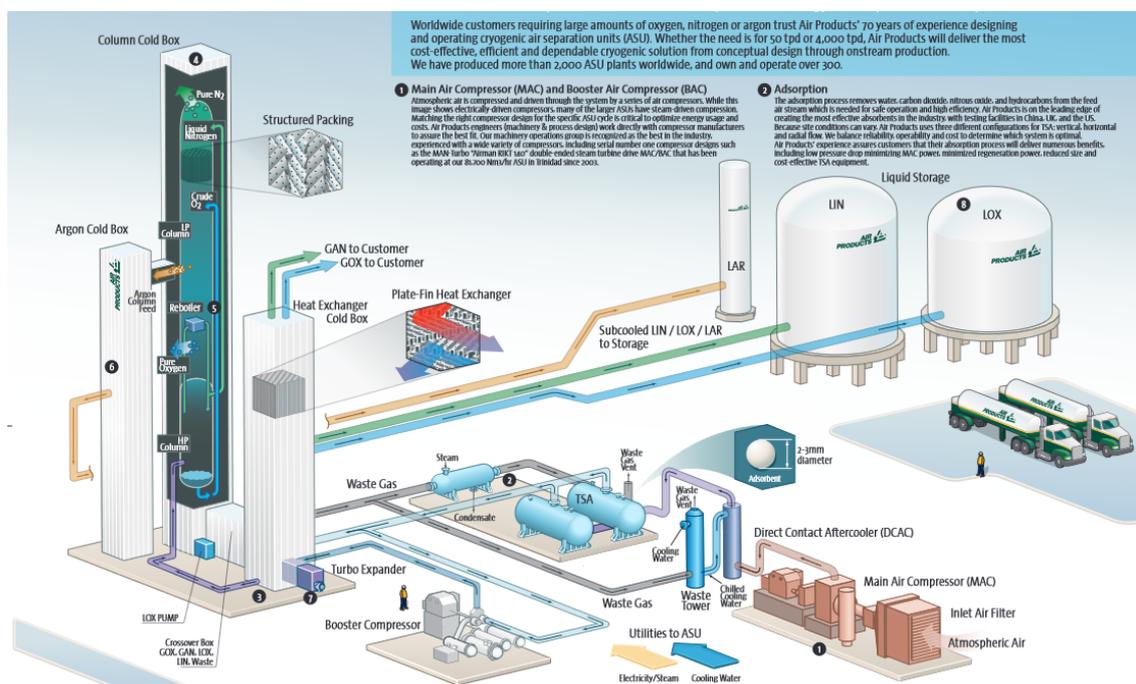


Fonte: Energy (2024)

#### 4.1.4.3 Separação de Nitrogênio

O nitrogênio necessário para a produção de amônia é obtido por meio do processo de separação do ar atmosférico, que envolve várias etapas termodinâmicas e mecânicas para isolar os componentes desejados com elevada pureza (Nayak-Luke; Banares-Alcantara; Wilkinson, 2018). Esse processo é realizado em plantas de separação criogênica de ar conforme ilustrado na Figura 30, amplamente utilizadas devido à sua capacidade de produzir gases como nitrogênio e oxigênio em grandes volumes e com alta pureza, essenciais para a produção de amônia na planta de hidrogênio verde.

Figura 30 – Processo de Separação de Ar



Fonte: Products (2024)

Inicialmente, o ar atmosférico é aspirado por um sistema de filtração que remove partículas suspensas e outras impurezas, garantindo que o fluxo de ar esteja livre de contaminantes sólidos. Em seguida, esse ar filtrado passa por um compressor de múltiplos estágios, onde sua pressão é elevada de aproximadamente 1 bar para até 6 bar. O uso de um compressor movido por motor elétrico, alimentado por fontes renováveis, contribui para a redução das emissões de carbono, alinhando o processo com os objetivos de sustentabilidade (Products, 2024).

Após a compressão, o ar é encaminhado para uma torre de resfriamento, onde ocorre a primeira etapa de troca térmica. A água de resfriamento, resfriada por fluxos de nitrogênio residual, é mantida a aproximadamente 17°C, permitindo que o ar seja resfriado até cerca de 19°C com o contato direto com a água. Esse resfriamento inicial é essencial para garantir a eficiência da separação criogênica posterior, reduzindo a carga térmica no sistema e preparando o ar para o estágio criogênico (Santos, R., 2018).

Em seguida, o ar pressurizado e resfriado é direcionado para um sistema de adsorção de CO<sub>2</sub> e vapor d'água. A remoção do dióxido de carbono e da umidade é necessária, pois a presença desses elementos pode causar a formação de gelo nas temperaturas criogênicas subsequentes, o que comprometeria a eficiência da planta. O processo de adsorção é cíclico, permitindo a regeneração do material adsorvente para garantir um funcionamento contínuo sem interrupções (Silva, L., 2022).

Com o ar devidamente purificado e resfriado, ele entra em um trocador de calor criogênico de alumínio brasado, onde é resfriado até atingir temperaturas criogênicas, próximas a  $-190^{\circ}\text{C}$ . Essa troca térmica é realizada para liquefazer os componentes do ar, como nitrogênio, oxigênio e argônio, com base em seus diferentes pontos de ebulição. O ar liquefeito é então alimentado em uma coluna de destilação fracionada, onde a separação final dos gases ocorre de acordo com suas propriedades físicas (Products, 2024; Santos, R., 2018).

Durante a destilação criogênica, o nitrogênio, que possui o menor ponto de ebulição ( $-195,8^{\circ}\text{C}$ ), é extraído no topo da coluna como gás altamente puro. O oxigênio ( $-183^{\circ}\text{C}$ ) e o argônio ( $-185,9^{\circ}\text{C}$ ), que têm pontos de ebulição mais altos, são retirados em estágios subsequentes da coluna. O nitrogênio separado pode então ser armazenado em tanques criogênicos na forma líquida ou gasosa, dependendo das necessidades da planta. A alta pureza do nitrogênio, geralmente superior a 99,99%, é um dos grandes benefícios do processo criogênico, o que o torna ideal para aplicações industriais exigentes, como a produção de amônia (Products, 2024; Silva, L., 2022).

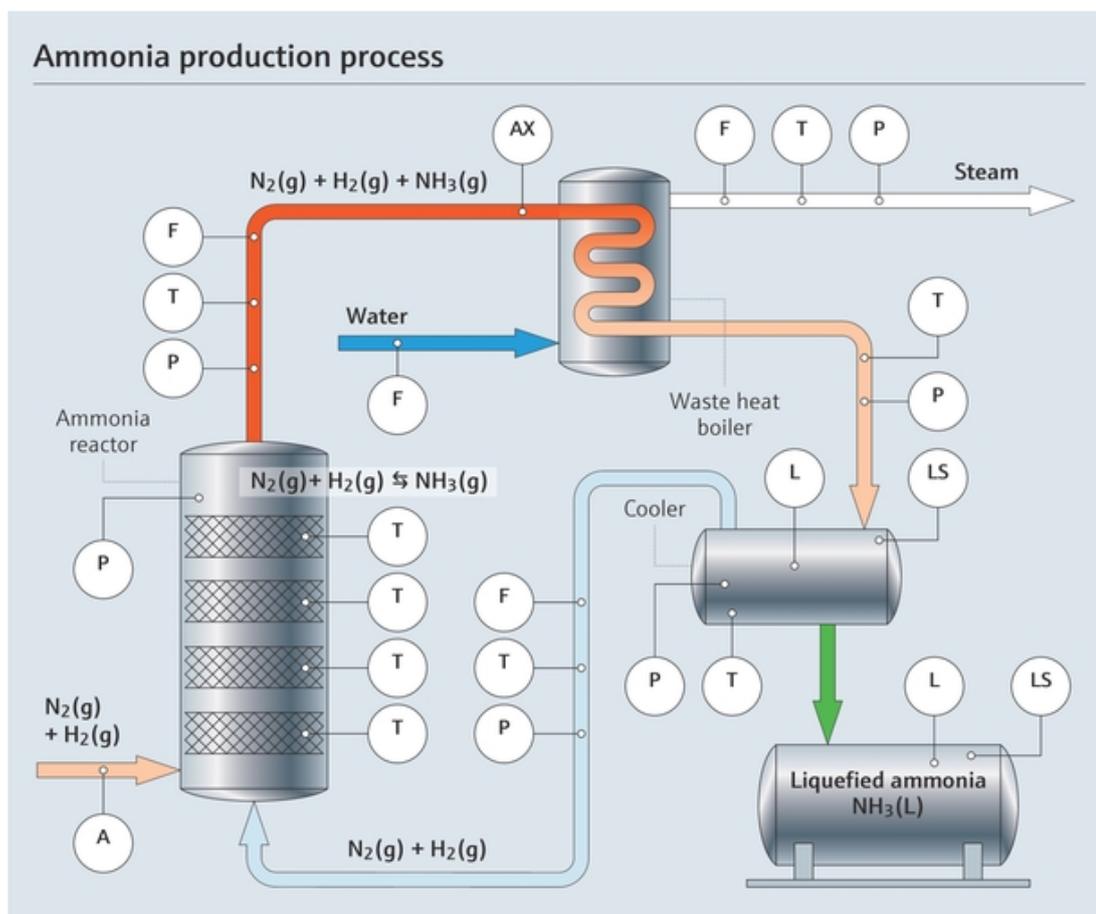
#### 4.1.4.4 Síntese Amônia e Exportação

A amônia é amplamente considerada um dos principais vetores para o transporte de hidrogênio, devido ao seu baixo custo de produção e capacidade de armazenamento, além da possibilidade de transporte em larga escala. O transporte de amônia liquefeita é preferido em relação ao hidrogênio comprimido ou liquefeito, devido ao menor risco de explosões e à possibilidade de utilizar a infraestrutura de transporte já existente, especialmente via navios. Essa abordagem se mostra economicamente viável para operações em larga escala, com os custos sendo compensados pela eficiência na produção em massa. (Zhong *et al.*, 2023).

A produção de amônia em grande escala se dá principalmente pelo processo de Haber-Bosch, que é responsável por mais de 90% da produção global de amônia (Nayak-Luke; Banares-Alcantra; Wilkinson, 2018). Esse processo combina hidrogênio e nitrogênio em alta pressão e temperatura na presença de um catalisador para formar amônia (Osorio-Tejada; Tran; Hessel, 2022).

A síntese de amônia envolve três elementos principais: o reator de síntese, a caldeira de recuperação de calor e uma unidade de refrigeração. No reator, o nitrogênio e o hidrogênio reagem para formar amônia. A energia residual gerada durante a reação é aproveitada pela caldeira de recuperação de calor, enquanto a unidade de refrigeração resfria os gases e liquefaz a amônia produzida, que é então armazenada em tanques especializados. Os gases não reagidos são recirculados no sistema, garantindo maior eficiência ao processo. A Figura 31 ilustra as etapas do processo de produção de amônia.

Figura 31 – Processo de Produção de Amônia



Fonte: Endress+Hauser (2024)

Uma limitação do processo Haber-Bosch é sua operação estacionária, que exige horas ou dias para atingir a plena capacidade. Isso é incompatível com a intermitência das fontes de energia renováveis, como a eólica. Para superar esse desafio, é implementado um sistema de armazenamento intermediário de  $H_2V$ , permitindo que a produção de amônia continue de forma ininterrupta, mesmo em períodos de baixa produção de hidrogênio (Osorio-Tejada; Tran; Hessel, 2022). Essa abordagem minimiza os tempos de inatividade e garante a continuidade da produção.

Além disso, devido à natureza contínua do processo de Haber-Bosch, é necessário um sistema de armazenamento superdimensionado de amônia, capaz de suportar períodos de baixa demanda. A amônia é armazenada em tanques refrigerados a  $-33^\circ\text{C}$  e 1 bar, com um consumo energético de cerca de 64,15 kWh por tonelada de  $NH_3$  por ano, apenas para manter a amônia em estado líquido (Osorio-Tejada; Tran; Hessel, 2022).

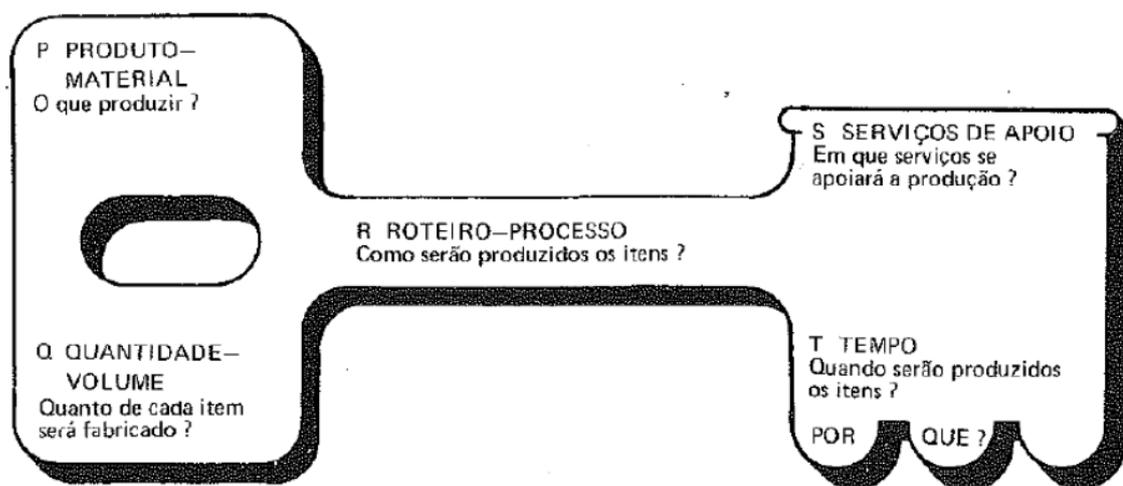
A amônia é transportada por meio de uma infraestrutura de navios-tanque estabelecida, projetada especificamente para manter a segurança e a viabilidade econô-

mica em nível internacional. Essas embarcações são equipadas com sofisticados sistemas de refrigeração que preservam a amônia na forma líquida durante toda a viagem (Osorio-Tejada; Tran; Hessel, 2022; Endress+Hauser, 2024).

#### 4.2 CONSTRUÇÃO DO LAYOUT PARA USINA DE H2V COM OFFSHORE

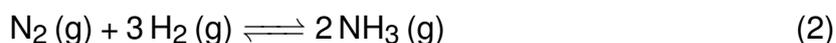
Antes da construção do Layout, de acordo com o fluxograma desenvolvido por (Muther, 1978), faz-se necessário explicitar os dados de entrada da produção, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Chave Dados de Entrada



Fonte: Muther (1978)

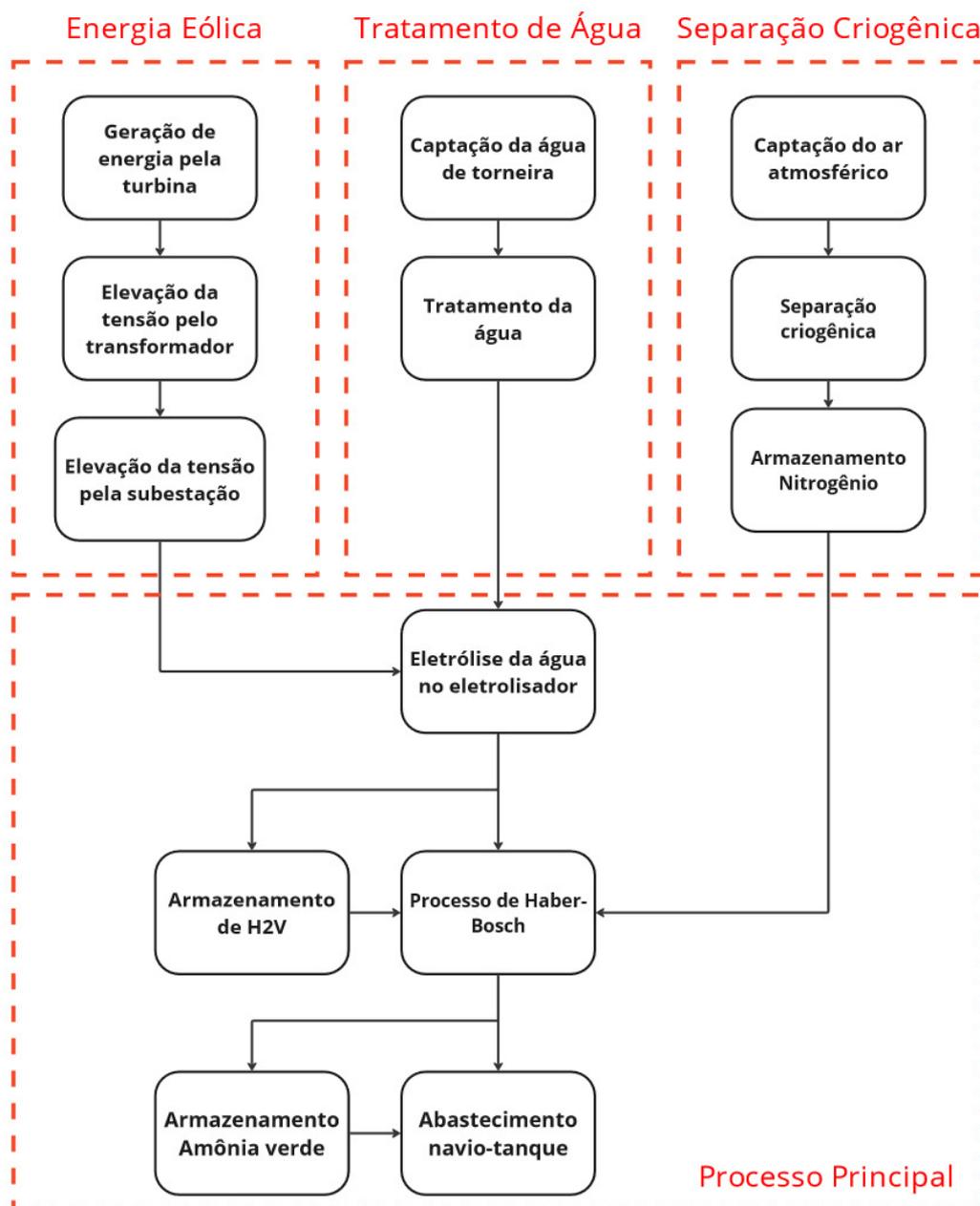
O produto se concentrará na produção de amônia verde para exportação, exigindo 0,178 kg de hidrogênio para cada quilograma de amônia produzido. A relação é fundamentada na fórmula química da amônia, conforme apresentada na Equação 2.



Com uma produção eólica prevista de 3 GW e um consumo energético de 8,366 kWh para produzir 1 kg de amônia, considerando uma operação anual de 8.000 horas, a produção estimada é de 2,8 milhões de toneladas de amônia verde por ano.

O roteiro dos processos envolvidos para a produção de amônia verde pode ser elucidada por meio do fluxograma apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Fluxograma Geral



Fonte: Autor (2024)

Destaca-se que o diagrama organiza as etapas de entrada de recursos e o processo principal de forma separada para facilitar a análise individual de cada fluxo e recurso envolvido na produção de amônia verde. Essa abordagem foi adotada para proporcionar maior clareza na representação das funções específicas de cada etapa. Posteriormente, no diagrama de inter-relações, será feita a integração detalhada de todos os elementos para validar a eficiência do sistema como um todo.

Além do fluco apresentado existem os setores de apoio que auxiliam o processo

principal, ao qual são de suma importância, pois são responsáveis pelo processo correto, seguro e contínuo do fluxo.

Os setores de suporte são parecidos para cada etapa, cada um precisa de seu próprio prédio de manutenção e administração, dentro desses estabelecimentos devem possuir salas de escritório, espaços de oficina, além de copa, banheiros e vestiários para o bem estar de cada funcionário (Brasil, 1978).

Devido a complexidade de cada operação e a falta de informação encontrada na literatura, esses espaços foram tratados genericamente.

A respeito do tempo de operação, trata-se de um processo contínuo, dimensionando as etapas de forma que o processo de produção de amônia seja ininterrupto, evitando portanto os custos adicionais ocasionados pela parada repentina do processo Haber-Bosch.

Assim, para garantir a integração eficiente entre o processo principal e os setores de apoio, foi necessário estabelecer uma análise das inter-relações entre todas as etapas envolvidas. Essa análise não apenas busca otimizar os fluxos de recursos e suporte, mas também assegurar que cada setor esteja estrategicamente posicionado para atender às demandas operacionais de forma eficaz. A categorização foi executada empregando letras para significar o valor de proximidade e por representações numéricas, expostas na Figura 34 para fundamentar a seleção da classificação.

Figura 34 – Razão de Proximidade

<b>Código</b>	<b>Razão</b>
1	Fluxo de energia elétrica
2	Fluxo de água
3	Fluxo de Material
4	Risco de contaminação e segurança
5	Eficiência logística e operacional

Fonte: Autor (2024)

Entende-se que, quanto maior o nível de proximidade, maior é a frequência de utilização do respectivo recurso ou a eficiência alcançada nos aspectos logísticos e operacionais. Para maior clareza, o Quadro 10 apresenta o detalhamento de cada critério utilizado.

Quadro 10 – Detalhamento das Razões de Proximidade

Razão	Descrição
Fluxo de energia elétrica	Refere-se à necessidade de proximidade entre setores que dependem diretamente do fornecimento de energia elétrica, como as turbinas eólicas, subestações e sistemas de eletrólise. A transmissão eficiente da energia minimiza perdas e garante que os processos que consomem muita eletricidade funcionem de maneira otimizada.
Fluxo de água	Este fluxo envolve a proximidade entre setores que utilizam ou processam grandes volumes de água, como a captação, tratamento e uso da água para resfriamento ou produção de hidrogênio. Setores que exigem água tratada precisam estar próximos para garantir o abastecimento contínuo e eficiente, sem perdas durante o transporte.
Fluxo de material	Abrange o transporte e movimentação de matérias-primas e produtos intermediários ou finais, como hidrogênio, nitrogênio e . Manter os setores que lidam com o processamento e armazenamento desses materiais próximos reduz o tempo de movimentação e os custos operacionais, aumentando a eficiência produtiva.
Risco de contaminação e segurança	Determinados setores precisam ser mantidos afastados por questões de segurança e risco de contaminação. Isso inclui setores que lidam com gases inflamáveis (hidrogênio) ou materiais perigosos. A separação física de áreas críticas é necessária para minimizar riscos de explosões, vazamentos ou contaminações.
Eficiência logística e operacional	Refere-se à necessidade de organizar os setores de maneira que o fluxo entre eles ocorra de forma otimizada, minimizando distâncias e melhorando o desempenho operacional. A proximidade de setores interdependentes facilita o fluxo de materiais e informações, garantindo que os processos ocorram sem interrupções ou atrasos.

Fonte: Autor (2024)

Inicialmente, foram definidos 23 setores diferentes para a realização da análise de inter-relações. No entanto, conforme recomendado por Muther (1978), não é aconselhável trabalhar com mais de 20 setores nesse tipo de análise. Por esse motivo, os setores foram agrupados, conforme ilustrado na Figura 35

Figura 35 – Agrupamento Setores

1	<b>Turbinas Eólicas</b>	1	<b>Turbinas Eólicas + Offshore</b>
2	<b>Subestação Offshore</b>	2	<b>Subestação Onshore</b>
3	<b>Captação de Água Bruta</b>	3	<b>Tratamento de água</b>
4	<b>Setor de Pré-Tratamento</b>		
5	<b>Setor de Tratamento</b>		
6	<b>Setor de descarte de Lodo</b>	4	<b>Armazenamento de água tratada</b>
7	<b>Setor de compressão de ar</b>	5	<b>Separador Criogênico</b>
8	<b>Setor de adsorção</b>		
9	<b>Coluna de Destilação Criogênica</b>		
10	<b>Setor de armazenamento de Nitrogênio</b>	6	<b>Setor de armazenamento de Nitrogênio</b>
11	<b>Sistema de Eletrolisador</b>	7	<b>Sistema de Eletrolisador</b>
12	<b>Sistema de Resfriamento</b>	8	<b>Sistema de Resfriamento</b>
13	<b>Setor de Compressão</b>	9	<b>Setor de armazenamento de H2V</b>
14	<b>Setor de armazenamento de H2V</b>		
15	<b>Reator de Síntese de Amônia</b>	10	<b>Reator de Síntese de Amônia</b>
16	<b>Setor de Arm. de Amônia Líquida</b>	11	<b>Setor de Arm. de Amônia Líquida</b>
17	<b>Setor de Carregamento de navio-tanque</b>	12	<b>Setor de Expedição</b>
18	<b>Suporte técnico Eólica</b>	<b>Retirado</b>	
19	<b>Suporte técnico Água</b>		
20	<b>Suporte técnico Nitrogênio</b>		
21	<b>Suporte técnico Eletrólise</b>		
22	<b>Suporte técnico Amônia</b>		
23	<b>Suporte de segurança do processo</b>		

Fonte: Autor (2024)

Os setores de suporte foram excluídos da análise de inter-relação por sua escala reduzida em comparação com o restante da planta. Assim, podem ser alocados nos espaços remanescentes disponíveis.

Na etapa posterior buscou-se estabelecer relações entre os diferentes setores identificados, para tal feito realizou-se uma análise qualitativa, complementada pela revisão dos artigos realizada, onde o embasamento teórico mostrou-se essencial para entender o fluxo dos processos envolvidos. Com base nessas informações, as interco-

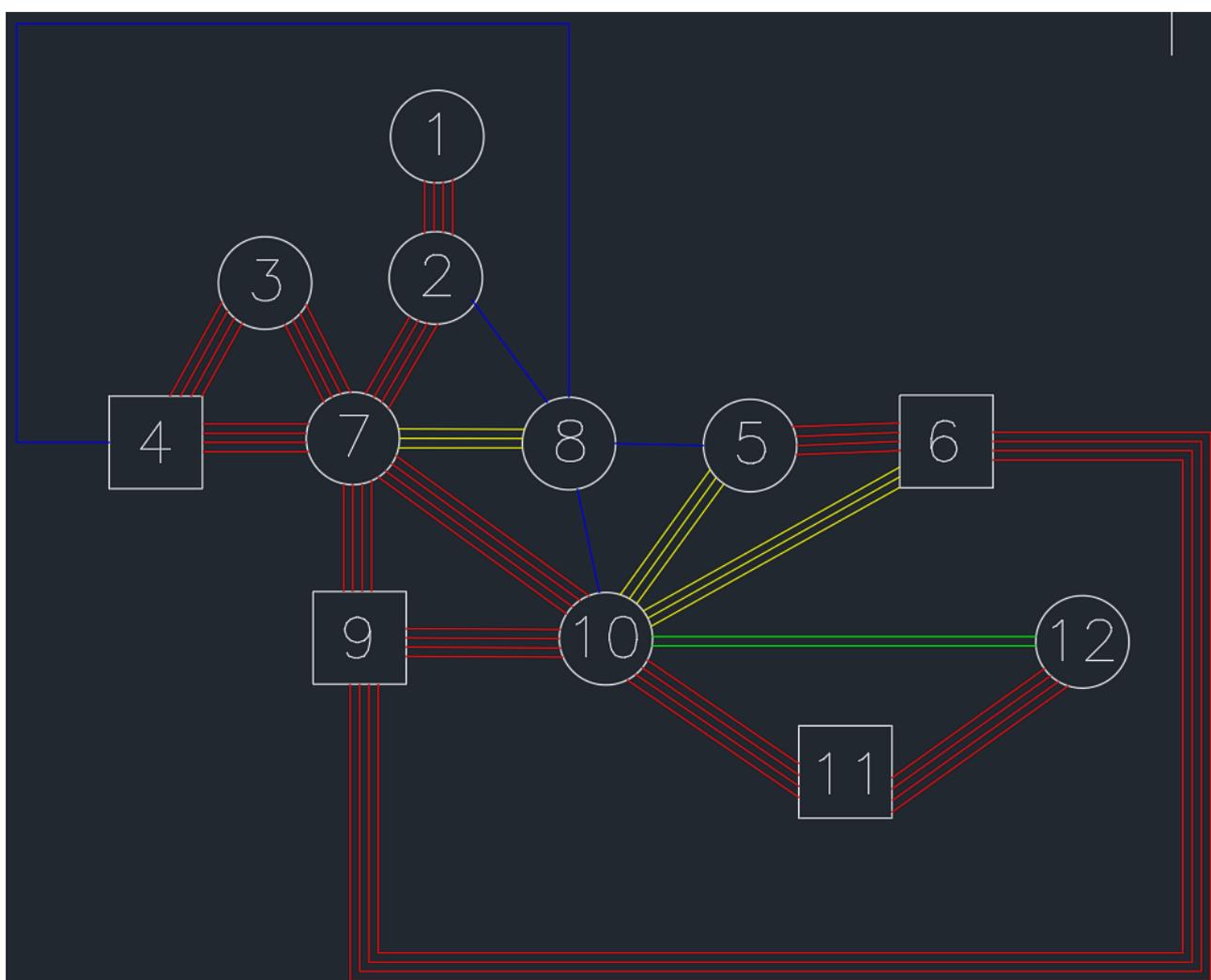


uns dos outros, como os setores de tratamento de água e separação criogênica, por exemplo.

Para a categoria indesejável, foram catalogadas 21,2% das relações, devido a à geração de substâncias gasosas inflamáveis e tóxicas; vários setores, quando situados próximos, podem gerar riscos tanto para a integridade estrutural quanto para a segurança da força de trabalho. Conseqüentemente, esses setores devem ser separados espacialmente para aliviar possíveis efeitos danosos.

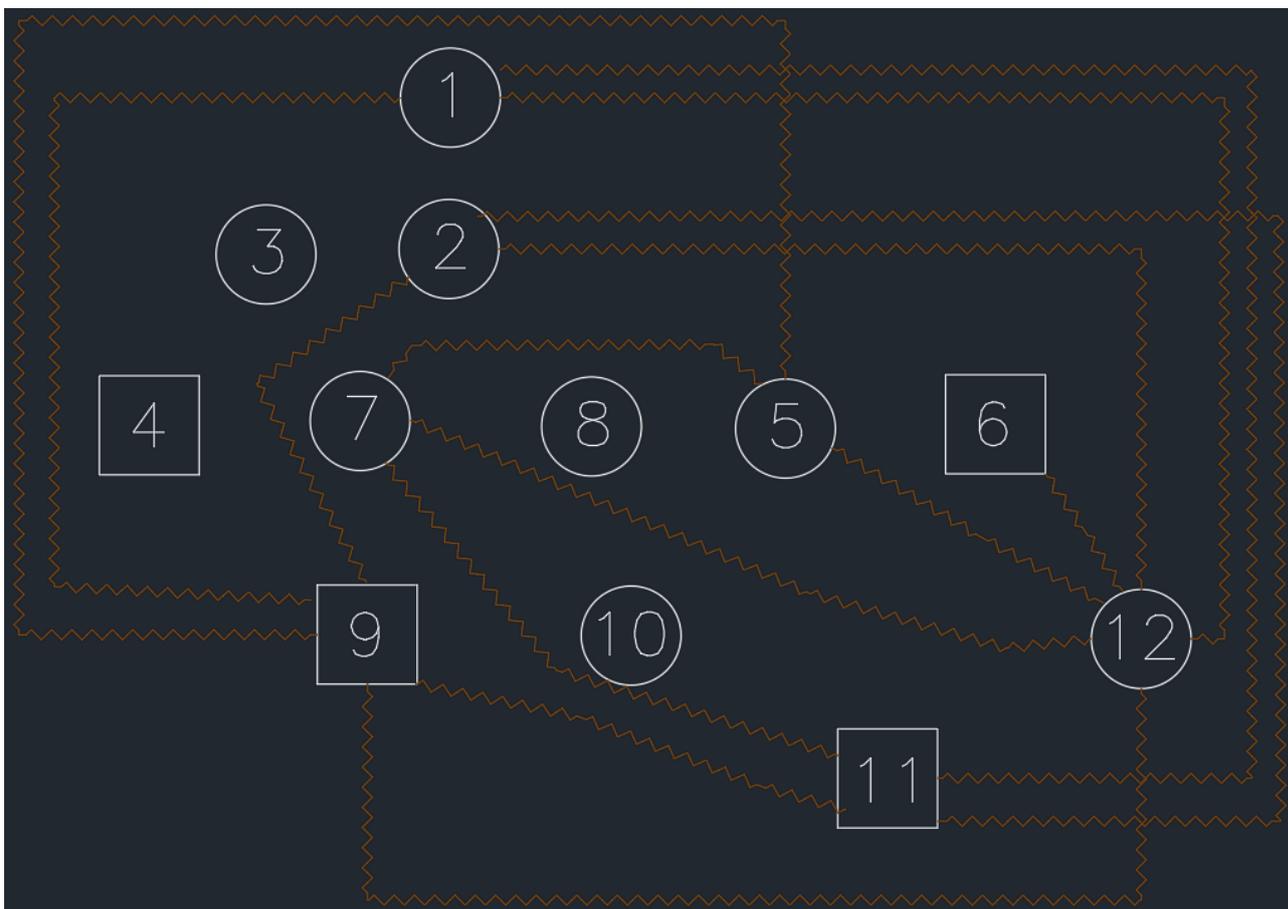
Após a elaboração das inter-relações faz-se necessário a representação espacial dos graus de proximidade, facilitando portanto a análise crítica da disposição dos setores, o qual está exposto nas Figura 37 e 38

Figura 37 – Diagrama de Inter-Relações



Fonte: Autor (2024)

Figura 38 – Diagrama de Inter-Relações Proximidade Indesejável



Fonte: Autor (2024)

O diagrama não representa o *layout* final, porém pressupõe-se que quanto maior o grau de proximidade, mais perto espacialmente um setor deve ficar do outro, assim no diagrama torna-se conveniente colocá-los próximos no local aproximado onde irão se posicionar no *layout*.

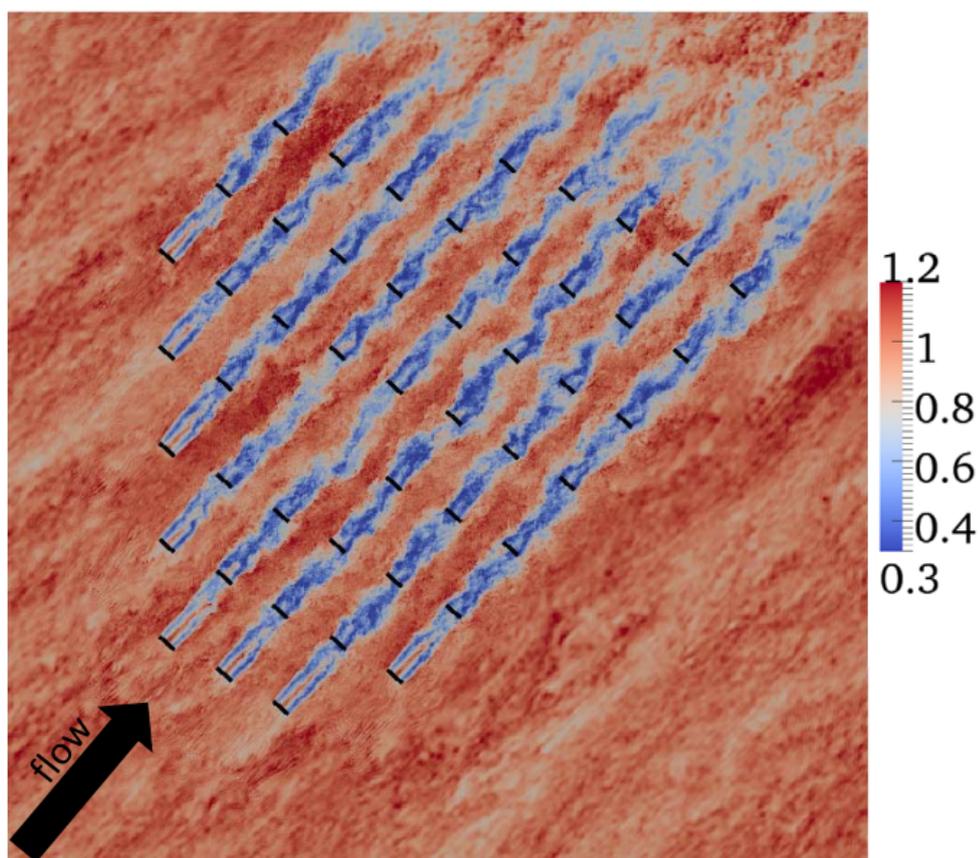
A etapa posterior é diagrama de inter-relação de espaços, no entanto, antes de construir esse diagrama, torna-se imperativo delinear as áreas necessárias pertinentes a cada setor. A literatura existente apresenta uma escassez de informações sobre as dimensões dos componentes, pois muitos dos sistemas são soluções personalizadas para um caso específico, e os dados de engenharia associados permanecem não divulgados ao público.

Portanto os dados obtidos são estimativas, porém fornecem um ótimo parâmetro da escala dos setores.

Iniciando pela ponta do processo, para dimensionar o espaço ocupado pelas 200 turbinas eólicas *offshore* de 15 MW, utilizou-se o tamanho proposto por (Group, 2024), onde uma turbina possui 235 metros de diâmetro. Porém é necessário que

as turbinas conservem um determinado distanciamento entre si, para evitar que uma turbina atrapalhe o fluxo de vento da outra, fenômeno o qual é conhecido como efeito esteira, presente na Figura 39.

Figura 39 – Efeito Esteira



Fonte: Peters, Heath e Nash (2013)

A respeito do espaçamento ideal, segundo Peters *et al.* (2010) ainda não se tem um consenso a respeito do espaçamento ótimo, variando entre 8 vezes o diâmetro ou 7 vezes o diâmetro da turbina, sendo os dois suficientes para minimizar o efeito esteira.

Portanto com um espaçamento de 7 vezes o diâmetro e um diâmetro de 235 metros, obtém-se uma área de 457 km<sup>2</sup> para a instalação do complexo eólico

Posteriormente as turbinas, faz-se necessário ter uma subestação *offshore* para minimizar as perdas de transmissão da corrente elétrica, unidades típicas de subestações para cerca de 1,24 GW de potência ocupam uma área de 2600 m<sup>2</sup> (Diap, 2021).

Como a geração de energia eólica atinge uma capacidade máxima de 3GW, duas subestações *offshore* que excedam marginalmente essa área seriam suficientes para satisfazer a demanda. Essa ocorrência não é atípica, pois para capacidades ener-

géticas substanciais, costuma-se empregar várias subestações *offshore* (Spinergie, 2023).

Portanto duas subestações *offshore* com dimensões de 65x40x40 metros ocupariam 5200 m<sup>2</sup> e são suficientes para a elevação da corrente para o transporte até a costa.

Para realizar a conexão em terra, a subestação *offshore* precisa ser ligada a uma subestação *onshore*, para dimensiona-la a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) possui uma normativa estabelecendo áreas mínimas de acordo com o maior nível de tensão da subestação (ANEEL, 2020).

A tensão é elevada na subestação *offshore*, onde para o nível de produção em GW pode chegar até a 320 kW (Wind, S., 2024).

Portanto, segundo ANEEL (2020) a área da subestação *onshore* deverá ser de no mínimo 100000 m<sup>2</sup> para suportar 320 kW de tensão.

Após a passagem de corrente elétrica pela subestação *onshore* ocorre a ligação com o sistema de eletrolisadores, sendo necessário portanto utilizar os 3 GW de energia para que ocorra a eletrólise, como trata-se de uma grande quantidade de energia, vários eletrolisadores são ligados em paralelo para que o processo ocorra. O eletrolisador PEM selecionado refere-se ao *HyLYZER 1000-30*, o qual possui 5 MW de capacidade e dimensões de 8,5 x 2,3 metros. No entanto, para a conexão com a distribuição da subestação *onshore*, é necessária a presença de um retificador. Esse componente já está incluído na solução do *HyLYZER 1000-30*, possuindo dimensões de 4,5 x 2,5 metros (Inc., 2021).

Para calcular a dimensão necessária do setor para suportar esses equipamentos utilizou-se os conceitos de área projetada ( $S_p$ ), área de operação ( $S_o$ ) e área de circulação ( $S_e$ ), presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensionamento Eletrolisador

<b>Setor: Sistema de Eletrolisador</b>	<b>Eletrolisador</b>	<b>Retificador</b>
Quantidade	600	600
Largura (m)	2,3	4,5
Comprimento (m)	8,5	2,5
Nº de Lados Operante (N)	1	1
$S_p = \text{área (m}^2\text{)}$	19,55	11,25
$S_o = S_p \times N$	19,55	11,25
$S_p + S_o$	39,1	22,5
$k$	0,5	0,5
$S_e = k \times (S_o + S_p)$	19,55	11,25
$S_t$ por estação ( $S_o + S_p + S_e$ )	58,65	33,75
<b>ST TOTAL (m<sup>2</sup>)</b>	<b>35190</b>	<b>20250</b>

Fonte: Autor (2024)

Com uma área total portanto de 55440 m<sup>2</sup> os 600 eletrolisadores são capazes

de suportar a energia de entrada da planta.

Devido à intermitência característica da geração de energia eólica, é necessário prever o armazenamento do hidrogênio para garantir o equilíbrio do processo, especialmente em períodos de baixa produção ou quando o hidrogênio não for imediatamente utilizado na síntese de amônia. Como o dimensionamento preciso dessa área exige um estudo mais aprofundado do balanço de massa e energia, envolvendo variabilidades de geração e consumo, foi definido um espaço que atenda às necessidades gerais do processo e esteja integrado ao layout da usina. A mesma abordagem foi aplicada para os demais sistemas de armazenamento.

Para resfriar o sistema de eletrolisadores precisa-se de um sistema de refrigeração eficiente, ao qual pode ser feito por *chiller* a água.

O processo de eletrólise das células PEM possui uma eficiência de aproximadamente 80% (EPE, 2023), portanto 20% da energia não consumida no processo é transformada em calor. Para eletrolisadores com capacidade de 5 MW, cerca de 1 MW é convertido em calor. Assim, para o sistema completo, é necessário implementar um sistema de resfriamento capaz de dissipar aproximadamente 600 MW de calor gerado.

Os *chillers* a água *AquaEdge* 19XR são capazes de resfriar até 12 MW, portanto utilizando 50 *chillers* desse modelo pode-se resfriar eficientemente a planta, juntamente com torres de resfriamento de alta capacidade da Alpina (Alpina, 2024).

O dimensionamento do espaço necessários seguiu a mesma premissa que o sistema de eletrolisador e está presente na Tabela 2

Tabela 2 – Dimensionamento do Sistema de Resfriamento

<b>Setor: Sistema de Resfriamento</b>	<b>Chiller de Água</b>	<b>Torre</b>
Quantidade	50	50
Largura (m)	2,7	8,69
Comprimento (m)	5,8	12,42
Nº de Lados Operante (N)	1	0
$Sp = \text{área (m}^2\text{)}$	15,66	107,93
$So = Sp \times N$	15,66	0
$Sp + So$	31,32	107,93
$k$	0,5	0,5
$Se = k \times (So + Sp)$	15,66	53,96
$St \text{ por estação } (So + Sp + Se)$	46,98	161,90
<b>ST TOTAL (m<sup>2</sup>)</b>	<b>2349</b>	<b>8095</b>

Fonte: Autor (2024)

Outra fonte empregada na síntese do hidrogênio é a água pura. Um aparelho avançado de purificação de água está disponível no mercado, proficiente em gerar o volume necessário para eletrólise em grande escala, designado como *Mobile Reverse Osmosis Systems CRO*, em que o sistema modular engloba processos de pré-

tratamento, limpeza de membranas e osmose reversa; uma ilustração do aparelho é apresentada na Figura 40.

Figura 40 – Módulo de Tratamento de Água



Fonte: Pure Aqua (s.d.)

O módulo possui dimensões de 12,2 x 2,5 metros, porém pode produzir uma capacidade de mais de 2 milhões de galões de água por dia. A área necessária para a instalação desse módulo foi calculada da mesma forma que o sistema de eletrolisador, presente na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensionamento Sistema de Tratamento de Água

Setor: Tratamento de Água	Osmose Reversa
Quantidade	1
Largura (m)	2,50
Comprimento (m)	12,20
Nº de Lados Operante (N)	1
$Sp = \text{área (m}^2\text{)}$	30,50
$So = Sp \times N$	30,50
$Sp + So$	61,00
$k$	0,5
$Se = k \times (So + Sp)$	30,50
$St \text{ por estação } (So + Sp + Se)$	91,50
<b>ST TOTAL (m<sup>2</sup>)</b>	<b>91,50</b>

Fonte: Autor (2024)

Após todo o processo de separação do hidrogênio, ele é injetado no processo de síntese de amônia que possui como componentes principais o reator de amônia

e o separador de líquido, ao qual os valores típicos de área ocupada são, respectivamente 3,14 m<sup>2</sup> e 4,3 m<sup>2</sup> (Araujo; Skogestad, 2008; Chinese Refrigeration, s.d.).

O espaço ocupado, exposto na Tabela 4 foi calculado da mesma forma que o sistema de eletrolisador.

Tabela 4 – Dimensionamento Síntese de Amônia

<b>Setor: Tratamento de Água</b>	<b>Reator</b>	<b>Separador de Amônia</b>
Quantidade	1	1
Largura (m)	2,00	1,33
Comprimento (m)	2,00	3,25
Nº de Lados Operante (N)	1	1
$S_p = \text{área (m}^2\text{)}$	3,14	4,30
$S_o = S_p \times N$	0,00	4,30
$S_p + S_o$	3,14	8,60
$k$	0,5	0,5
$S_e = k \times (S_o + S_p)$	1,57	4,30
$S_t \text{ por estação } (S_o + S_p + S_e)$	4,71	12,90
<b>ST TOTAL (m<sup>2</sup>)</b>	<b>5,00</b>	<b>12,90</b>

Fonte: Autor (2024)

Como insumo a síntese de amônia recebe nitrogênio do separador criogênico, ao qual possui poucos dados disponíveis sobre a escala de grandeza de seus componentes, uma das poucas informações pertinentes esclarece que o processo de síntese de amônia já está tão otimizado que se perde diante a escala de outros equipamentos (Schlogl, 2003).

Portanto para delimitar a área utilizou-se uma solução pronta, presente no mercado, ao qual é capaz de produzir 8.000 Nm<sup>3</sup>/h de nitrogênio em uma área de 410 m<sup>2</sup> (Gas, s.d.). Como a planta em estudo necessita de grande escala, sendo cerca de 130.000 Nm<sup>3</sup>/h de nitrogênio, torna-se necessário 6.662,5 m<sup>2</sup> de área para o separador criogênico.

O setor de expedição trata-se de uma sala de controle para monitorar o abastecimento do navio-tanque no píer, sendo sua área típica de um escritório, ao qual refere-se a 15 m<sup>2</sup> (Emae, 1997)

Todos os sistemas listados são integrados entre si de acordo com o diagrama de inter-relações, porém tratam-se de áreas muito distintas e de grande porte, necessitando de uma região ampla para sua construção, porém como nesse estudo não há espaço físico delimitando a planta em construção, realizou-se a entrada apenas da área necessária de cada processo, sendo o resumo apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo Áreas Necessárias

<b>Setores</b>	<b>Área</b>
1 - Turbinas Eólicas + <i>Offshore</i>	457 km <sup>2</sup>
2 - Subestação <i>Onshore</i>	100000 m <sup>2</sup>
3 - Tratamento de Água	91,5 m <sup>2</sup>
4 - Armazenamento Água Tratada	Fora do Escopo
5 - Separador Criogênico	6662,5 m <sup>2</sup>
6 - Setor de Armazenamento de N2	Fora do Escopo
7 - Sistema Eletrolisador	55440 m <sup>2</sup>
8 - Sistema de Resfriamento	10444 m <sup>2</sup>
9 - Setor de Armazenamento de H2	Fora do Escopo
10 - Reator de Síntese de Amônia	17,9 m <sup>2</sup>
11 - Setor de Arm. de Amônia Líquida	Fora do Escopo
12 - Setor de Expedição	15 m <sup>2</sup>

Fonte: Autor (2024)

Com as áreas estimadas é possível realizar o diagrama de inter-relação de espaços, contudo pela diferença de áreas o diagrama se torna visualmente inadequado para análises, portanto plotou-se o mesmo diagrama em 3 escalas diferentes para a visualização, além de ser plotado apenas a parte de relação de proximidade, presente nas Figuras 41, 42 e 43.

Figura 41 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços Escala 1

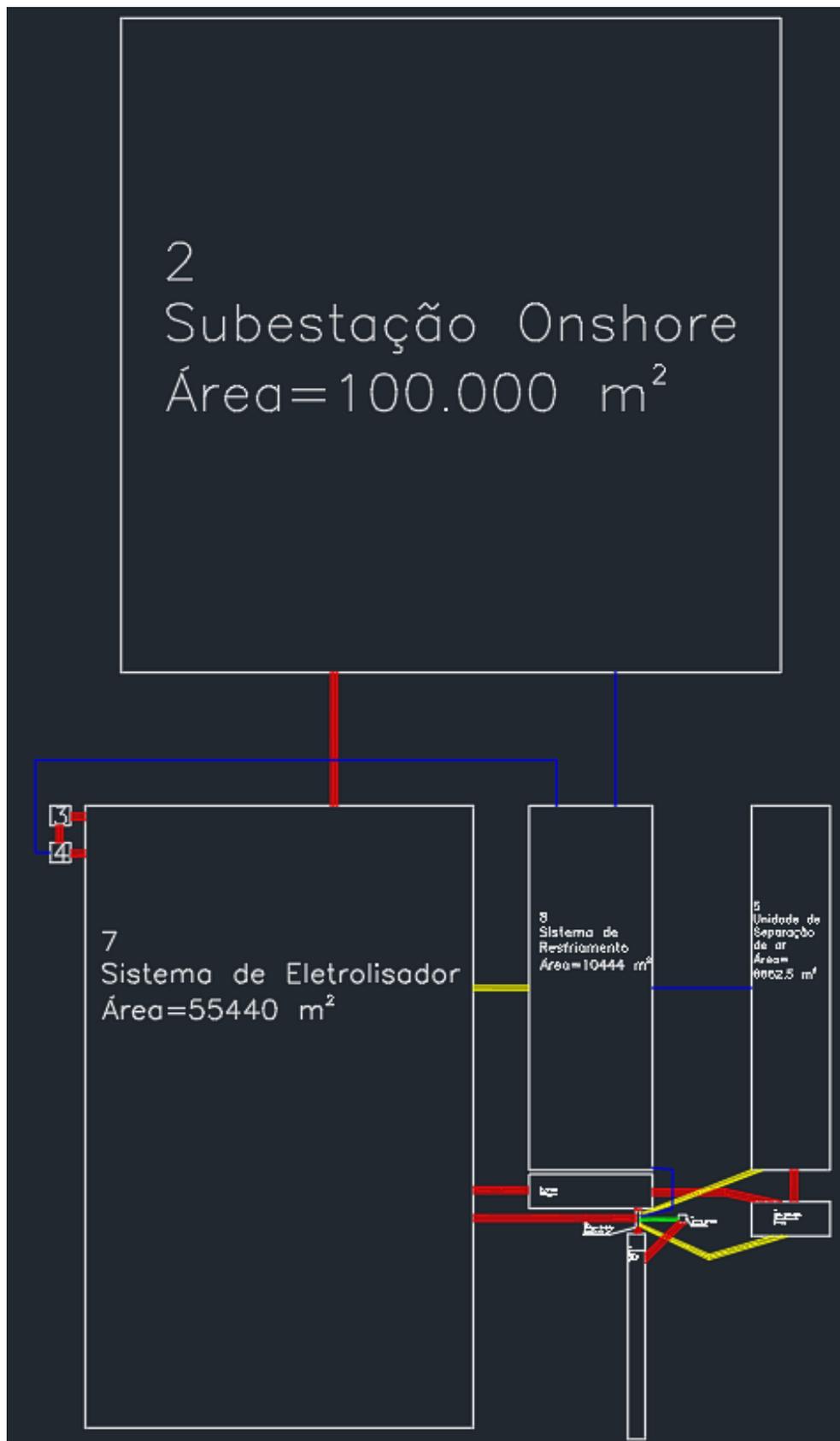
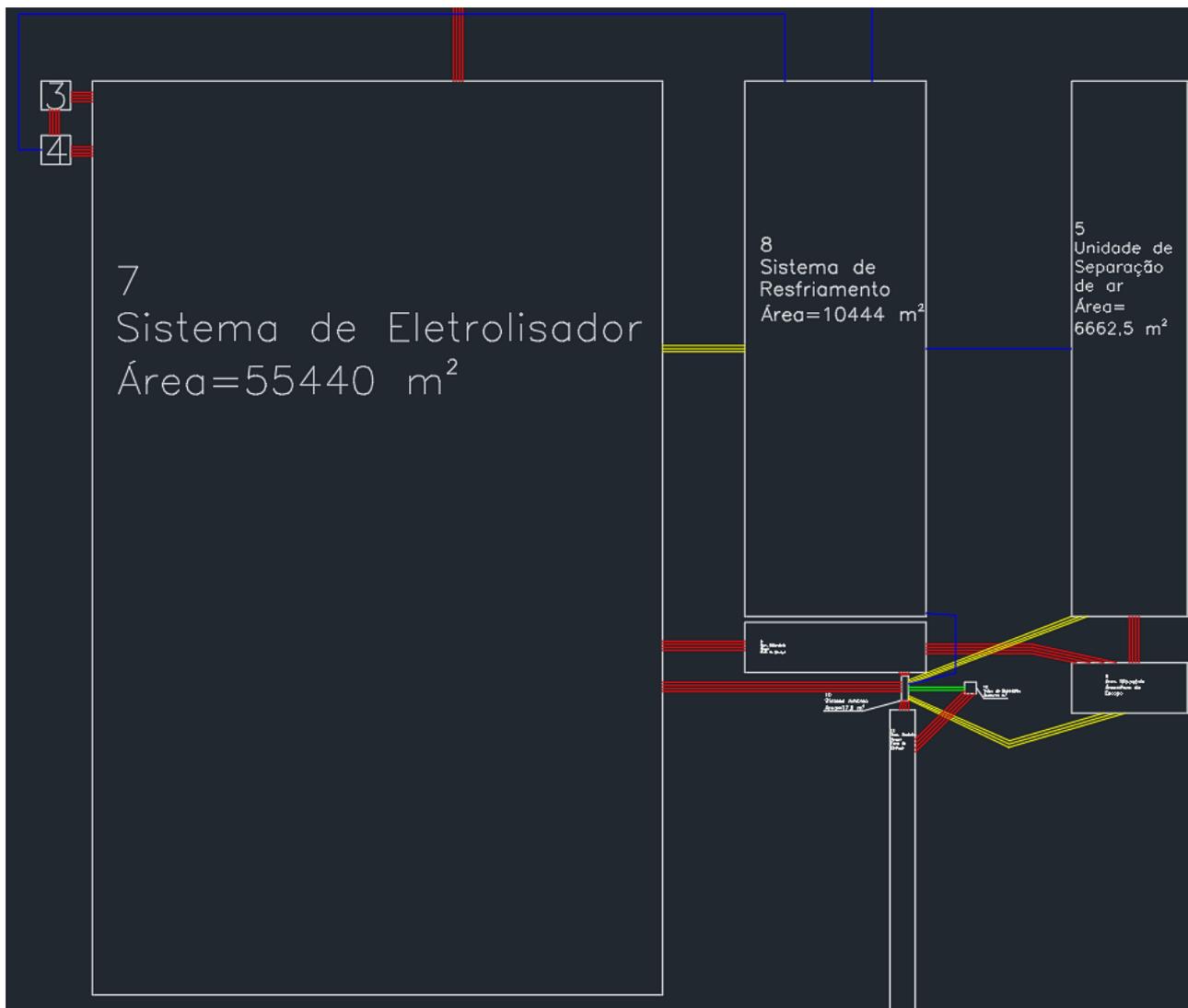
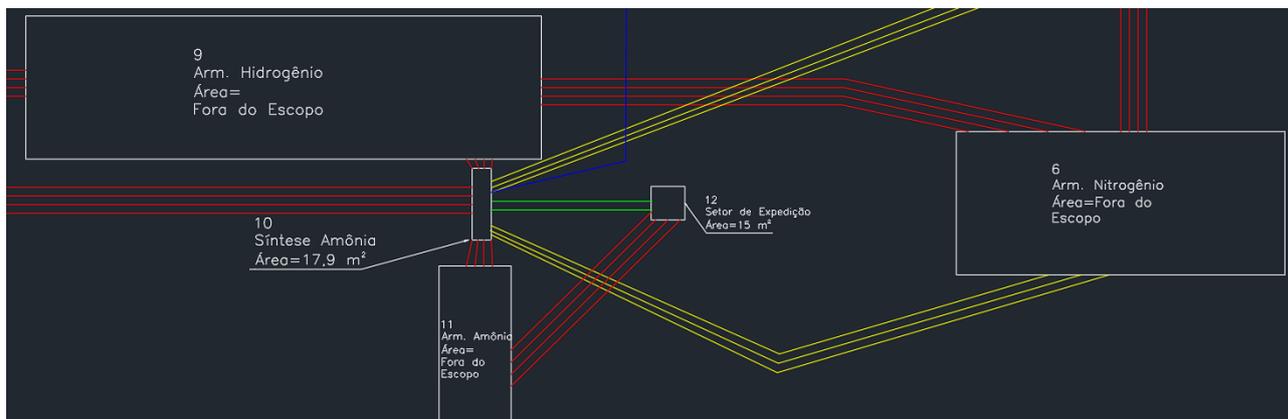


Figura 42 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços Escala 2



Fonte: Autor (2024)

Figura 43 – Diagrama de Inter-Relações de Espaços Escala 3



Fonte: Autor (2024)

Nota-se que algumas inter-relações ao juntar-se os blocos não serão cumpridas, portanto sendo necessário realizar a etapa de validação de *layout* com o método de validação por adjacência, ao qual é um método proposto por Muther (1978) para verificar a funcionalidade do *layout*, portanto verifica-se ao unir os setores se as relações de proximidade propostas se mantêm.

Realizando portanto para a planta proposta, obtem-se uma soma de 46 pontos de relações de proximidade total e 40 relações de proximidade percebida, conforme ilustra as Figuras 44 e 45.

Figura 44 – Pontuação de Adjacência Total

Pontuação Total												
Setores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	4							-1		-1	-1
2		-					4	1	-1		-1	-1
3			-	4			4					
4				-			4	1				
5					-	4	-1	1	-1	3		-1
6						-			4	3		-1
7							-	3	4	4	-1	-1
8								-		1		
9									-	4	-1	-1
10										-	4	2
11											-	4
12												-
<b>Total</b>	0	4	0	4	0	4	12	6	8	15	4	6
<b>Soma total</b>	<b>63</b>											

Fonte: Autor (2024)

Figura 45 – Pontuação de Adjacência Percebida

Pontuação Percebida												
Setores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	4							-1		-1	-1
2		-					4	1	-1		-1	-1
3			-	4			4					
4				-			4	0				
5					-	4	-1	1	-1	0		-1
6						-			4	0		-1
7							-	3	4	4	-1	-1
8								-		0		
9									-	4	-1	-1
10										-	4	2
11											-	4
12												-
<b>Total</b>	0	4	0	4	0	4	12	5	8	8	3	6
<b>Soma total</b>	<b>54</b>											

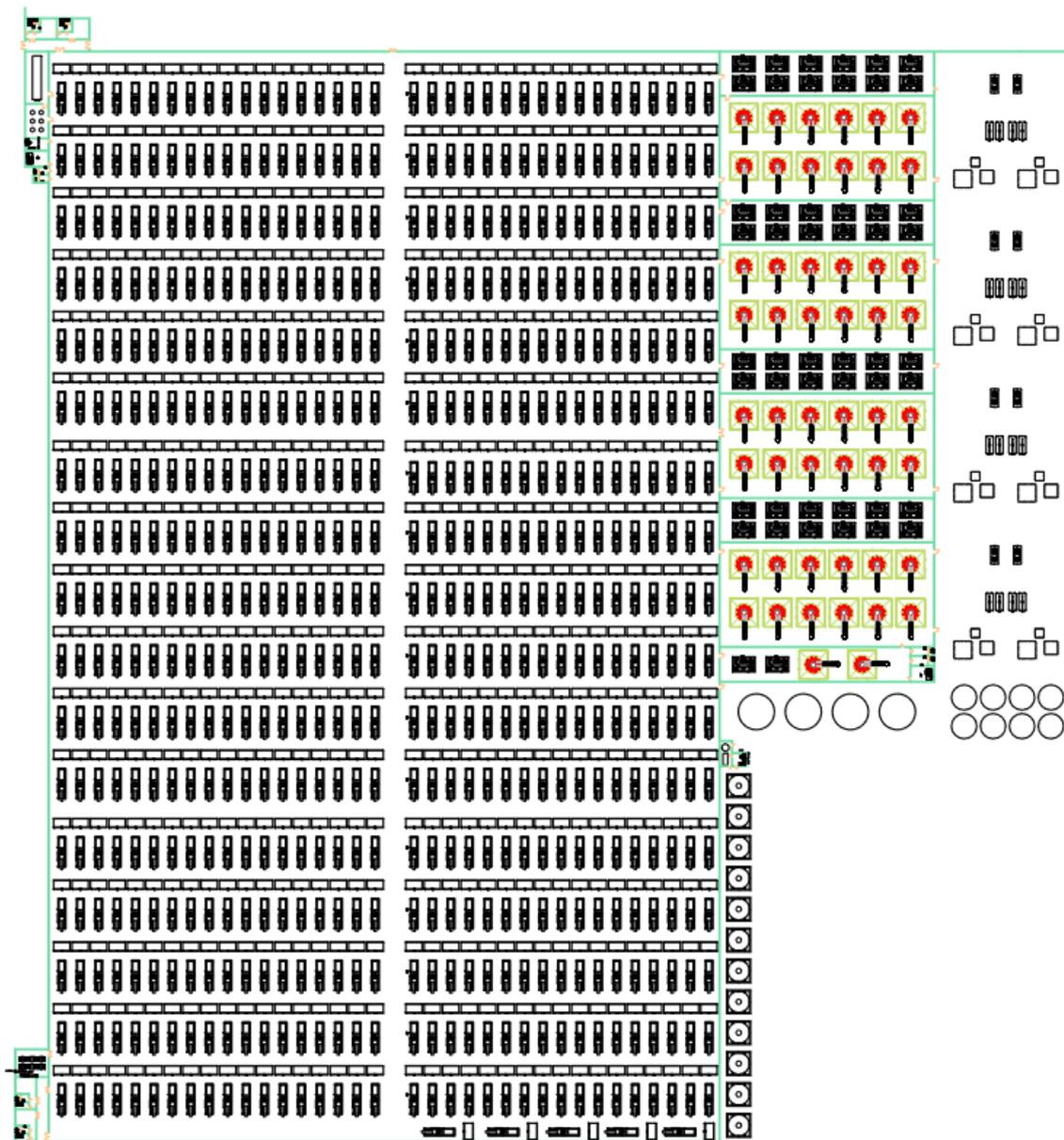
Fonte: Autor (2024)

Com isso, ao dividir a pontuação obtida pela pontuação total, é possível determinar uma funcionalidade de *layout* de 85,71%, um valor superior ao recomendado por Muther (1978), portanto, o *layout* proposto demonstra-se adequado e funcional, permitindo sua plotagem e dimensionamento. Assim, na prática, torna-se viável a construção da usina de H2V.

Por fim, após a elaboração do *layout* faz-se necessário a distribuição espacial das máquinas, adotando conceitos de distanciamento mínimo entre máquinas e entre máquina e operador presente na Ministério do Trabalho e Emprego (2010). De acordo com essa norma, o distanciamento mínimo entre máquinas deve ser de 0,6 metros, enquanto a largura dos corredores principais deve ser de, no mínimo, 1,2 metros, garantindo a circulação segura dos trabalhadores. A planta baixa resultante esta ilustrada na Figura 46 com uma área de 175.182 m<sup>2</sup> ou aproximadamente 17,52 hectares em terra e 457 km<sup>2</sup> no mar, valores aos quais realistas quando comparados a projetos existentes (World, 2024; Fluidbrasil, 2024; Wind, O., 2024)

Destaca-se que a parte do complexo eólico e subestações foram omitidos para uma melhor visualização do restante da planta.

Figura 46 – Planta Baixa



Fonte: Autor (2024)

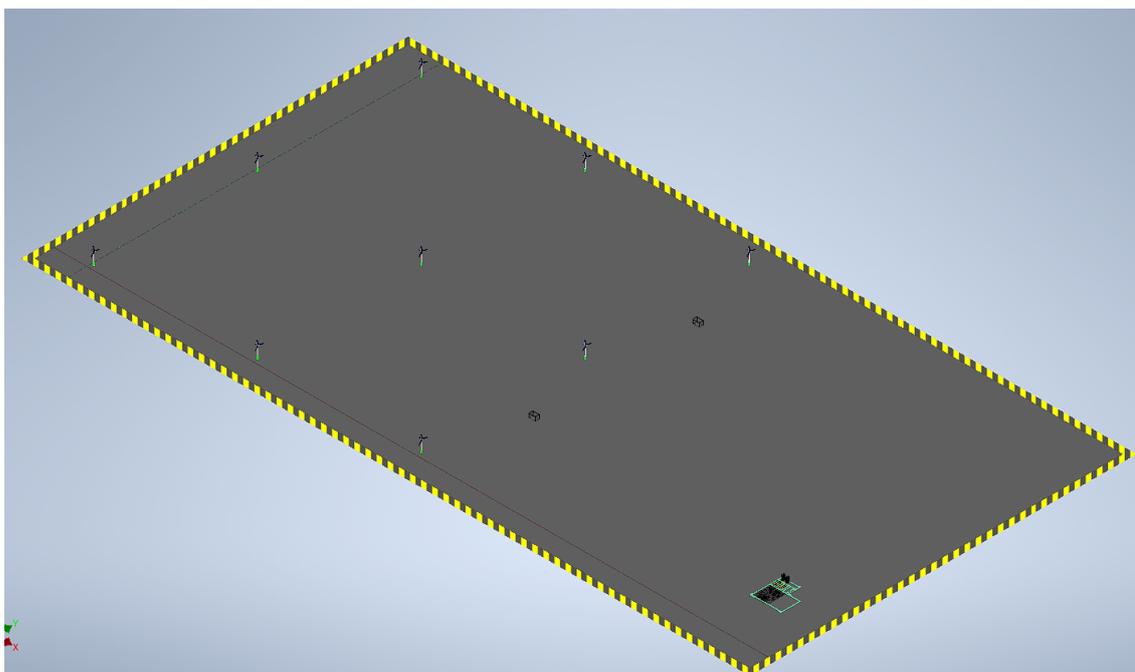
Observa-se que os armazenamentos de nitrogênio, hidrogênio e amônia são realizados a céu aberto, dispensando a necessidade de infraestrutura civil ao redor. Da mesma forma, a unidade de separação de ar deve permanecer em área aberta, garantindo uma melhor captação do ar atmosférico. Além disso, as torres de resfriamento também devem estar localizadas em áreas a céu aberto, sem a presença de telhado, devido às suas características operacionais.

Para melhor entendimento das disposições e escalas de tamanho de cada máquina, elaborou-se a mesma planta em 3D, porém por uma limitação de processamento computacional, reduziu-se a quantidade de todos os componentes, porém mantendo

o *layout* e a área total que seria ocupada.

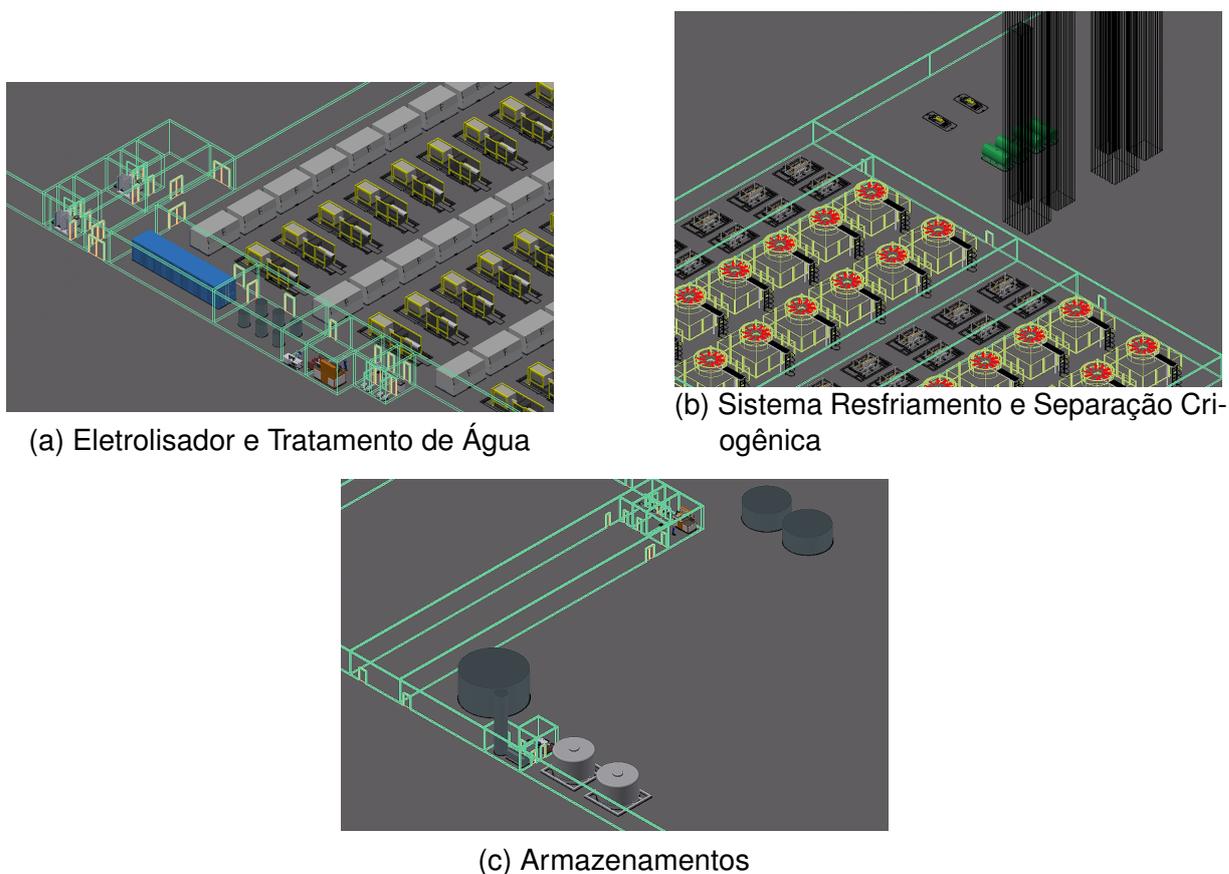
Na Figura 47 observa-se o espaçamento entre as turbinas e também o tamanho entre o complexo eólico e o restante da planta de hidrogênio *offshore*, já na Figura 48 visualiza-se o arranjo de cada setor.

Figura 47 – Complexo Eólico 3D



Fonte: Autor (2024)

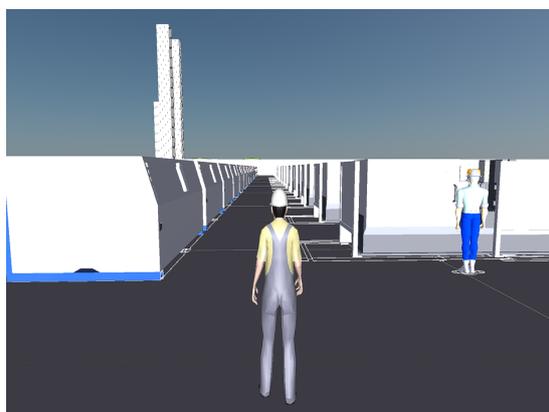
Figura 48 – Planta 3D



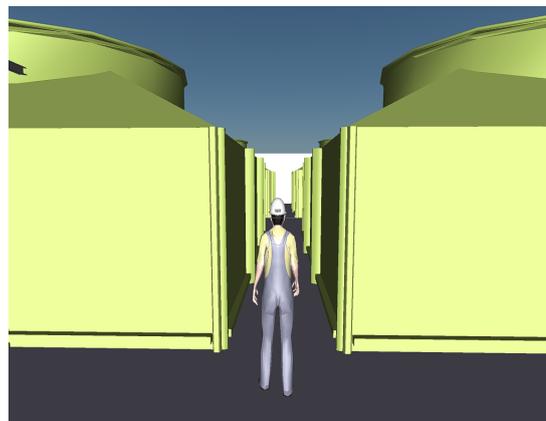
Fonte: Autor (2024)

Alguns setores foram alocados nos espaços adjacentes, como os setores de suporte e manutenção, que consistem em pequenas salas, uma vez que a manutenção é geralmente realizada *in loco*. Vale destacar que a configuração apresentada representa apenas um arranjo físico preliminar, sendo necessário aplicar o método SLP novamente dentro de cada setor para determinar a melhor inter-relação entre os maquinários. Contudo, essa análise específica não está contemplada neste estudo.

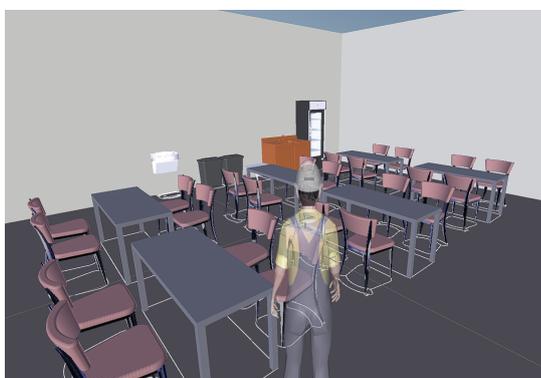
O software *NavisWork* foi utilizado para verificar inconsistências de espaçamento entre maquinários, constatando que o espaçamento entre eles está correto segundo a norma Ministério do Trabalho e Emprego (2010), como demonstra a Figura 49.

Figura 49 – Planta *NavisWork*

(a) Eletrolisador



(b) Torre de Resfriamento



(c) Refeitório

Fonte: Autor (2024)

Após o dimensionamento e a construção do *layout*, faz-se necessário adequá-lo a normas contra incêndio vigentes no Nordeste.

#### 4.2.1 Norma de Segurança contra Incêndio

Para a presente análise adotou-se as normas Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Ceará (CBMEC), que atualmente estão em operação e complementam a instalação de produção de hidrogênio, conforme delineado na Tabela 11

Quadro 11 – Normas Segurança Contra Incêndio Ceará

Norma	Título
CBMCE NT01	Procedimentos Administrativos
CBMCE NT05	Saídas de Emergência
CBMCE NT14/2024	Carga de Incêndio Nas Edificações e Áreas de Risco
CBMCE NT21/2024	Sistema de Proteção Por Extintores de Incêndio

Fonte: Autor (2024)

Faz-se necessário inicialmente classificar o empreendimento conforme a ocupação ou uso, ao qual a usina de hidrogênio se enquadra no grupo de indústrias com carga de incêndio de risco alto, conforme destacado pela Figura 50

Figura 50 – Classificação da Edificação Quanto à Ocupação ou Uso

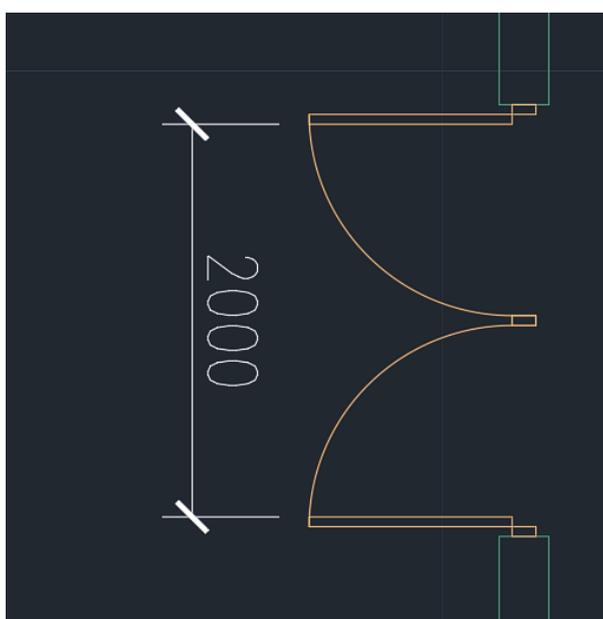
Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Descrição	Tipificação
I	Indústria	I-3	Indústrias com carga de incêndio de risco alto	Fabricação de explosivos e atividades industriais que envolvam líquidos e gases inflamáveis, materiais oxidantes, destilarias, refinarias, ceras, espuma sintética, tintas, borracha e assemelhados

Fonte: CBMCE (2024b)

Com a identificação clara, a mesma norma traz as exigências necessárias para o tipo de edificação, com a usina necessitando de saídas de emergência, iluminação de emergência, sinalização de emergência e extintores para a proteção contra incêndio (CBMCE, 2024b).

As saídas de emergência necessitam possuir uma largura mínima de 1,2 metros para que o processo de extração ocorra de forma organizada e segura (CBMCE, 2008), situação atendida pela usina de hidrogênio conforme Figura 51.

Figura 51 – Largura Saída de Emergência



Fonte: Autor (2024)

Por conta do risco que as substâncias químicas geram, segundo CBMCE (2008) a usina deve possuir a estrutura dimensionada para que o Tempo de Resistência ao

Fogo (TRF) seja superior ao Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), além de não possuir compartimentação vertical e controlar os materiais de acabamento empregados, para que não sejam inflamáveis, se enquadrando no código Z da tabela de classificação das edificações quanto às suas características construtivas.

Antes de prosseguir para a distância mínima para a rota de fuga, faz-se necessário realizar o cálculo de densidade populacional da usina. Conforme a classificação I-3, a CBMCE (2008) esclarece que há uma pessoa para cada 10 m<sup>2</sup> de área, portanto, como a área total da usina é de aproximadamente 175.182 m<sup>2</sup>, tem-se uma estimativa de 17.518 pessoas na usina. Embora as grandes usinas de hidrogênio geralmente operem com cerca de 100 funcionários, devido ao alto nível de automação e integração dos processos (Tianshan, 2024; Hoest, 2024), torna-se altamente recomendável seguir as normativas aplicáveis para garantir conformidade.

Na etapa seguinte, foi realizado o cálculo do número de unidades de passagem, resultando em um total de 96,35 metros de passagens destinadas a locais seguros e protegidos contra incêndios. Para atender a essa demanda, seriam necessárias 49 portas com 2 metros de largura cada.

Por fim, a distância mínima a ser percorrida por um funcionário até um local seguro, levando em conta que a usina conta com detectores automáticos de incêndio, é de 55 metros, conforme elucidado pela Figura 52.

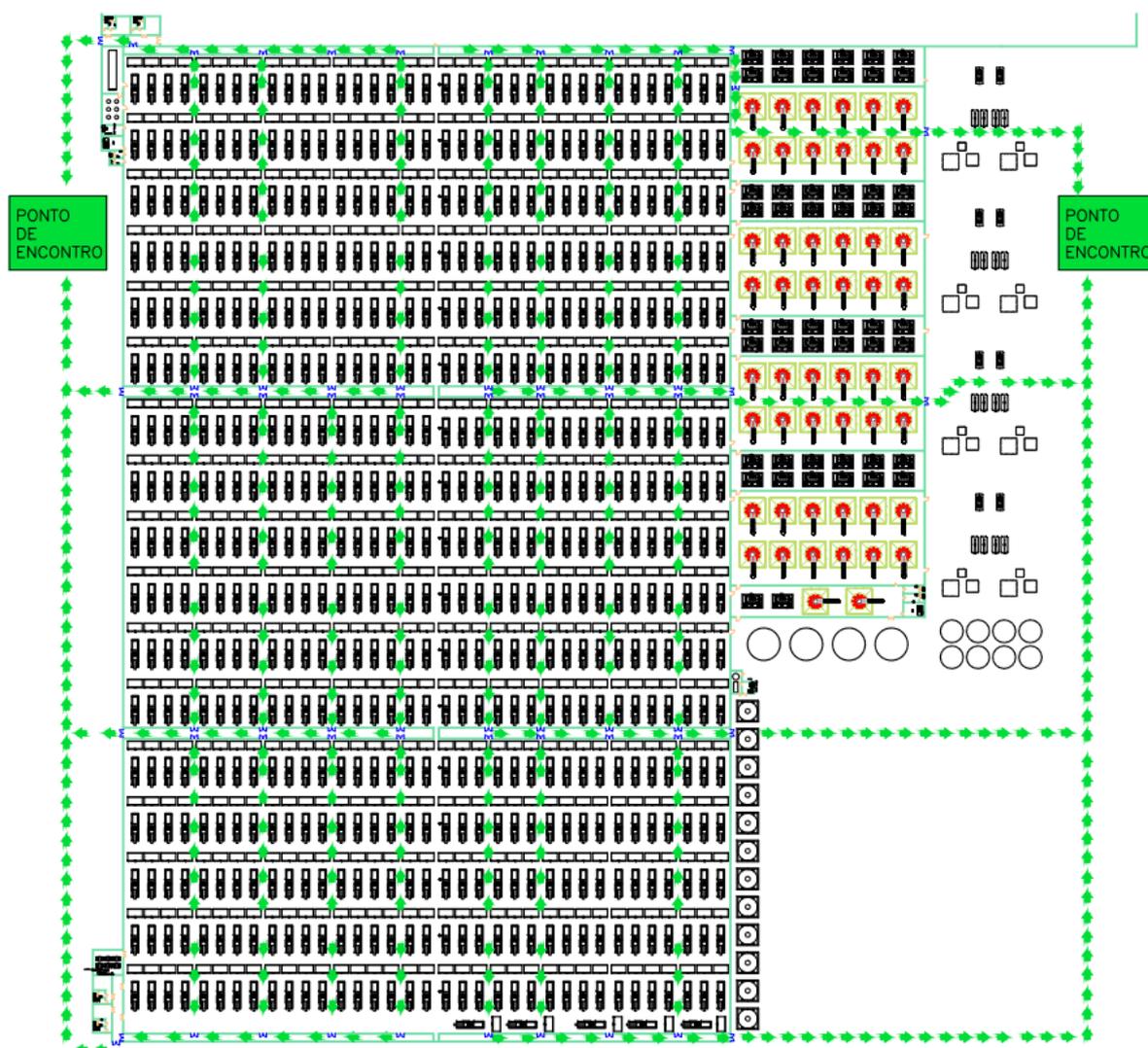
Figura 52 – Distância a ser Percorrida até Local Seguro

Tipo de edificação	Grupo e divisão de ocupação	Sem chuveiros ou sem detectores automáticos		Com chuveiros ou com detectores Automáticos	
		Saída única	Mais de uma saída	Saída única	Mais de uma saída
X	Qualquer	10 m	20 m	25 m	35 m
Y	Qualquer	20 m	30 m	35 m	45 m
Z	C,D,E,F,G-3,G-4, H, I, L e M	30 m	40 m	45 m	55 m
	AB,G-I,G-2 e J	40 m	50 m	55 m	65 m

Fonte: CBMCE (2008)

Por conta da parte da usina onde reside os eletrolisadores ser grande, fez-se necessário a elaboração de corredores pressurizados, conforme Figura 53 aos quais são áreas projetadas para servir como rotas de evacuação seguras durante situações de emergência, como incêndios. Os corredores possuem sistemas de pressurização que mantêm uma pressão de ar positiva em relação aos ambientes adjacentes, impedindo a entrada de fumaça (Sodeca, 2024).

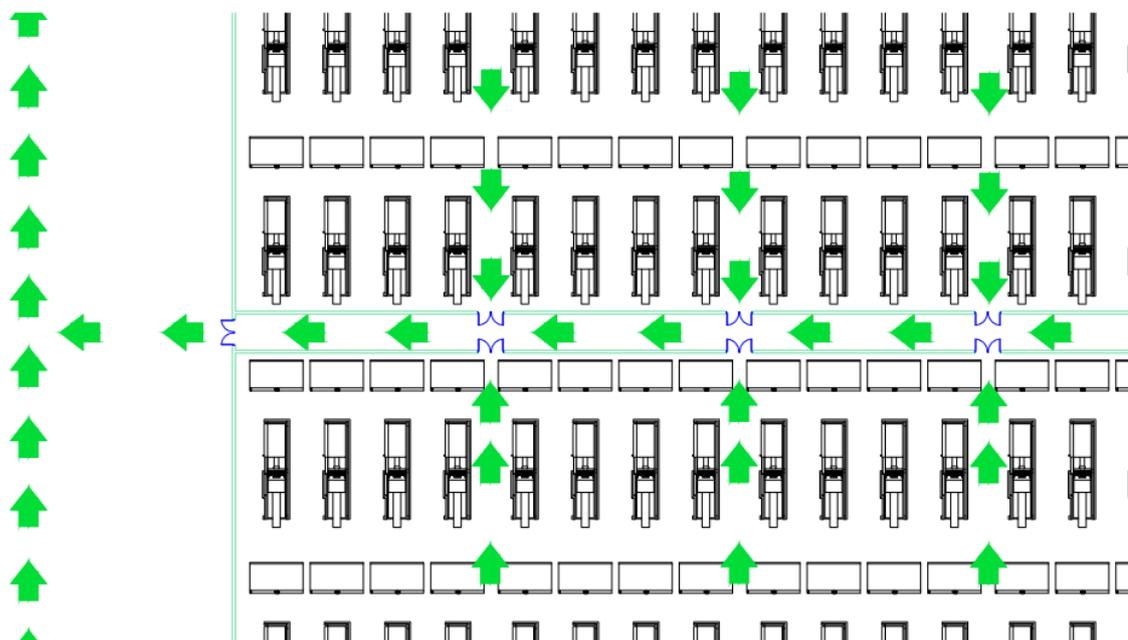
Figura 53 – Planta com Rota de Fuga



Fonte: Autor (2024)

Os corredores se tornaram a principal rota, portanto os setores adjacentes devem se direcionar a rota principal mais próximo, assim garantindo que o funcionário não percorra mais que 55 metros até um local seguro. A Figura 54 destaca um dos corredores principais de forma aproximada, para que possa ter maior clareza do que está ocorrendo. Destaca-se que as portas em azul são responsáveis pela evacuação.

Figura 54 – Rota de Fuga Ampliada



Fonte: Autor (2024)

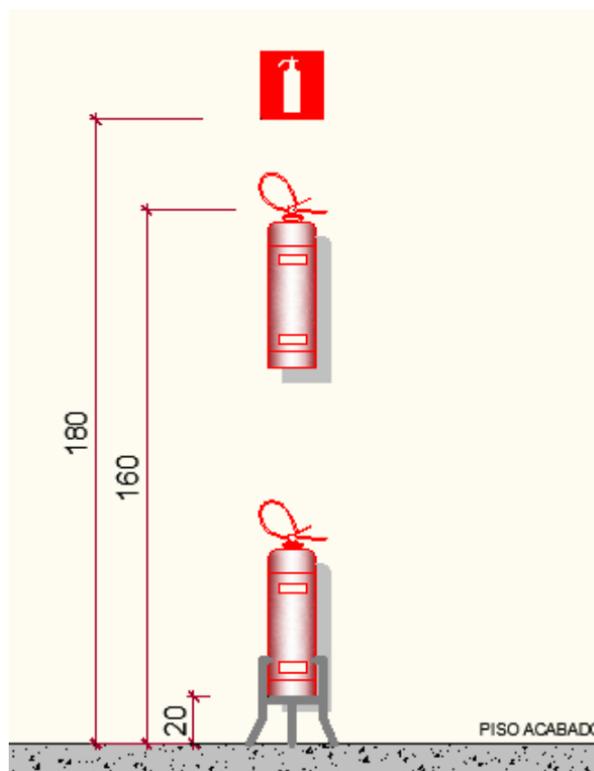
Com a rota de fuga devidamente definida, resta identificar a carga de incêndio da usina e planejar a distribuição dos extintores no empreendimento.

A identificação da carga de incêndio é realizada por meio de similaridade, conforme permitido pela norma NT14/2023 (CBMCE, 2023). Considerando que a usina opera com gases e líquidos explosivos, ela pode ser comparada a uma indústria de processamento de gás natural, apresentando uma carga de incêndio equivalente a 4000 MJ/m<sup>2</sup> (CBMCE, 2023).

Por fim, com um alto risco a segurança caso uma máquina falhe e inicie um incêndio, a tabela de distância máxima de caminamento da norma NT21 permite que o funcionário caminhe apenas 10 metros até o encontro de um extintor (CBMCE, 2024a).

Para cada conjunto de três eletrolisadores e dois chillers, será instalado um extintor portátil do tipo pó químico e do tipo gás carbônico, alternando entre si, sendo posicionado sobre o piso acabado em suportes apropriados, a uma altura de 0,20 metros do chão, conforme ilustrado na Figura 55. Esses extintores atenderão também aos setores auxiliares adjacentes, eliminando a necessidade de instalação interna nesses setores. Adicionalmente, será instalado um extintor em cada entrada da usina, localizado a uma distância máxima de 5 metros, garantindo conformidade com as norma NT21 (CBMCE, 2024a)

Figura 55 – Extintor de Incêndio em Suporte



Fonte: CBMCE (2021)

#### 4.2.2 Mapa de Risco

O Mapa de Riscos é uma técnica prática para identificar qualitativamente os perigos no ambiente de trabalho. Ele é apresentado por meio de uma ilustração gráfica que utiliza círculos variados em tamanho e cor, permitindo uma análise visual clara e de fácil entendimento (Ribeiro, 2023)

Com o objetivo principal de informar de maneira clara e objetiva os riscos ocupacionais às pessoas presentes na empresa, o mapa categoriza os riscos em cinco tipos distintos, identificados por cores, conforme ilustrado na Figura 56.

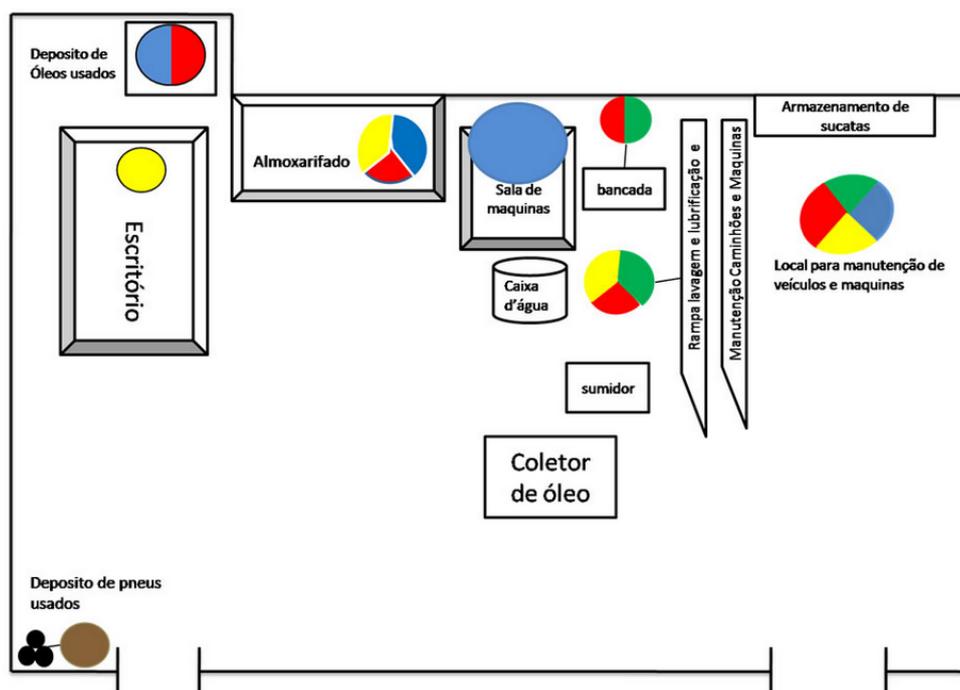
Figura 56 – Tipos de Riscos

Grupo 1 (Verde)	Grupo 2 (Vermelho)	Grupo 3 (Marrom)	Grupo 4 (Amarelo)	Grupo 5 (Azul)
Riscos físicos	Riscos Químicos	Riscos biológicos	Riscos ergonômicos	Riscos de acidentes
Ruído	Poeiras	Vírus	Esforço físico intenso	Arranjo físico inadequado
Vibração	Fumos	Bactérias	Levantamento e transporte manual de peso	Máquinas e equipamentos sem proteção
Radiação ionizante	Neblinas	Fungos	Controle rígido de produtividade	Iluminação inadequada
Radiação não-ionizante	Gases	Parasitas	Imposição de ritmos excessivos	Eletricidade
Frio	Vapores	Bacilos	Trabalho em turno e noturno	Probabilidade de incêndio ou explosão
Calor	Substâncias compostas ou produtos químicos em geral		Jornadas de trabalho prolongadas	Armazenamento inadequado
Pressões anormais			Monotonia e repetitividade	Animais peçonhentos
Umidade			Outras situações causadoras de estresse físico e/ou psíquico	Outras situações de risco que poderão contribuir para a ocorrência de acidentes

Fonte: Siass (2024)

Também para melhor visualização, utiliza-se 3 tamanhos de circunferência e todos os riscos presentes no mesmo ambiente são representados dentro de uma circunferência, quando a magnitude é a mesma, conforme ilustrado na Figura 57.

Figura 57 – Exemplo Mapa de Risco



Fonte: Instituto Santa Catarina (2024)

Portanto para a usina em estudo identificou-se os principais riscos relacionados com cada setor, ao qual estão presentes na Figura 58.

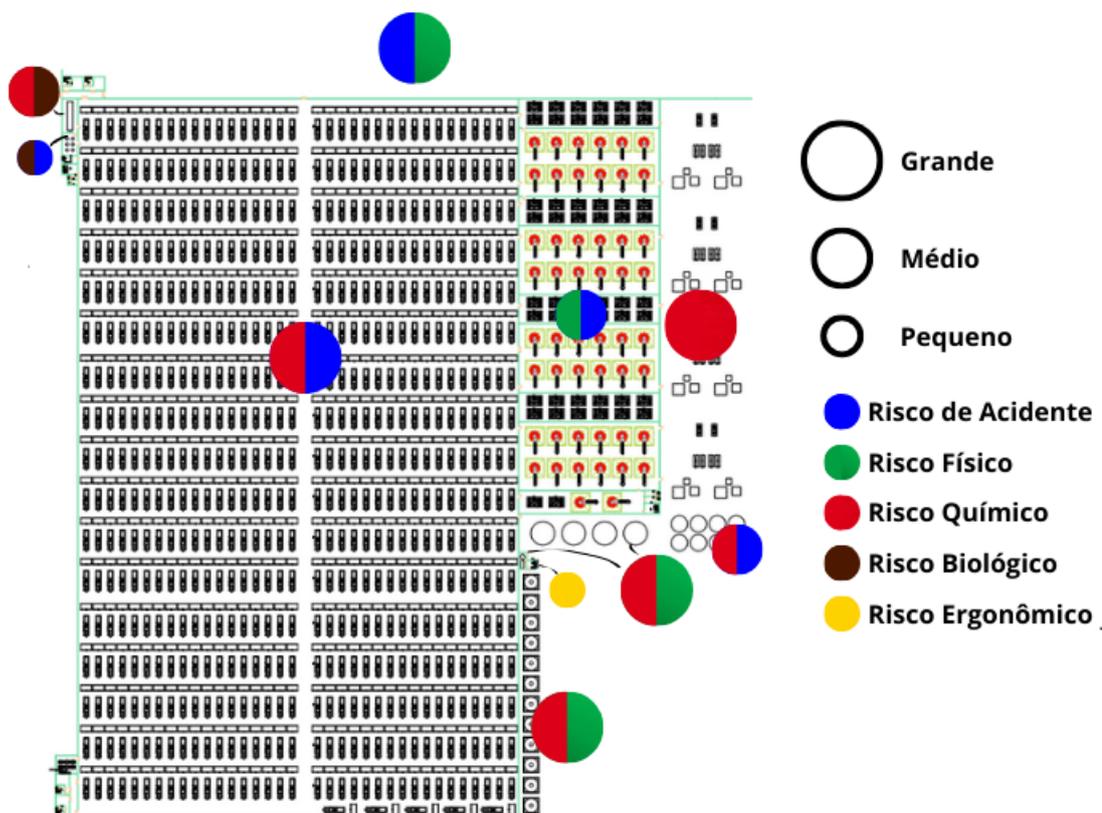
Figura 58 – Riscos Identificados

Setor	Tipo de Risco	Descrição do Risco	Tamanho do Risco
Subestação Onshore	Risco de Acidente	Alta tensão, possibilidade de choque elétrico e arco voltaico	Grande
	Risco Físico	Exposição a ruídos altos provenientes de transformadores	Grande
Tratamento de Água	Risco Químico	Manipulação de produtos químicos para tratamento, riscos de irritação respiratória e dermatológica	Médio
	Risco Biológico	Presença de agentes biológicos na água bruta que podem causar doenças	Médio
Armazenamento de Água Tratada	Risco Biológico	Possível proliferação de microrganismos em condições inadequadas	Pequeno
	Risco de Acidente	Risco de acidentes devido ao manuseio de equipamentos e válvulas	Pequeno
Separador Criogênico	Risco Químico	Exposição a temperaturas extremamente baixas, com risco de queimaduras por congelamento	Grande
		Risco de vazamento de gases criogênicos que podem causar asfixia	Grande
Setor de Armazenamento de N <sub>2</sub>	Risco Químico	Risco de asfixia em caso de vazamento de nitrogênio líquido	Médio
	Risco de Acidente	Perigo associado ao manuseio de cilindros pressurizados	Médio
Sistema Eletrolisador	Risco Químico	Produção de hidrogênio e oxigênio; risco de explosão	Grande
	Risco de Acidente	Alta tensão e corrente, risco de choque elétrico	Grande
Sistema de Resfriamento	Risco Físico	Temperaturas extremas de entrada e saída de água, com risco de queimaduras térmicas	Médio
	Risco de Acidente	Risco de vazamento e danos a equipamentos de tubulação	Médio
Setor de Armazenamento de H <sub>2</sub>	Risco Químico	Alto risco de explosão devido ao armazenamento de hidrogênio em grandes quantidades	Grande
	Risco Físico	Pressão elevada em tanques e tubulações	Grande
Reator de Síntese de Amônia	Risco Químico	Alta pressão e temperatura; risco de explosão e liberação de amônia tóxica	Grande
	Risco Físico	Exposição a temperaturas extremamente altas	Grande
Setor de Arm. de Amônia Líquida	Risco Químico	Amônia líquida é tóxica e corrosiva; risco de vazamento pode causar intoxicação	Grande
	Risco Físico	Risco de pressurização e explosão em tanques	Grande
Setor de Expedição	Risco Ergonômico	Posturas inadequadas, longas horas de trabalho podem causar fadiga e dores musculares	Pequeno

Fonte: Autor (2024)

A Figura 59 ilustra o mapa de risco para o empreendimento em análise.

Figura 59 – Mapa de Riscos Usina



Fonte: Autor (2024)

Destaca-se que a elaboração do mapa de riscos é responsabilidade da Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA). Conforme disposto na Norma Regulamentadora 5, cabe aos membros da CIPA, na presença de trabalhadores locais, realizar o mapeamento dos riscos no ambiente de trabalho (Brasil, 2022).

Por fim, os riscos encontrados na produção e armazenamento de hidrogênio e amônia, como explosões e vazamentos, exigem medidas de controle rigorosas. A proximidade desses setores críticos demanda a implementação de barreiras físicas e sistemas de monitoramento contínuo de pressão e temperatura. Além disso, protocolos de resposta a emergências, incluindo simulações periódicas e treinamentos, são necessários para minimizar a probabilidade de acidentes graves e proteger os trabalhadores, as instalações e o meio ambiente.

#### 4.3 ANÁLISE DE CUSTOS PARA EXPORTAÇÃO

A análise de custos se torna importante para verificar a viabilidade do projeto proposto nos tópicos anteriores, sendo descrito portanto os custos de investimento

inicial, operacional e de exportação, finalizando com a análise do tempo de *payback* com a venda do produto final.

Os custos de uma usina de hidrogênio do tipo em análise são divididos em 3 grandes grupos, custo do complexo eólico, da planta de hidrogênio e da planta de amônia (Guerra, 2023), sendo os custos subdivididos em duas categorias distintas, *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* (OPEX).

O CAPEX de um projeto eólico engloba os custos relacionados ao desenvolvimento e concessão, fabricação e aquisição, bem como à instalação e comissionamento. Geralmente constituindo um valor significativo, uma vez que inclui a aquisição de ativos de longo prazo que serão utilizados ao longo de toda a vida útil do empreendimento (NREL, 2021).

Já para a instalação de um eletrolisador, os custos abrangem a aquisição do equipamento, os sistemas de tratamento de gás, o balanceamento da planta (BOP), além dos custos associados à engenharia, e construção (IEA, 2022). Ao qual BOP refere-se a um termo amplamente utilizado na engenharia de energia e de processos para designar todos os componentes de suporte e sistemas auxiliares de uma usina que são essenciais para o fornecimento de energia ou para a produção de um produto, excluindo a unidade geradora principal (Synerhy, 2022; Engenharia, 2024).

Por fim, o CAPEX para a planta de produção de amônia abrange tanto a aquisição dos componentes principais quanto o balanceamento da planta (Guerra, 2023).

Os CAPEX específicos de cada etapa estão elucidados na Tabela 6.

Tabela 6 – CAPEX Específico

Sistemas	CAPEX	Referência
Complexo Eólico	6.235 \$/kW	(NREL, 2021)
Planta de Hidrogênio	600\$/kW	(IEA, 2022)
Planta de Amônia	654,7 \$/toneladas	(Guerra, 2023)

Fonte: Autor (2024)

Já o OPEX é frequentemente estimado como uma porcentagem do CAPEX devido à dificuldade e complexidade na mensuração precisa dos custos variáveis associados à operação e manutenção, como ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 – OPEX

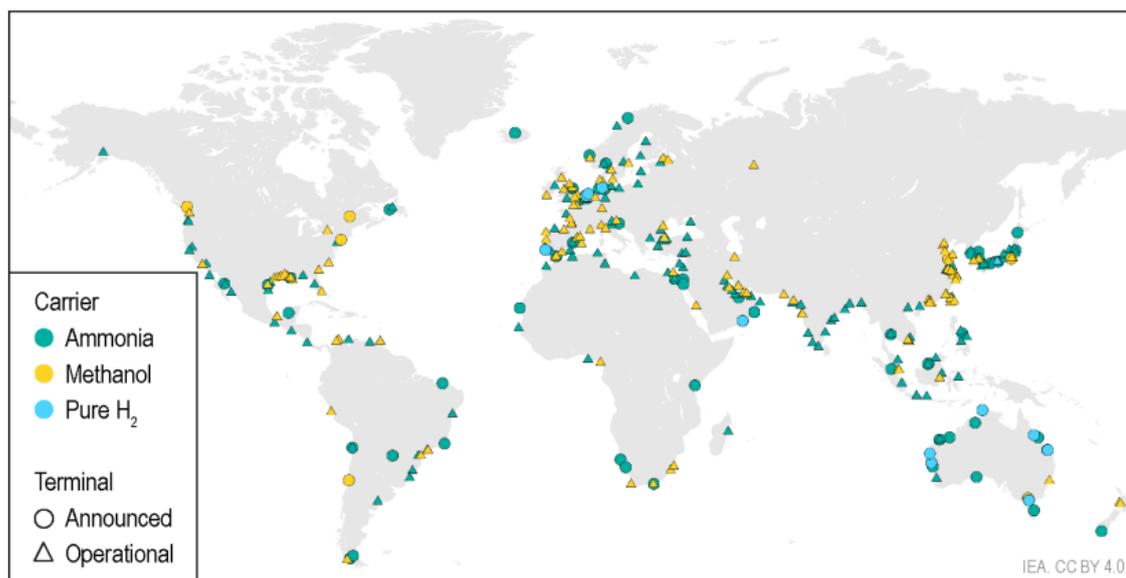
Sistemas	OPEX	Referência
Complexo Eólico	2% do CAPEX	(Aquila <i>et al.</i> , 2021)
Planta de Hidrogênio	2,5% do CAPEX	(Oliveira, E., 2021; Khan <i>et al.</i> , 2021)
Planta de Amônia	1% do CAPEX	(Lara; Pena, 2023)

Fonte: Autor (2024)

Com base nesses dados, pode-se calcular o custo da planta. Entretanto, é imprescindível realizar o cálculo logístico, considerando a adoção de um sistema de exportação. Para isso, definiu-se o local de origem e o destino final.

Há 150 portos com infraestrutura de importação e exportação de amônia, conforme ilustrado na Figura 60

Figura 60 – Portos com Infraestrutura para Importação e Exportação de Amônia



Fonte: IEA (2022)

Dessa forma, o cálculo logístico considerou dois portos já existentes: o Porto de Pecém, no Brasil, e o Porto de Roterdã, na Holanda. Além disso, destaca-se que o Porto de Roterdã conta com um projeto de craqueamento de amônia em grande escala (IEA, 2022).

Realizou-se o levantamento dos custos associados a utilização do Porto do Pecém para a exportação, ao qual estão descritos na Tabela 8, fez-se a conversão de reais para dólares utilizando a taxa de câmbio do dolar no mês de outubro de 2024, ao qual estava de 5,57 reais (BRASIL, 2024).

Tabela 8 – Custos Porto Pecém

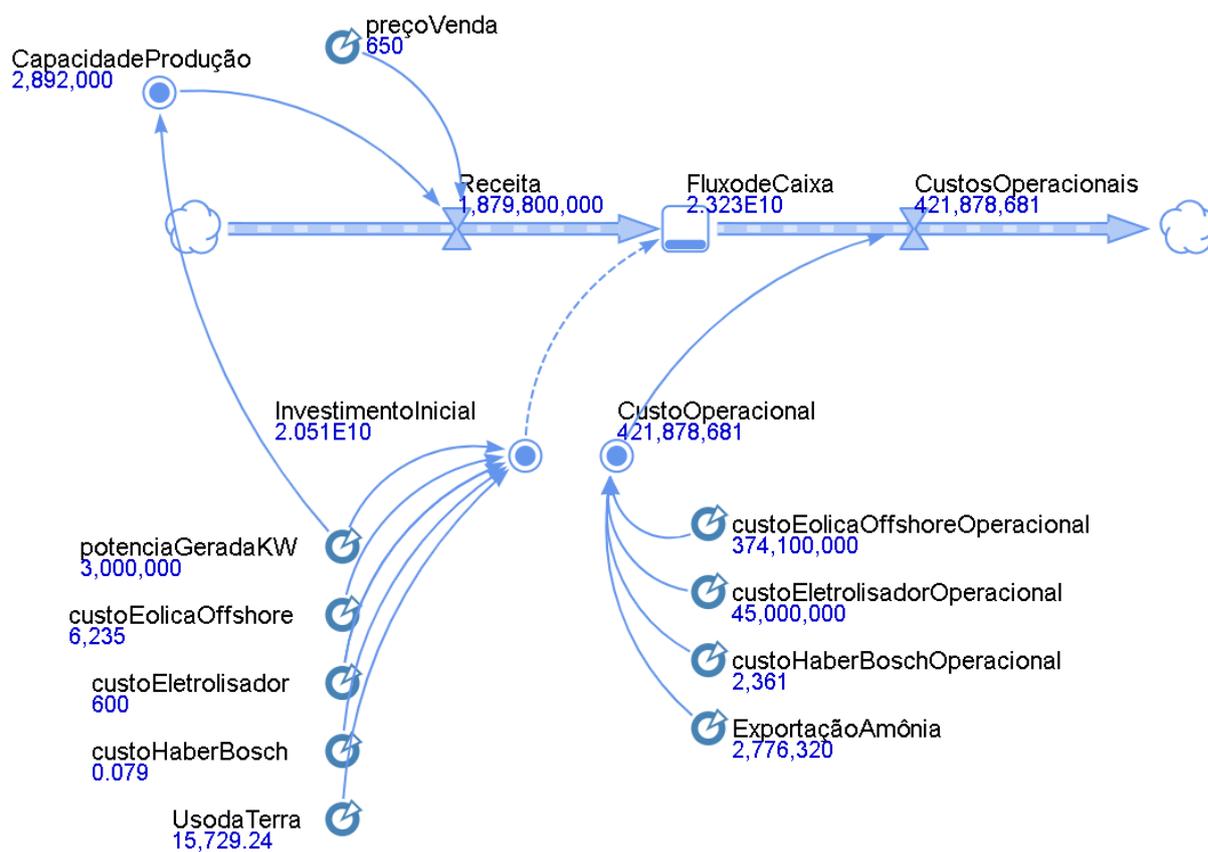
Tipo de Custo	Valor	Referência
Uso da Terra	897,88 \$/hectare	(Pecém, 2023)
Exportação de Amônia	0,96 \$/tonelada	(Pecém, 2024)

Fonte: Autor (2024)

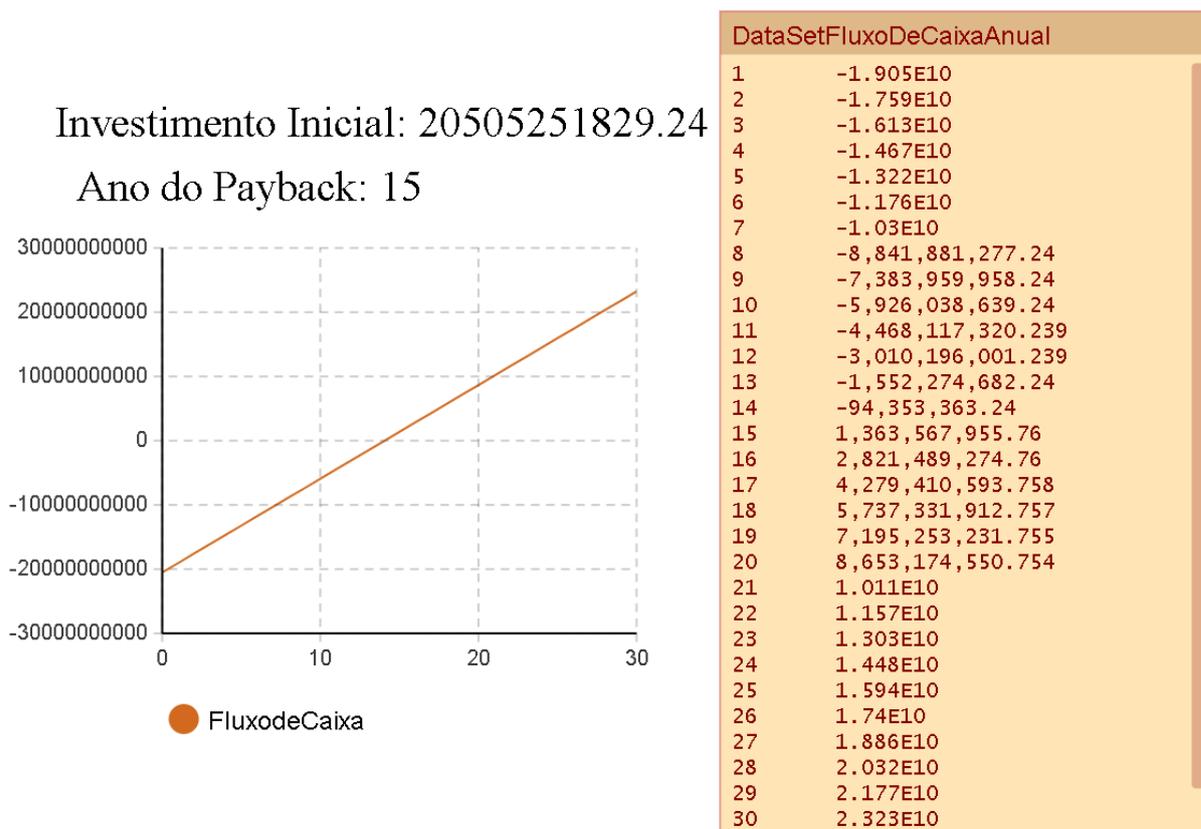
Por fim, para o cálculo da receita da usina, foi considerado o preço de venda da amônia, estipulado em 650 \$/tonelada.

Para auxiliar no cálculo e na análise, utilizou-se a modelagem de sistemas dinâmicos presente na biblioteca do *AnyLogic*, ao qual o resultado está exposto nas Figuras 61 e 62.

Figura 61 – Modelo *AnyLogic*



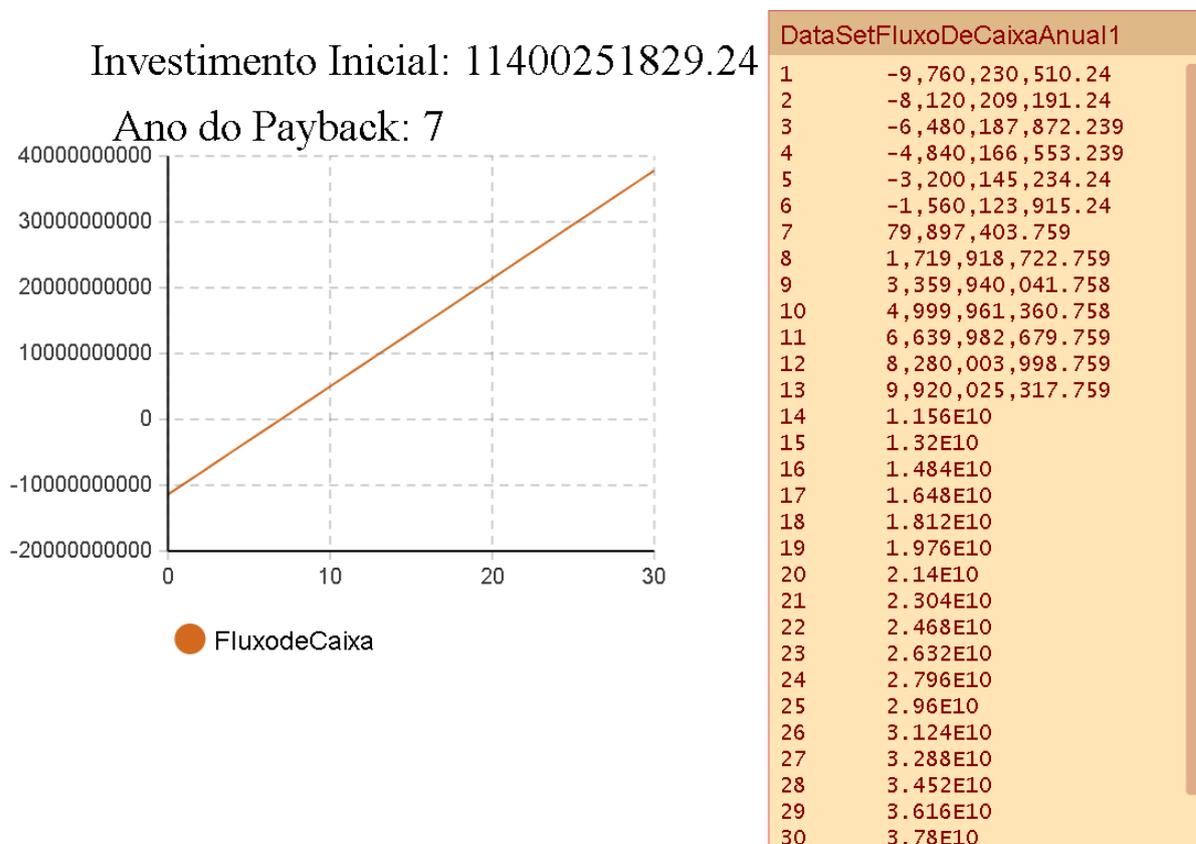
Fonte: Autor (2024)

Figura 62 – Simulação *AnyLogic*

Fonte: Autor (2024)

O investimento inicial, calculado em 20,5 bilhões de dólares, representa um custo elevado, com o *payback* projetado para ocorrer entre os anos 14 e 15. A maior parte desse montante está associada ao complexo eólico, devido à alta complexidade tecnológica e logística envolvida em sua implementação. Esses valores estão de acordo com os padrões observados em usinas de capacidade semelhante, conforme documentado por estudos recentes (Newswire, 2024; Neeves, 2024; World, 2024).

Embora significativo, o investimento tende a diminuir à medida que o avanço tecnológico e a maior escala de implantação de projetos de energia eólica *offshore* promovem reduções nos custos. Projeções indicam que os custos de geração por energia eólica *offshore* podem atingir 3.200 \$/kW até 2030 (IRENA, 2019). Essa diminuição terá um impacto substancial no investimento inicial, resultando em uma redução considerável no tempo de *payback*, como demonstrado na Figura 63.

Figura 63 – Simulação *Anylogic* com Redução do CAPEX do Complexo Eólico

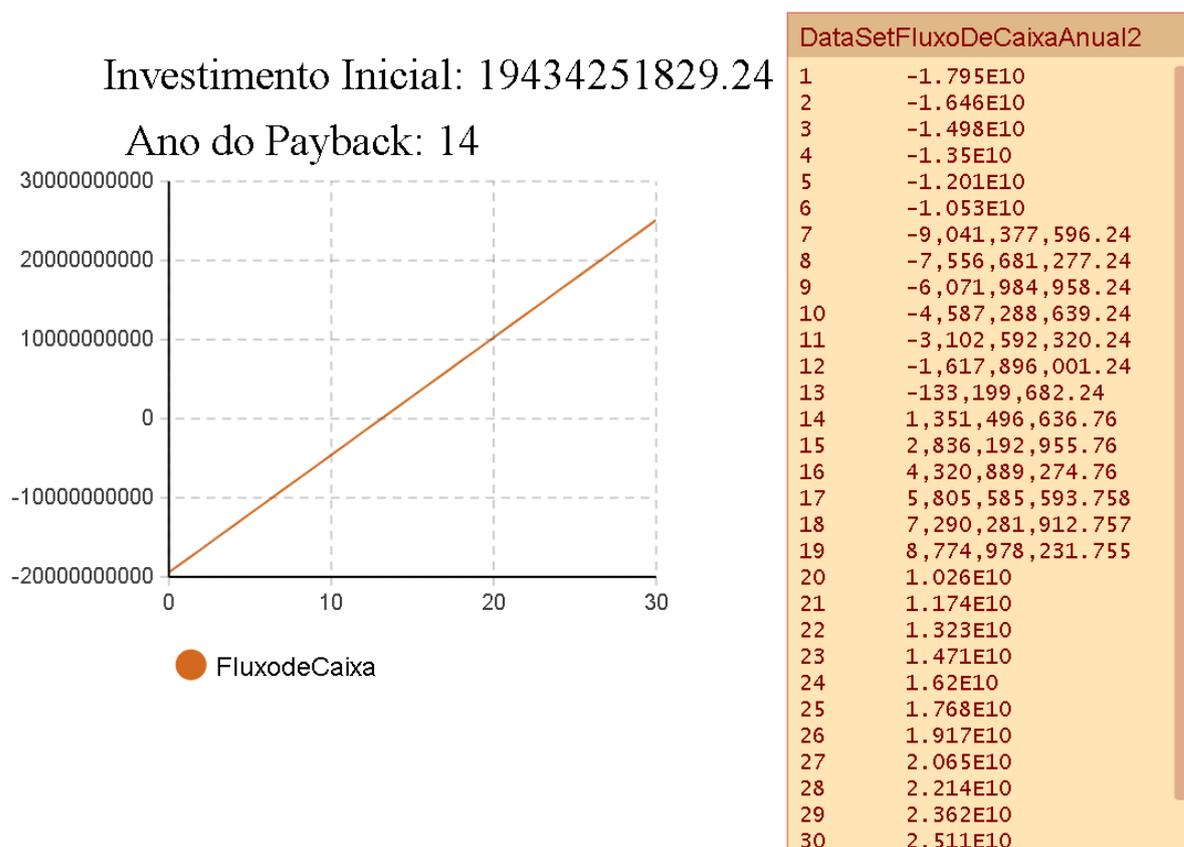
Fonte: Autor (2024)

Apesar do complexo eólico ser responsável pela maior parcela do investimento inicial, os demais componentes da usina, como os eletrolisadores, também desempenham um papel significativo nos custos totais. Esses equipamentos, responsáveis pela conversão de energia elétrica em hidrogênio verde, apresentam valores expressivos de CAPEX no cenário atual. No entanto, avanços tecnológicos e o aumento da escala de produção global têm impulsionado uma tendência de redução de custos, tornando os eletrolisadores uma área estratégica para otimização financeira nos próximos anos (IRENA, 2021).

Para os eletrolisadores, prevê-se uma redução significativa nos custos de investimento inicial, alcançando 243 \$/kW até 2030 (Zun; Mclellan, 2023). Essa redução projetada para o CAPEX do eletrolisador, somada à eficiência crescente dos sistemas de eletrólise, não apenas diminui os custos do investimento inicial, mas também impacta diretamente no custo por tonelada de hidrogênio produzido. Com base nos valores estimados, a redução de 357 \$/kW entre o cenário atual e 2030 representa uma economia de aproximadamente 1,071 bilhões de dólares no CAPEX total dos eletrolisadores da usina. Essa economia, quando incorporada ao fluxo de caixa do

projeto, pode reduzir o tempo de *payback* em cerca de 1 a 2 anos, considerando um cenário de operação estável e demanda global crescente por hidrogênio verde. Além disso, a Figura 64 ilustra como essa diminuição de custos impacta positivamente o fluxo financeiro do projeto, reforçando sua viabilidade econômica a longo prazo.

Figura 64 – Simulação *Anylogic* com Redução do CAPEX do Eletrolisador



Fonte: Autor (2024)

Os resultados obtidos ao longo desta análise confirmam que as reduções projetadas nos custos de componentes principais, como o complexo eólico e os eletrolisadores, são fatores fundamentais para garantir a viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde a longo prazo. Esses avanços tecnológicos, associados à estratégia de conversão em amônia e posterior exportação, posicionam a usina como uma iniciativa competitiva em um mercado global em constante evolução. Além disso, a integração de tecnologias de ponta e o uso de fontes renováveis destacam o projeto como um exemplo sustentável e economicamente estratégico.

Dessa forma, com base nos dados analisados, conclui-se que a usina de hidrogênio verde desenvolvida neste estudo apresenta viabilidade econômica, mesmo frente aos elevados custos iniciais de investimento. A perspectiva de redução nos custos do complexo eólico e dos eletrolisadores, somada à crescente demanda global por

hidrogênio verde, fortalece a competitividade do projeto no cenário internacional. Adicionalmente, a estratégia de conversão para amônia e exportação não apenas otimiza a logística, mas também amplia as oportunidades de comercialização, assegurando um retorno financeiro atrativo a médio e longo prazo. Assim, a usina proposta se consolida como um modelo viável economicamente e relevante para o avanço sustentável da matriz energética global.

#### 4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Os principais resultados obtidos durante o planejamento da usina de H<sub>2</sub>V com energia eólica são apresentados nesta seção. A análise englobou aspectos técnicos, produtivos, econômicos e normativos, consolidando informações fundamentais para demonstrar a viabilidade do projeto. Esses dados foram organizados na Tabela 9, que sintetiza os pontos mais relevantes do empreendimento.

O *layout* da usina foi desenvolvido com foco estratégico, garantindo a alocação eficiente dos setores e maximizando o aproveitamento do espaço. A disposição planejada das áreas produtivas e de suporte foi projetada para favorecer a eficiência operacional, reduzindo perdas e otimizando os fluxos de trabalho.

A segurança foi um dos pilares centrais no planejamento do projeto. Normas de segurança foram adotadas para proteger os trabalhadores, o ambiente e a integridade das instalações. Regulamentações como as do CBMCE e da NR foram seguidas, assegurando a conformidade com os padrões nacionais e minimizando os riscos associados às operações industriais.

Outro aspecto de destaque foi a análise da capacidade de produção da usina. O projeto segue tendências globais, posicionando o empreendimento como um megaprojeto no mercado de hidrogênio verde. A estimativa de produção foi dimensionada para atender às demandas internacionais, reforçando o papel do Brasil como protagonista no setor de energia limpa.

Por fim, foi realizada uma análise da viabilidade econômica do projeto. Essa etapa envolveu a análise do tempo de retorno do investimento (*payback*) e a análise sobre a viabilidade de iniciar a construção da usina de imediato ou postergar o projeto, aguardando uma possível redução nos custos de componentes-chave, como eletrolisadores e turbinas. Essa avaliação foi essencial para validar a viabilidade do empreendimento no contexto econômico vigente.

Tabela 9 – Síntese dos Resultados

Setores da Usina	Área	Produto final	Quantidade diária
Turbinas Eólicas + <i>Offshore</i>	457 km <sup>2</sup>	Hidrogênio Verde	1397,26 toneladas
Subestação <i>Onshore</i>	100.000 m <sup>2</sup>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Demanda diária</b>
Tratamento de Água	91,5 m <sup>2</sup>	Energia Elétrica	65.671,22 MWh
Separador Criogênico	6.662,5 m <sup>2</sup>	Água	12.575.340 litros
Sistema Eletrolisador	55.440 m <sup>2</sup>	<b>Formas de Segurança: Código</b>	
Sistema de Resfriamento	10.444 m <sup>2</sup>	NR	5
Reator de Síntese de Amônia	17,9 m <sup>2</sup>	CBMCE	NT01
Setor de Expedição	15 m <sup>2</sup>	CBMCE	NT05
<b>Viabilidade Econômica</b>		CBMCE	NT14/2024
Investimento Inicial	\$20,5 Bilhões	CBMCE	NT21/2024
<i>Payback</i>	15 anos		

Fonte: Autor (2024)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo sintetiza os principais resultados alcançados ao longo do estudo, avaliando o *layout* proposto para a usina de hidrogênio verde em relação aos objetivos estabelecidos. As conclusões destacam as contribuições técnicas e econômicas do projeto, reforçando sua viabilidade e alinhamento com as tendências globais de sustentabilidade.

Além disso, são apresentadas recomendações para trabalhos futuros, com foco em áreas não exploradas neste estudo, como análises ambientais detalhadas e melhorias no dimensionamento de sistemas específicos.

### 5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral projetar uma usina de hidrogênio verde no Brasil, utilizando energia eólica como fonte principal, com foco na exportação por meio da conversão do hidrogênio em amônia. Após a realização das etapas propostas e a análise dos resultados obtidos, conclui-se que o objetivo geral foi plenamente atingido. A proposta apresentada demonstra viabilidade técnica e econômica, além de estar alinhada com as tendências globais de sustentabilidade e descarbonização.

Para atingir este objetivo geral, foram definidos quatro objetivos específicos, todos alcançados ao longo do estudo. O primeiro objetivo específico consistia em identificar os principais desafios e oportunidades no desenvolvimento de usinas de hidrogênio verde no Brasil com base na energia eólica. Este objetivo foi plenamente atendido por meio de uma revisão teórica abrangente, que explorou os aspectos técnicos, econômicos e ambientais relacionados ao tema. Os desafios mais evidentes, destacados na seção de problemática, incluem os altos custos iniciais de investimento, a complexidade logística e as dificuldades inerentes à intermitência das fontes renováveis, como a energia eólica. Em contrapartida, o Brasil apresenta oportunidades excepcionais, como o vasto potencial de energia eólica *offshore* e a infraestrutura portuária existente, aspectos detalhados na seção de identificação, que favorecem o desenvolvimento e a exportação de hidrogênio verde. O estudo também revelou a importância de uma análise crítica da cadeia de suprimentos, considerando a disponibilidade de recursos e a dependência de tecnologias estrangeiras, além da necessidade de incentivar a produção nacional de equipamentos e o desenvolvimento de tecnologias no país.

O segundo objetivo específico buscava desenvolver uma metodologia baseada na abordagem *Systematic Layout Planning* (SLP) para o projeto integrado de usinas de hidrogênio verde. Este objetivo foi alcançado por meio da aplicação dessa metodologia para estruturar o *layout* da usina, demonstrado na seção 4.2. Os principais componentes, como o complexo eólico, os eletrolisadores e os sistemas de conversão de hidrogênio em amônia, foram organizados de maneira eficiente e fundamentada em

critérios de proximidade, funcionalidade e otimização espacial, alcançando um nível de funcionalidade do layout de 85,71%. Essa abordagem permitiu criar uma planta integrada que atende aos requisitos técnicos e operacionais do projeto, com uma área final de 175.182 m<sup>2</sup> em terra e 457 km<sup>2</sup> no mar. Adicionalmente, o estudo explorou a influência da localização geográfica e das condições ambientais, como velocidade do vento e profundidade do mar, na escolha do local de instalação da usina, conforme descrito na seção 4.1.1.

Os dois últimos objetivos específicos eram avaliar a viabilidade econômica e o potencial de exportação da usina projetada com base na metodologia proposta. Estes objetivos foram atingidos por meio de uma análise detalhada dos custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX), apresentada na seção 4.3, bem como pela modelagem de cenários futuros considerando projeções de redução de custos em componentes-chave, como o complexo eólico e os eletrolisadores, detalhada na mesma seção. Os resultados confirmaram que a usina apresenta viabilidade econômica, com um investimento inicial de \$20,5 bilhões e um tempo de retorno do investimento estimado entre os anos 14 e 15 no cenário atual. Além disso, a demanda crescente por hidrogênio verde no mercado internacional reforça a competitividade e a atratividade do projeto.

Embora os resultados confirmem a viabilidade e os benefícios do projeto, faz-se necessário reconhecer os potenciais impactos sociais associados à implantação da energia eólica *offshore* e da planta projetada. A ocupação de áreas marítimas e terrestres pode afetar significativamente as comunidades locais, especialmente os pescadores artesanais, que dependem dessas regiões para sua subsistência. Além disso, outros grupos como empresas de transporte marítimo, organizações ambientais preocupadas com a preservação dos ecossistemas locais, operadores portuários e moradores das áreas adjacentes às instalações podem ser diretamente impactados. Esses diferentes interesses podem gerar conflitos sobre o uso do território e dos recursos naturais, reforçando a necessidade de um planejamento cuidadoso e participativo para equilibrar as demandas econômicas, sociais e ambientais de maneira justa e sustentável.

As contribuições deste trabalho se manifestam em diferentes dimensões. No campo acadêmico, ele apresenta uma abordagem sistemática e replicável para o desenvolvimento de usinas de hidrogênio verde, utilizando o Brasil como um caso de estudo com características únicas. A aplicação da metodologia SLP e a integração de análises econômicas com dados técnicos fornecem um modelo útil para futuras pesquisas na área, especialmente no contexto brasileiro. Para as empresas, o estudo oferece *insights* valiosos sobre os desafios e oportunidades envolvidos na implementação de projetos de hidrogênio verde, além de destacar os benefícios econômicos e ambientais associados a essa tecnologia. Por fim, para a sociedade, o trabalho traz contribuições significativas ao promover soluções que fomentam a descarbonização, impulsionam a

economia local, geram empregos e posicionam o Brasil como um exportador estratégico de energia limpa.

Em síntese, este trabalho não apenas alcançou seus objetivos principais, mas também lançou as bases para futuras pesquisas e aplicações práticas, contribuindo para o avanço da produção de hidrogênio verde e seu papel estratégico na transição energética global. Adicionalmente, o estudo fornece subsídios para a formulação de políticas públicas e incentivos que promovam o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio verde no Brasil, impulsionando a inovação, a geração de empregos e a sustentabilidade.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Apesar do sucesso em atingir os objetivos propostos, algumas limitações do estudo abrem oportunidades para trabalhos futuros. Uma das recomendações é realizar uma análise mais detalhada da cadeia logística de exportação de hidrogênio e amônia, abordando os desafios específicos do transporte marítimo, regulamentações internacionais e possíveis otimizações logísticas, incluindo a investigação de diferentes rotas de transporte e a comparação entre diferentes portos de destino. Outra sugestão é explorar a integração de outras fontes de energia renovável, como solar e biomassa, ao processo de eletrólise, investigando como a combinação dessas fontes pode mitigar os efeitos da intermitência e aumentar a eficiência da usina. Essa análise pode incluir a modelagem de cenários híbridos, considerando a disponibilidade e complementaridade de diferentes fontes renováveis ao longo do ano.

Por fim, recomenda-se uma análise mais aprofundada dos impactos ambientais e sociais associados à implementação e operação da usina, incluindo estratégias para mitigar esses efeitos e garantir a sustentabilidade do projeto. Essa análise pode ser complementada por estudos de ciclo de vida e avaliações de impacto ambiental, que possibilitem uma compreensão mais abrangente das externalidades do projeto. Também se sugere a inclusão de uma análise de riscos mais detalhada, que aborde as incertezas e desafios específicos relacionados a cada etapa do projeto, desde a obtenção de licenças e autorizações até a operação e manutenção da usina.

## REFERÊNCIAS

ABDIN, Zainul; ZAFARANLOO, Ali; RAFIEE, Ahmad; MÉRIDA, Walter; LIPÍŃSKI, Wojciech; KHALILPOUR, Kaveh R. Hydrogen as an energy vector. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 120, p. 109620, 2020.

ABEEÓLICA. **Relatório anual 2021**. São Paulo: [s.n.], 2021.

ADEDOJA, Oluwaseye Samson; SALEH, Umar Abubakar; ALESINLOYE, Adeyemi Raifu; TIMIYO, Tebe-Ebi Justice; ONUIGBO, Ifeanyi Francis; ADEJUWON, Olalekan Opeyemi; JOSIAH, Ezekiel. An energy balance and multicriterial approach for the sizing of a hybrid renewable energy system with hydrogen storage. **e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, Elsevier, v. 4, p. 100146, 2023.

AKWA, João Vicente. **Análise aerodinâmica de turbinas eólicas Savonius empregando dinâmica dos fluidos computacional**. 2010. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ALMEIDA, Lucas da Silva. Revisão sistemática da literatura: software de gestão de estoque. Universidade Federal de Campina Grande, 2023.

ALPINA. **Torres de Resfriamento de Água - Série BE**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 10 nov. 2024 . Disponível em: <https://www.alpinaequipamentos.com.br/produto/torres-de-resfriamento-de-agua/serie-be/3>.

AMORIM, Thiago *et al.* Aplicação do método SLP no Centro Cirúrgico e UTI de um hospital pediátrico de Santa Catarina. Florianópolis, SC., 2023.

ANEEL. **Nota Técnica nº 088/2020-SGT**. [S.l.], 2020. Acesso em: 28 nov. 2024. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020884\\_2.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020884_2.pdf).

ANTONOV, Anton. APPLICATION OF AUTODESK SOFTWARE PRODUCT FOR TRAINING OF STUDENTS IN GENERAL ENGINEERING: APPLICATION OF AUTODESK SOFTWARE PRODUCT FOR TRAINING OF STUDENTS IN GENERAL ENGINEERING. **Journal scientific and applied research**, v. 13, n. 1, p. 31–35, 2018.

AQUILA, Giancarlo; NAKAMURA, Wilson Toshiro; JUNIOR, Paulo Rotella; ROCHA, Luiz Celio Souza; OLIVEIRA PAMPLONA, Edson de. Perspectives under uncertainties and risk in wind farms investments based on Omega-LCOE approach: An analysis in São Paulo state, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 141, p. 110805, 2021.

ARAUJO, Antonio; SKOGESTAD, Sigurd. Control structure design for the ammonia synthesis process. **Computers and Chemical Engineering**, Elsevier, v. 32, n. 11, p. 2920–2932, 2008.

ASIACHEM. **Hydrogen Economy Weekly Report**. [S.l.: s.n.], 2022. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: [https://www.asiachem.org/en/fcv\\_20220815](https://www.asiachem.org/en/fcv_20220815).

BARROSO, Amanda Maria Rodrigues; ROCHA, Brenda Virna Sousa; ALVES, Luis Felipe Leal; MEIRELES FILHO, Mário RG. **Obtenção do Hidrogênio Verde a partir de energias renováveis**. [S.l.: s.n.], 2022.

BERTUCCIOLI, Luca; CHAN, Alvin; HART, David; LEHNER, Franz; MADDEN, Ben; STANDEN, Eleanor. **Development of water electrolysis in the European Union**. [S.l.]: Hydrogen Knowledge Centre, 2014.

BHANDARI, Ramchandra; SHAH, Ronak Rakesh. Hydrogen as energy carrier: Techno-economic assessment of decentralized hydrogen production in Germany. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 177, p. 915–931, 2021.

BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO CEARÁ (CBMCE), Corpo de. **Corpo de Bombeiros orienta o uso adequado de extintores de incêndio**. Acesso em: 12 nov. 2024. 2021. Disponível em: <https://www.bombeiros.ce.gov.br/2021/05/26/corpo-de-bombeiros-orienta-o-uso-adequado-de-extintores-de-incendio/>.

BORGE-DIEZ, David; ROSALES-ASENSIO, Enrique; AÇIKKALP, Emin; ALONSO-MARTÍNEZ, Daniel. Analysis of Power to Gas Technologies for Energy Intensive Industries in European Union. **Energies**, MDPI, v. 16, n. 1, p. 538, 2023.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 05 - Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA)**. [S.l.: s.n.], 2022. Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos->

colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-05-atualizada-2022.pdf.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-24: Condições Sanitárias e de Conforto nos Locais de Trabalho.** [S.l.: s.n.], 1978.

Acesso em: 20 out. 2024. Disponível em:

<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/assuntos/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-24>.

BRASIL, Receita Federal do. **Tabelas de conversão para 2024 - Meu Imposto de Renda.** [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 12 nov. 2024. Disponível em:

<https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/meu-imposto-de-renda/tabelas/conversao/2024>.

BRITTO, Gabriella Lopes; GOIS, Juliana Vilanova. Proposta de melhoria de layout em uma empresa de confecções através da aplicação do método SLP. **Anais do VII SIMPROD**, Departamento de Engenharia de Produção-Universidade Federal de Sergipe, 2015.

CABRAL, Rosiane Muniz; SOUSA, Maria Losângela Martins de; OLIVEIRA, Vlândia Pinto Vidal de. O Açude Castanhão como Política Pública para Promover Ações de Convivência com o Semiárido. **Universidade Federal do Ceará**, 2015. Trabalho Acadêmico.

CARREIRÓ, Daniel Cardeal. **Aplicação da Metodologia BIM a um Caso de Estudo através do software Autodesk Navisworks.** 2018. Tese (Doutorado) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

CARVALHO, Evellyn Mirelli. **O licenciamento ambiental de energia eólica no Brasil e em território Norte-rio-grandense.** [S.l.: s.n.], 2022. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

CARVALHO, João Vitor. **Turbinas Eólicas ou Aerogeradores.** 2024. Disponível em: <https://oakenergia.com.br/turbinas-eolicas/>. Acesso em: 11 jul. 2024.

CAZANOVA, Catarina Maria Trindade. Hidrogênio verde: monitoramento científico e tecnológico. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023.

CBMCE. **Norma Técnica N° 005/2008: Saídas de Emergência.** [S.l.], 2008.

CBMCE. **Norma Técnica N° 14/2023: Carga de Incêndio nas Edificações e Áreas de Risco.** [S./], 2023.

CBMCE. **Norma Técnica N° 21/2024: Sistema de Proteção por Extintores de Incêndio.** [S./], 2024. Aprovada em publicação BCG nº 120 de 28 de junho de 2024, publicada no DOE nº 117, série 3, ano 2024, pp.173-175.

CBMCE. **Norma Técnica Nº. 01/2024: Procedimentos Administrativos.** [S./], 2024.

CERUTTI, Alef Júlio Schaefer *et al.* Energia Eólica Offshore, um caminho para a transição energética: uma abordagem no contexto do panorama Offshore, Hidrogênio Verde e ESG. Araranguá, SC., 2023.

CFR. **O que é:** Usina de energia. 2023. Disponível em: <https://cfmultimarcas.com.br/glossario/o-que-e-usina-de-energia/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

CHINESE REFRIGERATION EQUIPMENT CO. **Ammonia Liquid Separator.**

[S./: s.n.]. Acesso em: 28 nov. 2024. Disponível em:

<http://www.chineserefrigeration.com.pt/3-7-ammonia-liquid-separator.html>.

CONTADOR, J.C. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a Serviço da Modernização da Empresa.** [S./]: Editora Blucher, 2010. ISBN 9788521216339.

CORRÊA, Vagner Marcondes; VOLANTE, Carlos Rodrigo. Proposta de melhoria no layout de produção utilizando a ferramenta SLP: um estudo de caso em uma indústria de implementos agrícolas. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 2, p. 393–405, 2019.

CORREIA, Leandro Teixeira; AZEVEDO JR, Geraldo Motta. A ENERGIA EÓLICA MARÍTIMA (OFFSHORE): O CONTEXTO NACIONAL E AS PERSPECTIVAS FUTURAS. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, v. 6, n. 3, 2023.

COSTA, M. **Modelo de Critérios Para Macrolocalização de Usinas de Hidrogênio Verde no Brasil.** 2024. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

COSTA, Paulo; NUNES, Luciana Angélica da Silva; OLIVEIRA, V. **Cadeia Produtiva do Hidrogênio Verde: Uma Análise dos Métodos de Armazenamento**. [S.l.: s.n.], 2023.

COUNCIL, California Hydrogen Business. **Hydrogen Handbook**. Sacramento, CA: California Hydrogen Business Council, dez. 2022. Version 3.

CRUZ, Cleide Ane Barbosa da; GUIMARÃES, Daiane Costa; CARNEIRO NETO, José Aprígio; PAIXÃO, Ana Eleonora Almeida; RUSSO, Suzana Leitão; SANTOS, João Antônio Belmino dos. Estudo prospectivo das tecnologias em energia eólica: uma abordagem sobre turbinas eólicas. **Anais do VII SIMPROD**, Departamento de Engenharia de Produção-Universidade Federal de Sergipe, 2015.

DIAP, Bader. **Substation Positioning: Balancing Cost, Efficiency, and Redundancy**. [S.l.], 2021. Acesso em: 28 nov. 2024. Disponível em: <https://questfwe.com/wp-content/uploads/2021/07/ABL-Group-OWC-Bader-Diap-Substation-Positioning.pdf>.

ELIAS, Sérgio José Barbosa; LEITE, Madalena Osório; SILVA, Regis Rafael Tavares da; LOPES, Luís Carlos Aguiar. Planejamento do Layout de Canteiros de Obras: Aplicação do SLP (Systematic Layout Planning). *In*: ANAIS do XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Gramado, Brasil: ABEPRO, 1998.

EMAE. **NG 40206 - Ocupação de Áreas Técnicas e Administrativas**. [S.l.: s.n.], 1997. Acesso em: 28 nov. 2024. Disponível em: <http://www.emae.com.br/arquivos/intranet/Normas/ng40206.pdf>.

ENDRESS+HAUSER. **Produção segura de amônia verde**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 28 set. 2024. Disponível em: <https://www.br.endress.com/pt/industrias/industria-quimica/amonia-verde>.

ENEL. **Hidrogênio**. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/hidrogenio>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ENERGY, Siemens. **Electrolyzer: Powering a greener future**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 10 out. 2024. Disponível em:

[https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/9c60ee43-311e-473f-8148-b19a008958a2/Brochure-Electrolyzer\\_16zu9\\_240617-pdf\\_Original%20file.pdf](https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/9c60ee43-311e-473f-8148-b19a008958a2/Brochure-Electrolyzer_16zu9_240617-pdf_Original%20file.pdf).

ENERGY, Siemens. **Fábrica de eletrolisadores do futuro**. [S.l.: s.n.], 2023. Acesso em: 28 set. 2024. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/br/pt/home/stories/electrolyzer-gigawatt-factory.html>.

ENGENHARIA, Enesa. **Balanço da Usina (BOP)**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 12 nov. 2024. Disponível em: [https://www.enesa.com.br/atuacao/onde-atuamos/bop-pipe-rack/#:~:text=Balan%C3%A7o%20da%20usina%20\(BOP\)%20%C3%A9,exceto%20a%20pr%C3%B3pria%20unidade%20geradora..](https://www.enesa.com.br/atuacao/onde-atuamos/bop-pipe-rack/#:~:text=Balan%C3%A7o%20da%20usina%20(BOP)%20%C3%A9,exceto%20a%20pr%C3%B3pria%20unidade%20geradora..)

EPE. **Fontes de Energia**. 2023. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#:~:text=S%C3%A3o%20exemplos%20de%20fontes%20renov%C3%A1veis,das%20mar%C3%A9s%20e%20das%20ondas>). Acesso em: 19 jun. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Rio de Janeiro, 2023.

FERNANDES, Gláucia; AZEVEDO, João Henrique de; AYELLO, Matheus; GONÇALVES, Felipe. **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. FGV ENERGIA, 2023.

FERREIRA, Edgar Rodrigues. **O contributo potencial da energia eólica offshore para as metas de descarbonização da economia e do setor energético em Portugal para 2050**. 2021. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

FERREIRA, Lorena. **Perspectiva da Geração de Energia Eólica Offshore no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2019. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica.

FLUIDBRASIL. **Hidrogênio Verde no Nordeste: Um Potencial Transformador**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/hidrogenio-verde-nordeste/>.

GAHLEITNER, Gerda. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. **international Journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 38, n. 5, p. 2039–2061, 2013.

GANNOUM, Elbia. Energia eólica no Brasil: os motivos do sucesso e o futuro dos nossos bons ventos. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3, p. 44–60, 2021. Edição Especial I, 3º Trimestre de 2021.

GARCIA, Gessika da Silva. Hidrogênio verde: seu papel estratégico na transição energética. Universidade Federal de São Carlos, 2024.

GAS, Minnuo. **Planta de Nitrogênio Líquido**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 28 out. 2024. Disponível em: [https://minnuogas.com/pt/nitrog%C3%AAnio\\_planta/planta-de-nitrog%C3%AAnio-1%C3%ADquido/](https://minnuogas.com/pt/nitrog%C3%AAnio_planta/planta-de-nitrog%C3%AAnio-1%C3%ADquido/).

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. [S.l.]: 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GONZALEZ-GARCIA, Sara; LACOSTE, Clement; AICHER, Thomas; FEIJOO, Gumersindo; LIJO, Lucia; MOREIRA, Maria Teresa. Environmental sustainability of bark valorisation into biofoam and syngas. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 125, p. 33–43, 2016.

GORRE, Jachin; RUOSS, Fabian; KARJUNEN, Hannu; SCHAFFERT, Johannes; TYNJÄLÄ, Tero. Cost benefits of optimizing hydrogen storage and methanation capacities for Power-to-Gas plants in dynamic operation. **Applied Energy**, Elsevier, v. 257, p. 113967, 2020.

GRIGORYEV, I. **Anylogic em três dias**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2015.

GROUP, World Bank. **Hydrogen as a Clean Energy Option for Brazil: Key Issues and Pathways**. [S.l.], 2024. Acesso em: 28 out. 2024. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099071824152529105/pdf/P1790301b6823207e188d51b18681968535.pdf>.

GUERRA, Lucca Lemos Costa. **Análise de viabilidade técnica e financeira de uma planta de produção de amônia verde no estado do Ceará**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.

GURLIT, Wieland; GUILLAUMON, João; AUDE, Marcelo; CEOTTO, Henrique. Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. **McKinsey & Company—Our Insights**, 2021.

HERSENIUS, Catarina; MÖLLER, Ulrika. **Operation and Maintenance of Offshore Wind Farms: A Study for Systecon AB**. Malmö, Sweden: [s.n.], jun. 2011. Master's thesis in Industrial Management and Logistics. Disponível em: [/mnt/data/Report\\_0.7.pdf](/mnt/data/Report_0.7.pdf).

HOEST. **About PTX Esbjerg**. Acesso em: 12 nov. 2024. 2024. Disponível em: <https://hoestptxesbjerg.dk/about-ptx/>.

IBERDROLA. **Como funciona um parque eólico**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 10 out. 2024. Disponível em: [https://www.iberdrola.com/documents/20125/40546/Infografico\\_Como\\_Funciona\\_Parque\\_Eolico.pdf](https://www.iberdrola.com/documents/20125/40546/Infografico_Como_Funciona_Parque_Eolico.pdf).

IEA. Statistical Review of World Energy, 2024.

IEA, International Energy Agency. **Global Hydrogen Review 2022**. [S.l.: s.n.], 2022.

INC., Cummins. **Hydrogen: The Next Generation - Discover Cummins Electrolyzer Technologies**. Columbus, IN, USA, 2021. Acesso em: 28 out. 2024.

INCER-VALVERDE, Jimena; KORAYEM, Amira; TSATSARONIS, George; MOROSUK, Tatiana. "Colors" of hydrogen: Definitions and carbon intensity. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 291, p. 117294, 2023.

INSTITUTO SANTA CATARINA. **O que é Mapa de risco e sua importância**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em: <https://www.institutosc.com.br/web/blog/o-que-e-mapa-de-risco-e-sua-importancia>.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2018**. Abu Dhabi, 2019.

IRENA. **Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor**. [S.l.: s.n.], 2022.

IRENA, IR. **Hydrogen Economy Hints at New Global Power Dynamics**. [S.l.]: Obtenido de [https://www.irena.org/News/pressreleases/2022/Jan/Hydrogen ...](https://www.irena.org/News/pressreleases/2022/Jan/Hydrogen...), 2022.

IRENA, REAI. **Green hydrogen supply: A guide to policy making**. [S.l.: s.n.], 2021.

JACOB, Roshni Anna; ZHANG, Jie. Modeling and control of nuclear–renewable integrated energy systems: Dynamic system model for green electricity and hydrogen production. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, AIP Publishing, v. 15, n. 4, 2023.

KELLER, R.; RAULS, E.; HEHEMANN, M.; MÜLLER, M.; CARMO, M. An adaptive model-based feedforward temperature control of a 100 kW PEM electrolyzer. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 120, p. 104992, 2022.

KHAN, Muhammad Haider Ali; DAIYAN, Rahman; HAN, Zhaojun; HABLUTZEL, Martin; HAQUE, Nawshad; AMAL, Rose; MACGILL, Iain. Designing optimal integrated electricity supply configurations for renewable hydrogen generation in Australia. **IScience**, Elsevier, v. 24, n. 6, 2021.

KUDRYA, S. O.; YATSENKO, L. V.; SHYNKARENKO, L. Ya.; TKALENKO, M. D. Electrolytic Production of Hydrogen for Wind Hydrogen Stations. **Renewable Energy**, Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, v. 3, p. 92–100, 2023.

LARA, Nicolás Esteban González; PEÑA, Jhoan Camilo Velasco. **Prefactibilidad de una planta de amoníaco alimentado por una planta solar fotovoltaica**. 2023. Diss. (Mestrado) – Universidad del Rosario, Colombia.

LEITE, Gustavo dos Santos Vilela. **Otimização de layout e arranjo físico em espaços limitados: um estudo efetuado na Empresa Beta**. [S.l.]: 004, 2022.

LIPONI, A; FRATE, GF; BACCIOLI, A; FERRARI, L; DESIDERI, U *et al.* Green hydrogen from wind energy: mitigation of operating point fluctuations. *In*: ECOS 2021 PROGRAM ORGANIZER. ECOS 2021-34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. [S.l.: s.n.], 2021. P. 1751–1762.

LIPONI, Angelica; BACCIOLI, Andrea; FERRARI, Lorenzo. Feasibility analysis of green hydrogen production from wind. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 48, n. 96, p. 37579–37593, 2023.

LUCAS, Tiago R.; FERREIRA, Ana F.; PEREIRA, R. B. Santos; ALVES, Marco. Hydrogen production from the WindFloat Atlantic offshore wind farm: A techno-economic analysis. **Applied Energy**, Elsevier, v. 310, p. 118481, 2022.

LUIS GONZÁLEZ, Cristian José *et al.* Diseño y programación de plantas virtuales de laboratorio para asignaturas de Automatización, 2021.

LUNDBLAD, Therese; TALJEGARD, Maria; JOHNSON, Filip. Centralized and decentralized electrolysis-based hydrogen supply systems for road transportation—A modeling study of current and future costs. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 48, n. 12, p. 4830–4844, 2023.

MAGAZINE, Water Power. **Green hydrogen production commences at site near Schiffenen Dam**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: <https://www.waterpowermagazine.com/news/green-hydrogen-production-commences-at-site-near-schiffenen-dam-11109680/>.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais: De acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora, 2017. ISBN 978-85-216-3372-3.

MARTINS, Petrônio G.; LAUGENI, Fernando Piero. **Administração da Produção**. [S.l.]: Saraiva, 2015.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, Brasil. **Norma Regulamentadora NR-12: Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. [S.l.: s.n.], 2010. Acesso em: 28 out. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/assuntos/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/nr-12>.

MORECROFT, John DW. **Strategic modelling and business dynamics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

MOURA, Cassiano Rodrigues; BORGES, William José; MEINCHEIM, Edson; CARLINI, Giovani Conrado; OLIVEIRA, Luana de. Aplicação do Método SLP no desenvolvimento de um layout otimizado em uma empresa têxtil. **ScientiaTec**, v. 6, n. 2, 2019.

AL-MUFACHI, Naser A; SHAH, Nilay. The role of hydrogen and fuel cell technology in providing security for the UK energy system. **Energy Policy**, Elsevier, v. 171, p. 113286, 2022.

MUNDIAL, Banco. **Cenários para o Desenvolvimento de Eólica Offshore no Brasil**. Washington, DC, 2024. Licença Creative Commons Atribuição CC BY 3.0 IGO. Disponível em: <https://www.worldbank.org>.

MURAT, Israel. **Energia Eólica e Hidrogênio Verde em Ação**. 2023. Disponível em: <https://verumpartners.com.br/energia-eolica-e-hidrogenio-verde-em-acao/>. Acesso em: 11 jul. 2024.

MUTHER, Richard. **Planejamento do layout: sistema SLP**. [S.]: E. Blucher, 1978.

NAYAK-LUKE, Richard; BAÑARES-ALCÁNTARA, Rene; WILKINSON, Ian. “Green” Ammonia: Impact of Renewable Energy Intermittency on Plant Sizing and Levelized Cost of Ammonia. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, American Chemical Society, v. 57, n. 41, p. 14607–14616, 2018.

NEEVES, Livia. **FRV to Invest Some \$5 Billion in 2 GW of Green Hydrogen Capacity in Brazil**. Acesso em: 13 nov. 2024. 2024. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2024/06/19/frv-to-invest-some-5-billion-in-2-gw-of-green-hydrogen-capacity-in-brazil/>.

NEOENERGIA. **Energia Eólica Offshore**. 2024. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/energia-eolica-offshore>. Acesso em: 10 nov. 2024.

NEWSWIRE, PR. **Masdar Joins Forces with RWE in \$11 Billion Investment to Co-develop Massive 3GW Offshore Wind Projects in UK**. Acesso em: 13 nov. 2024, 2024. Disponível em: <https://www.prnewswire.com/ae/news-releases/masdar-joins-forces-with-rwe-in-11-billion-investment-to-co-develop-massive-3gw-offshore-wind-projects-in-uk-302003569.html>.

NOGUEIRA, Gabriel. **Avaliação do comportamento de turbinas eólicas offshore fixas do tipo monopile**. [S.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

NOVACANA. **Preço de energia e contratos são desafios para usinas de hidrogênio verde saírem do papel**. 2024. Disponível em:

<https://www.novacana.com/noticias/preco-energia-contratos-desafios-usinas-hidrogenio-verde-sairem-papel-110424>. Acesso em: 24 jun. 2024.

NREL. **Annual Technology Baseline (ATB) - Electricity 2021**. [S.l.: s.n.], 2021.

Acesso em: 12 nov. 2024. Disponível em:

<https://atb.nrel.gov/electricity/2021/index>.

OJAGHI, Yosra; KHADEMI, Alireza; YUSOF, Noordin Mohd; RENANI, Nafiseh Ghorbani; SYED HASSAN, Syed Ahmad Helmi bin. Production layout optimization for small and medium scale food industry. **Procedia Cirp**, Elsevier, v. 26, p. 247–251, 2015.

OLIVEIRA, Erick. **Análise técnico-econômica de uma usina solar fotovoltaica para produção de hidrogênio**. 2021. Projeto de Graduação – PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

OLIVEIRA, R. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. [S.l.], 2022.

OLIVEIRA NETTO, Alvim Antonio de. **Metodologia da pesquisa científica: guia prático para a apresentação de trabalhos acadêmicos**. [S.l.]: Visual Books, 2008.

OSORIO-TEJADA, Jose; TRAN, Nam N.; HESSEL, Volker. Techno-environmental assessment of small-scale Haber-Bosch and plasma-assisted ammonia supply chains. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 826, p. 154162, 2022.

PALHARES, Dayana D *et al.* Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

PECÉM. **Pecém: Hub de Hidrogênio Verde**. [S.l.: s.n.], 2021. Acessado em: 10 out. 2024. Disponível em:

[https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/9c60ee43-311e-473f-8148-b19a008958a2/Brochure-Electrolyzer\\_16zu9\\_240617-pdf\\_Original%20file.pdf](https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/9c60ee43-311e-473f-8148-b19a008958a2/Brochure-Electrolyzer_16zu9_240617-pdf_Original%20file.pdf).

PEINADO, Jurandir; GRAEML, Alexandre Reis. Administração da produção. **Operações industriais e de serviços**. Unicenp, p. 201–202, 2007.

PETERS, Aaron; HEATH, Garvin; NASH, John. **Hydrogen Production Cost Using Wind Electrolysis**. [S.l.], 2013. Acesso em: 28 out. 2024. Disponível em:

<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58397.pdf>.

PETERS, Aaron; MANN, Margaret; KURTZ, Jason; KROPOSKI, Bryan. **Renewable Electrolysis: Economic Analysis of On-Site Renewable Hydrogen Production via Electrolysis**. [S.l.], 2010. Acesso em: 28 out. 2024. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/40745.pdf>.

PETROSOLGAS. **Energia limpa em ascensão: Brasil lidera o desenvolvimento da energia eólica onshore na região**. 2023. Disponível em: <https://petrosolgas.com.br/energia-limpa-em-ascensao-brasil-lidera-o-desenvolvimento-da-energia-eolica-onshore-na-regiao/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

PETRY, Camila. **Proposta de arranjo físico através do método SLP em um ambiente operacional de uma empresa de comunicação visual**. 2015. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PINHO, Lucas Lima Reis 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.

PORTUÁRIO DO PECÉM, CIPP - Complexo Industrial e. **Tabela de Preços - ZPE Ceará 2023**. [S.l.], 2023.

PORTUÁRIO DO PECÉM, CIPP - Complexo Industrial e. **Tabela de Preços 2024 - Terminal Portuário do Pecém**. [S.l.], 2024.

PORTUGAL, EDP - Energias de. **Conheça os superpoderes do hidrogênio**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 28 set. 2024. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/os-superpoderes-do-hidrogenio>.

PRODUCTS, Air. **Air Products Plantas de separação de ar**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 28 set. 2024. Disponível em: <https://www.airproducts.com.br/supply-modes/cryogenic-air-separation-plant>.

PROGRAM, Energy Sector Management Assistance. **Going Global: Expanding Offshore Wind to Emerging Markets**. [S.l.]: World Bank, 2019.

PURE AQUA, Inc. **Containerized Reverse Osmosis Systems**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 28 out. 2024. Disponível em: <https://pureaqua.com/containerized-reverse-osmosis-systems/>.

PURIFICAÇÃO, Luerles Silva da; FONTE, Rodrigo Borges Della. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica Darrieus para aplicação em edifícios**. Vitória: [s.n.], 2012.

RIBEIRO, Guilherme Fernando. A Engenharia do Trabalho na Engenharia de Produção: Sugestão de um Mapa de Riscos para um Posto de Combustível. *In*: VII Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial (EEPA). Ponta Grossa, PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023. Acesso em: 13 nov. 2024.

RODRIGUES, Luís Manuel; SOARES, Tiago; REZENDE, Igor; FONTOURA, João Paulo; MIRANDA, Vladimiro. Economic analysis of a hydrogen power plant in the portuguese electricity market. **Energies**, MDPI, v. 16, n. 3, p. 1506, 2023.

SAMPIERI, Roberto Hernández; COLLADO, Carlos Fernández; LUCIO, María del Pilar Baptista. **Metodología de la Investigación**. 6th. México: McGraw-Hill Interamericana de España S.L, 2014.

SANTANA, Lêda Valéria Ramos. **Análise da variabilidade e similaridade da velocidade do vento no Nordeste do Brasil**. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil. Acessado em: 10 out. 2024.

SANTOS, Fernando Miguel; SANTOS, Fernando António. Combustível "hidrogénio". **Millenium**, Instituto Politécnico de Viseu, p. 252–270, 2005.

SANTOS, Ramosildes Anunciação dos. **Energia eólica como alternativa de desenvolvimento local: sistemática socioeconômica no município de Caetité-Bahia**. 2016. Dissertação de Mestrado – Universidade Salvador (UNIFACS), Laureate International Universities, Salvador, Bahia. Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo.

SANTOS, Ronaldo. Redução do Consumo de Energia Elétrica em Plantas de Separação de Ar com Foco na Atualização Tecnológica. *In*: ABM WEEK. 39º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 33º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais. São Paulo, SP, Brasil: [s.n.], 2018.

SCHLÖGL, Robert. Catalytic Synthesis of Ammonia—A “Never-Ending Story”? **Angewandte Chemie International Edition**, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, v. 42, n. 18, p. 2004–2008, 2003.

SIASS. **Orientações para Confecção de Mapa de Risco**. [S.l.: s.n.], 2024. Documento PDF fornecido para elaboração de mapas de risco.

SIGFUSSON, Thorsteinn I. **Hydrogen energy—abundant, efficient, clean a debate over the energy-system-of-change**. [S.l.: s.n.], 2009.

SILVA, Amanda Jorge Vinhoza de Carvalho. **Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres através de Análise Multicritério**. 2019. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro. Orientador: Roberto Schaeffer.

SILVA, Lucas. **Avaliação da Substituição de Vaporizadores Imersos por Vaporizadores Atmosféricos em uma Unidade de Separação de Ar**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Química – Instituto Federal da Bahia (IFBA), Salvador, Bahia, Brasil.

SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados**, Universidade de São Paulo, v. 27, n. 77, p. 97–116, 2013.

SINGH, Braj N; RATN, Tripti; JHA, Prakash. **India's Green Hydrogen Revolution - An Ambitious Approach**. [S.l.: s.n.], mai. 2024.

SLACK, Nigel. **Administração da Produção**. São Paulo: Editora Atlas, 2024. ISBN 8597014075.

SMINK, Veronica. **Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do 'combustível do futuro'**. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>. Acesso em: 18 jun. 2024.

SODECA. **Sistemas de Sobrepressão para Escadas, Corredores e Zonas de Refúgio**. Acesso em: 12 nov. 2024. Disponível em: <https://www.sodeca.com/soluciones/sobrepresion>.

SPINERGIE. **Offshore Substations and What to Expect in the Future**. Acesso em: 28 out. 2024. 2023. Disponível em: <https://www.spinergie.com/blog/offshore-substations-and-what-to-expect-in-the-future>.

STIFTUNG, Heinrich Boll. **Desafios e oportunidades para o brasil com o hidrogênio verde**. [S.l.: s.n.], 2021.

SYNERHY. **Balance of Plant (BOP) of an electrolyser**. [S.l.: s.n.], 2022. Acesso em: 12 nov. 2024. Disponível em:  
<https://synerhy.com/en/2022/02/balance-of-plant-bop-of-an-electrolyser/>.

TEIXEIRA, Juan Cavalcanti; SILVA, Vanessa Batista da; ARTSENK, Yuri Miranda. Perspectivas do Desenvolvimento do Hidrogênio Verde na Transformação do Porto de Pecém como Hub Port Nacional. **Revista Observatório Portuário**, v. 2, n. 1, p. 126–135, 2023.

TIANSHAN. **Economic News**. Acesso em: 12 nov. 2024. 2024. Disponível em:  
[https://www.ts.cn/xwzx/jjxw/202407/t20240708\\_22366464.shtml](https://www.ts.cn/xwzx/jjxw/202407/t20240708_22366464.shtml).

TORTORELLA, Guilherme L; FOGLIATTO, Flávio S. Planejamento sistemático de layout com apoio de análise de decisão multicritério. **Production**, SciELO Brasil, v. 18, p. 609–624, 2008.

TRAPP, Beatriz Cristina. Análise de viabilidade de uma fazenda eólica offshore no Rio Grande do Sul, 2009.

TRATTNER, Alexander; HÖGLINGER, Martin; MACHERHAMMER, Marie-Gabrielle; SARTORY, Markus. Renewable hydrogen: modular concepts from production over storage to the consumer. **Chemie Ingenieur Technik**, Wiley Online Library, v. 93, n. 4, p. 706–716, 2021.

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

USP, Jornal da. **Sistemas eólico e solar ainda são inviáveis para produzir hidrogênio verde como fonte de energia**. 2022. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/sistemas-eolico-e-solar-ainda-sao-inviaveis-economicamente-para-produzir-hidrogenio-verde-como-fonte-de-energia/>. Acesso em: 11 jul. 2024.

VAZ, Caroline Rodrigues; URIONA MALDONADO, Mauricio. Revisão de literatura estruturada: proposta do modelo SYSMAP (Scientometric and Systematic Yielding

Mapping Process). **Aplicações de Bibliometria e Análise de Conteúdo em casos da Engenharia de Produção**, UFSC Florianópolis, Brazil, v. 1, p. 21–42, 2017.

VIGA, Luís Claudio. **Os desafios do Brasil na corrida pelo hidrogênio verde**. 2024.

Disponível em:

<https://www.correiobraziliense.com.br/opiniaio/2024/03/6821588-os-desafios-do-brasil-na-corrída-pelo-hidrogenio-verde.html>). Acesso em: 24 jun. 2024.

WIETSCHEL, Martin *et al.* Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten [Opportunities and challenges when importing green hydrogen and synthesis products]. **Perspectives–Policy Briefs**, Fraunhofer Institute for Systems e Innovation Research (ISI), 03/2020 (DE), 2020.

WIND, Offshore. **Fugro Secures More Work on 3 GW Wind Lease Area Offshore New York**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em:

<https://www.offshorewind.biz/2024/07/17/fugro-secures-more-work-on-3-gw-wind-lease-area-offshore-new-york/>.

WIND, SouthCoast. **Vento da Costa Sul: Um Projeto de Energia Eólica Offshore**.

Acesso em: 28 out. 2024. 2024. Disponível em:

<https://southcoastwind.com/pt/vento-da-costa-sul-1/>.

WORLD, Hydrogen Tech. **Producing Green Hydrogen on a Gigawatt Scale**. Acesso em: 13 nov. 2024. 2024. Disponível em: <https://hydrogentechworld.com/producing-green-hydrogen-on-a-gigawatt-scale>.

WOZNICKI, M.; SOLLIEC, G. Le; LOISEL, R. Far off-shore wind energy-based hydrogen production: Technological assessment and market valuation designs. *In*: JOURNAL of Physics: Conference Series. [S.l.]: IOP Publishing, 2020. v. 1669, p. 012004.

ZENG, Kai; ZHANG, Dongke. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in energy and combustion science**, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 307–326, 2010.

ZHONG, Zhiyao; FANG, Jiakun; HU, Kewei; HUANG, Danji; AI, Xiaomeng; YANG, Xiaobo; WEN, Jinyu; PAN, Yuan; CHENG, Shijie. Power-to-hydrogen by electrolysis in carbon neutrality: Technology overview and future development. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, CSEE, v. 9, n. 4, p. 1266–1283, 2023.

ZUN, Moe Thiri; MCLELLAN, Benjamin Craig. Cost Projection of Global Green Hydrogen Production Scenarios. **Hydrogen**, MDPI, v. 4, p. 932–960, 2023.