



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

**VITÓRIA NUNES SANTOS**

**MODELAGEM MATEMÁTICA E OTIMIZAÇÃO DE VASO DE PRESSÃO PARA  
ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE**

**FORTALEZA**

**2022**

VITÓRIA NUNES SANTOS

MODELAGEM MATEMÁTICA E OTIMIZAÇÃO DE VASO DE PRESSÃO PARA  
ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE

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

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

FORTALEZA

2022

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

---

S239m Santos, Vitória Nunes.  
Modelagem matemática e otimização de vaso de pressão para armazenamento de hidrogênio verde /  
Vitória Nunes Santos. – 2022.  
122 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata.

1. Hidrogênio verde. 2. Vaso de pressão. 3. Modelagem matemática. 4. Modelo não-linear. I. Título.  
CDD 660

---

VITÓRIA NUNES SANTOS

MODELAGEM MATEMÁTICA E OTIMIZAÇÃO DE VASO DE PRESSÃO PARA  
ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO VERDE

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

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Rodrigo Silveira Vieira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico à minha mãe, por viabilizar meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Durante minha trajetória acadêmica pude contar com o apoio de diversas figuras muito especiais, que me fizeram acreditar no caminho da educação e que eu era capaz de conquistar tudo que eu quisesse através dele. Diante disso, deixo aqui os registros dos meus agradecimentos a cada um. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a minha mãe Madalena Nunes, por toda sua dedicação e amor durante todos os dias da minha existência. A senhora transformou o "meu"sonho em "nosso"e sempre trabalhou para tornar nossa conquista real, espero que Deus me dê a chance de retribuir. Às minha tias Evileuza Barros, Evilene Nunes, Genelva Brogli, Adriana Lopes, Sirlândia Silva e Flaviana Nunes e à minha vó Maria José Nunes, por desde sempre cuidarem de mim, me ensinaram tanto sobre disciplina, alegria, resiliência e amor e ajudarem a cuidar da minha mãe no momento em que mais precisamos superar, me dando oportunidade de continuar estudando apesar do momento difícil que vivemos. Agradeço também ao meu pai, Luciano Ibiapino, por todo companheirismo e paciência.

Às melhores pessoas que tive o prazer de conhecer e me conectar durante a graduação, Mirela Paiva e Sarah Oliveira. Durante a graduação aprendemos muitos temas acadêmicos, mas também construímos juntas um forte conhecimento sobre amizade e companheirismo, criando um laço que será perpetuado por toda nossa trajetória. Sarah Oliveira, por se fazer sempre presente, sempre escutar de forma paciente tudo que eu precisava falar, me aconselhar e ficar ao lado apesar de tudo. A palavra amizade me lembra você. Mirela Paiva, por ser sempre leve e amorosa com o próximo, tentando sempre oferecer o que há de melhor para o outro. Você torna tudo ao seu redor melhor. Meninas, a companhia de vocês ao longo desses anos tornou tudo viável e possível.

Aos professores do curso de Engenharia Química, por todo conhecimento repassado durante as disciplinas e pelas lições que vão além da sala de aula. Em especial, um agradecimento a professora Maria Valdez Ponte Rocha, por toda paciência e atenção ao longo desses anos. Professora, com toda certeza a sua disponibilidade e cuidado com todos os alunos tornou a nossa trajetória no curso mais tranquila.

Ao meu orientador, professor Bruno de Athayde Prata, que tive a sorte de conhecer durante essa trajetória e pelo qual mantenho uma grande admiração. Professor, agradeço imensamente suas orientações, paciência e atenção. O senhor acreditou em mim e tornou esse trabalho possível.

“Ele abriu o Mar Vermelho pro povo passar  
Disse que eu ia vencer, era só acreditar  
Cada fase pra avançar e meta a ser vivida  
E o prêmio é chegar na terra prometida.  
Essa eu fiz pra minha mãe se orgulhar.”

(Oruam)

## RESUMO

Nas últimas décadas, diversas linhas de pesquisa surgiram para viabilizar estudos com foco na minimização do impacto ambiental gerado pela utilização de combustíveis fósseis. As fontes renováveis de energia, principalmente a energia solar e eólica, tem ganhado ainda mais força e possuem alto potencial de crescimento nos próximos 30 anos. Apesar de todos os benefícios, surgem diversos questionamento de como baratear o armazenamento da energia gerada por essas fontes limpas, sem a dependência de componentes mais caros, como por exemplo as baterias. Com esse foco, surgem alternativas como a produção de hidrogênio, que tem, nos últimos anos, ganhado grande notoriedade mundial, nacional e regionalmente. Com o objetivo de utilizar fontes cada vez mais limpas, surge a necessidade de conhecer sobre a produção, o armazenamento e a utilização dos produtos gerados. Um dos desafios da produção do hidrogênio é seu posterior armazenamento para utilização em outras linhas. Por isso, esse tópico tem sido o objeto de estudo de muitos trabalhos. Sendo assim, este trabalho propõe diferentes possibilidades de armazenamento do gás hidrogênio, levando em consideração aspectos relacionados à economia e à segurança por meio de modelagem matemática, definição de função de objetivo e restrições. Os resultados ótimos obtidos com a solução do modelo evidenciam limites para a escolha do vaso baseada em cenários e aspectos relacionados ao projeto, como pressão de operação e capacidade de eletrólise da planta de geração verde.

**Palavras-chave:** Hidrogênio verde. Vaso de pressão. Modelagem matemática. Modelo não-linear.



## ABSTRACT

In recent decades, several lines of research have emerged to enable studies focused on minimizing the environmental impact generated by the use of fossil fuels. Renewable energy sources, mainly solar and wind energy, have gained even more strength and have high growth potential in the next 30 years. Despite all the benefits, there are several questions about how to cheapen the storage of energy generated by these clean sources without relying on more expensive components, such as batteries. With this focus, alternatives arise such as the production of hydrogen, which in recent years has gained great notoriety worldwide, nationally and regionally. In order to use increasingly cleaner sources, it is needed to know about the production, storage and use of the products generated. One of the challenges of hydrogen production is its subsequent storage for use in other lines and this topic has been the object of interest for many studies. Therefore, this essay proposes different possibilities for storing hydrogen gas, taking into account economic and safety aspects through mathematical modeling, objective function definition and restrictions. The optimal results obtained with the model solution show limits for the choice of vessel based on scenarios and aspects related to the project, such as operating pressure and electrolysis capacity of the green generation plant.

**Keywords:** Green hydrogen. Pressure vessel. Mathematical modeling. Non-linear model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo hidrogênio . . . . .	21
Figura 2 – Demanda de H <sub>2</sub> ao longo dos anos . . . . .	24
Figura 3 – Classificação das Rotas de Produção de Hidrogênio . . . . .	26
Figura 4 – Comparação das fontes de produção de hidrogênio . . . . .	26
Figura 5 – Principais aplicações do hidrogênio . . . . .	28
Figura 6 – Principais aplicações mapeadas para o hidrogênio . . . . .	30
Figura 7 – Custo de Produção Hidrogênio - USD/kg . . . . .	31
Figura 8 – Custo de Produção Hidrogênio - USD/kg . . . . .	31
Figura 9 – Comparação dos tipos de armazenamento de energia . . . . .	36
Figura 10 – Comparação dos tipos de armazenamento de energia . . . . .	38
Figura 11 – Atuação da pressão interna nas seções vertical e horizontal do vaso de pressão	44
Figura 12 – Tipos de Problema de Otimização . . . . .	46
Figura 13 – Dimensões do Vaso de Pressão . . . . .	48
Figura 14 – Densidade volumétrica para o hidrogênio a 300 K em função da pressão, comparativo . . . . .	54
Figura 15 – Exemplo de aplicação do algoritmo do código em Python . . . . .	60
Figura 16 – Retorno do modelo em caso de retornos sem solução . . . . .	62
Figura 17 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo . . . . .	64
Figura 18 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimados e o valor ótimo de raio retornado pela solução do modelo . . . . .	65
Figura 19 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimados e o valor ótimo de volume retornado pela solução do modelo . . . . .	66
Figura 20 – Interação das variáveis pressão e volume ótimo . . . . .	67
Figura 21 – Interação das variáveis pressão e raio ótimo . . . . .	67
Figura 22 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo . . . . .	68
Figura 23 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto . . . . .	69
Figura 24 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 1 MW . . . . .	70
Figura 25 – Relação capacidade, pressão e média do volume ótimo [m <sup>3</sup> ] . . . . .	72
Figura 26 – Relação capacidade, pressão e média do comprimento ótimo [m] . . . . .	72

Figura 27 – Relação capacidade, pressão e média do raio ótimo [m] . . . . .	72
Figura 28 – Relação capacidade, pressão e média do custo total da construção do vaso [\$] . . . . .	73
Figura 29 – Estrutura de Solução . . . . .	74
Figura 30 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 10W . . . . .	114
Figura 31 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 10W . . . . .	114
Figura 32 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 10W . . . . .	115
Figura 33 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 10W . . . . .	115
Figura 34 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 10W . . . . .	115
Figura 35 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 10W . . . . .	116
Figura 36 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto - Cenário 10W . . . . .	116
Figura 37 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 10 MW . . . . .	117
Figura 38 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 100W . . . . .	117
Figura 39 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 100W . . . . .	117
Figura 40 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 100W . . . . .	118
Figura 41 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 100W . . . . .	118
Figura 42 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 100W . . . . .	118
Figura 43 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 100W . . . . .	119
Figura 44 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto - Cenário 100W . . . . .	119
Figura 45 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 100 MW . . . . .	120
Figura 46 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 1000W . . . . .	120
Figura 47 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 1000W . . . . .	120

Figura 48 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo- Cenário 1000W . . .	121
Figura 49 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 1000W . . .	121
Figura 50 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 1000W . . .	121
Figura 51 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 1000W . . .	122
Figura 52 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto - Cenário 1000W . . . . .	122
Figura 53 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 1000 MW . . . . .	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do hidrogênio e comparação com outros compostos . . . . .	23
Tabela 2 – Os 6 métodos básicos de armazenamento de hidrogênio . . . . .	37
Tabela 3 – Tipos de Ligas Aplicadas nas Paredes de Vasos de Alta Pressão . . . . .	40
Tabela 4 – Constantes aplicadas no trabalho de Sandgren (1990) . . . . .	43
Tabela 5 – Potência eletrolisador, fluxo, massa e volume de hidrogênio produzido . . .	47
Tabela 6 – Parâmetros geométricos para atender demandas industriais . . . . .	53
Tabela 7 – Potência eletrolisador, fluxo, massa e volume de hidrogênio produzido . . .	56
Tabela 8 – Limites de dimensões aproximadas para armazenamento do gás hidrogênio produzido . . . . .	57
Tabela 9 – Limites de dimensões aproximadas para armazenamento do gás hidrogênio produzido . . . . .	57
Tabela 10 – Parâmetros geométricos para atender demandas industriais . . . . .	58
Tabela 11 – Variáveis, parâmetros e limites . . . . .	58
Tabela 12 – Exemplo de cenários abordados no problema . . . . .	59
Tabela 13 – Análise de coeficiente de variação de Pearson . . . . .	63
Tabela 14 – Análise de coeficiente da correlação de Pearson . . . . .	63
Tabela 15 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de comprimento ótimo . . . . .	64
Tabela 16 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de raio ótimo . . . . .	65
Tabela 17 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de volume ótimo . . . . .	66
Tabela 18 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de comprimento ótimo . . . . .	71
Tabela 19 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de raio ótimo . . . . .	71
Tabela 20 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de volume ótimo . . . . .	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CNTP	condições normais de temperatura e pressão
EDA	Análise Exploratória de Dados
H2V	<i>Hidrogênio Verde</i>
MECE	<i>Mutually – Exclusive – Colectively – Exhaustive</i>
PtX	<i>Power – to – X</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativas</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>17</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>17</i>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Hidrogênio</b>	<b>19</b>
<i>2.1.1</i>	<i>História</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Propriedades</i>	<i>20</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Classificação de Produção</i>	<i>24</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Principais Aplicações</i>	<i>27</i>
<b>2.2</b>	<b>Produção Verde</b>	<b>28</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Definição</i>	<i>28</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Aplicações da produção verde</i>	<i>29</i>
<i>2.2.3</i>	<i>A eletrólise na produção verde</i>	<i>31</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Cenário Mundial</i>	<i>32</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Cenário Nacional e Regional</i>	<i>34</i>
<b>2.3</b>	<b>Armazenamento</b>	<b>35</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Cilindros de Alta Pressão</i>	<i>38</i>
<b>2.4</b>	<b>Estudos de Otimização</b>	<b>40</b>
<i>2.4.1</i>	<i>Equações do Modelo</i>	<i>45</i>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelagem</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO MODELO</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Parâmetros e Restrições</b>	<b>52</b>
<i>4.1.1</i>	<i>Parâmetros de Operação do Processo</i>	<i>52</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Parâmetros Geométricos e de Construção do Vaso</i>	<i>56</i>
<b>4.2</b>	<b>Construção de Cenários e Aplicação do Modelo</b>	<b>58</b>

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>62</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados para Capacidade de 1 MW</b>	<b>63</b>
<b>5.1.1</b>	<i>Análise das variáveis numéricas de decisão</i>	<b>63</b>
<b>5.1.2</b>	<i>Análise das variáveis categóricas do problema</i>	<b>68</b>
<b>5.1.3</b>	<i>Análise de correlação</i>	<b>68</b>
<b>5.2</b>	<b>Resultados Projeto Final</b>	<b>70</b>
<b>5.2.1</b>	<i>Análise geral das diferentes capacidades testadas</i>	<b>70</b>
<b>5.2.2</b>	<i>Escolha do vaso de pressão para aplicação na produção de H2V</i>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE A – Cenários avaliados</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE B – Código de aplicação do modelo</b>	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE C – Análise das capacidades de 10, 100 e 1000 MW</b>	<b>114</b>
<b>C.1</b>	<b>Resultados para capacidade de 10 MW</b>	<b>114</b>
<b>C.2</b>	<b>Resultados para capacidade de 100 MW</b>	<b>114</b>
<b>C.3</b>	<b>Resultados para capacidade de 1000 MW</b>	<b>114</b>



# 1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo visa introduzir o tema estudado neste trabalho, de forma que o delimite e gere um entendimento da sua importância e dos principais objetivos que se deseja alcançar com esse estudo.

## 1.1 Considerações iniciais

Nas últimas décadas, diversas linhas de pesquisa surgiram para viabilizar estudos com foco na minimização do impacto ambiental gerado pela utilização de combustíveis fósseis e suas consequências para o meio ambiente. As fontes renováveis de energia, principalmente a energia solar e eólica, tem ganhado ainda mais força e possuem alto potencial de crescimento nos próximos 30 anos. Apesar de todos os benefícios, surgem diversos questionamentos de como baratear o armazenamento da energia gerada por essas fontes limpas, sem a dependência de componentes mais caros, por exemplo as baterias. Com esse foco, surgem alternativas como a produção de hidrogênio, que tem, nos últimos anos, ganhado grande notoriedade mundial, nacional e regionalmente.

A produção de hidrogênio como subproduto de outros processos já tem sido amplamente utilizada na indústria. Por exemplo, a produção do hidrogênio cinza, que é gerado com base em gás fóssil, a partir da reforma do metano a vapor. Esse processo emite  $\text{CO}_2$  e é o meio de produção mais utilizado atualmente. Ou o hidrogênio azul, cuja produção também ocorre por meio de combustíveis fósseis. Porém, nesse caso, tem-se o cuidado de se realizar a captura e o armazenamento do  $\text{CO}_2$ . O hidrogênio turquesa também é proveniente de gás fóssil, todavia o carbono gerado é solidificado através da pirólise de metano fundido. O hidrogênio marrom é gerado pela gaseificação de carvão ou linhito. Por fim, o hidrogênio verde, amplamente conhecido pela sigla  $\text{H}_2\text{V}$ , que é o objeto foco deste trabalho, é produzido por meio da energia obtida de fontes renováveis, como eólica e solar.

Com o objetivo de utilizar fontes cada vez mais limpas, surge a necessidade de conhecer sobre a produção, o armazenamento e a utilização dos produtos gerados. Um dos desafios da produção do hidrogênio é o seu posterior armazenamento para utilização em outras linhas. Apesar de existirem tecnologias bastante difundidas, ainda existem hipóteses que podem ser levantadas sobre as possibilidades de armazenamento desse gás e as formas de otimizá-las.

## 1.2 Justificativas

Em relação a relevância científica do tema, tem-se que este trabalho irá auxiliar no entendimento de formas ótimas de armazenamento do gás hidrogênio, gerando oportunidade de conhecimento de novas formas de retenção e novos materiais empregados na construção dos recipientes.

Quanto a relevância social, se faz necessário explorar possibilidades de redução de custos em relação ao armazenamento do gás, já que poderá culminar em novas expectativas para os possíveis produtores dessa tecnologia, ainda visando a inserção deste mercado nacional e regionalmente.

Em relação a viabilidade do estudo, serão utilizadas ferramentas computacionais para verificar diferentes condições de processo e materiais de armazenamento, visando a proposta de uma combinação ótima entre essas duas variáveis de processo.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral do trabalho é avaliar diferentes possibilidades de armazenamento do gás hidrogênio, em relação à condição de operação e ao material de construção do recipiente, levando em consideração aspectos relacionados à economia e à segurança.

### 1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Propor um modelo matemático para otimização de armazenamento de gás hidrogênio.
- Simular diversos cenários para análise do armazenamento de gás hidrogênio.
- Dimensionar de forma ótima um tanque de armazenamento, que leve em consideração a viabilidade econômica e a segurança operacional.

## 1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1 deste trabalho é apresentada a delimitação do tema de estudo, evidenciando sua contribuição nos âmbitos científicos e sociais, além dos objetivos almejados.

O Capítulo 2 tem como foco realizar uma revisão da literatura, com o intuito de trazer as proposições de diversos trabalhos e pesquisas, os quais abordam a temática e embasam

a realização dos objetivos propostos no 1.

Já com toda a base da fundamentação teórica abordada, no Capítulo 3 é evidenciado como os objetivos definidos no Capítulo 1 serão alcançados por meio da modelagem matemática do problema.

Com a metodologia bem definida, no Capítulo 4 será abordada a aplicação do modelo deduzido, de modo a estabelecer os parâmetros que serão utilizados e a aplicação do método de otimização, utilizando ferramentas computacionais.

No Capítulo 5 são discutidos os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia evidenciada no Capítulo 3. Nele, avaliamos os resultados da otimização e os valores ótimos retornados para cada capacidade de eletrólise da planta de geração de hidrogênio verde.

No Capítulo 6 são realizadas as conclusões obtidas no estudo, de modo a avaliar se os objetivos estabelecidos no Capítulo 1 foram atingidos e como o trabalho em questão pode servir como foco de novos trabalhos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste estudo aborda pontos de relevância para compor a metodologia e avaliar os resultados obtidos. Nela, serão evidenciados aspectos históricos e químicos relacionados à molécula de hidrogênio, à produção verde, ao armazenamento do gás, às principais aplicações desse gás na indústria e, por fim, trabalhos de otimização para construção de vasos de pressão. Em todos os pontos, serão avaliados aspectos como contexto histórico e as abordagens a nível mundial, nacional e regional acerca do tema. A fundamentação teórica leva em consideração uma ampla revisão em torno do tema de hidrogênio verde e seus subtemas, como armazenamento.

### 2.1 Hidrogênio

#### 2.1.1 História

Conforme explicado por Grochala (2015), o elemento número um da tabela periódica foi descoberto por Henry Cavendish em 1766. O físico foi o primeiro a reconhecer o hidrogênio como um elemento distinto e entender de fato como produzi-lo. Segundo West (2014), em suas tentativas, Cavendish conseguiu gerar o gás realizando diversos experimentos com ácidos (ácido clorídrico e ácido sulfúrico) e diferentes metais (zinco, ferro e estanho). Além disso, Cavendish conseguiu provar que ao queimar esse gás, que hoje é conhecido como hidrogênio, e ar comum, é possível formar água. Essa descoberta levou a outros avanços posteriores e relevantes, como o conhecimento da composição da molécula de água. Por fim, registros indicam que outros cientistas já produziam hidrogênio antes de Cavendish, porém ainda não reconheciam o elemento e suas características como distintas dos demais ao ponto de classificá-lo, sendo Cavendish o primeiro a se dedicar a esse estudo. Um exemplo desses experimentos anteriores, foram feitos com aço e ácidos e realizados por Robert Boyle em 1671, onde o cientista descreveu a geração de "bolhas de gás" em seus estudos.

Segundo Grochala (2015), o nome do elemento foi dado pelo químico Antoine Lavoisier em 1783. Inspirado pelas descobertas de Cavendish, o químico deu ao elemento o nome que foi formado pela junção das palavras gregas *hydro*, que significa água e *genes*, que quer dizer formação. Nesse mesmo ano, o hidrogênio foi utilizado para impulsionar o primeiro balão de passeio, transporte que vinha ganhando notoriedade na época. O envolvimento do

composto com energia começou a ser objeto de estudo em 1800. Nesse ano, os cientistas William Nicholson e Anthony Carlisle descobriram que imputar energia elétrica na água fazia com que ocorresse a produção dos gases hidrogênio e oxigênio, um processo que posteriormente foi conhecido como eletrólise e que ainda hoje é um dos processos mais conhecidos de produção do gás. Dando continuidade aos estudos eletroquímicos, segundo Katz (2022), em 1838 foi demonstrada a primeira ideia de uma célula combustível movida a hidrogênio, o responsável foi o químico suíço Christian Friedrich Schoenbein. Nesse experimento, foi demonstrada a geração de energia a partir da aplicação de  $H_2$  e  $O_2$  ao redor de um eletrólito de ácido sulfúrico com dois fios de platina mergulhados. Nos anos posteriores, diversos cientistas se detiveram no desafio de tornar a descoberta de Schoenbein mais prática, visto que se notou um potencial energético nesta, como é o caso de Sir William Grove, que desenvolveu uma bateria à gás entre os anos de 1842 e 1845.

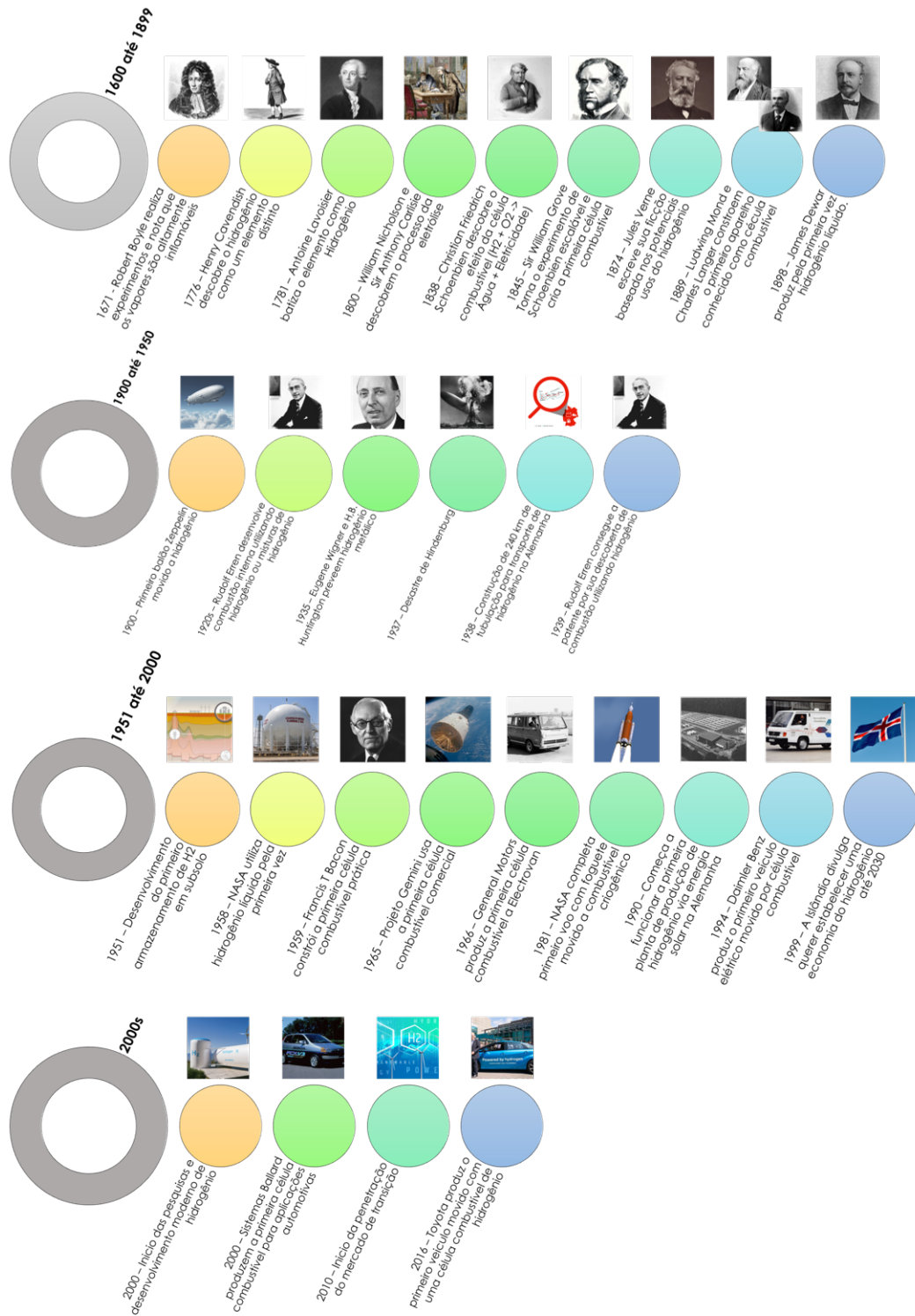
Segundo Warshay e Prokopius (1990), a primeira célula combustível prática, do ponto de vista industrial, esteve pronta em 1932. Na ocasião, o projeto gerava 5kW de um sistema eletrolítico para mover diversas máquinas industriais. Essas aplicações possibilitaram que, nos anos 60, a empresa General Electric e a NASA utilizassem essas células para impulsionar as missões espaciais Apollo e Gemini e, mais uma vez, o hidrogênio ganhou notoriedade em aspectos mundiais, visto que, após a segunda guerra mundial, a corrida espacial se tornou um dos focos da guerra fria.

Apesar de todos os avanços, continuou-se a ter uma preocupação de como utilizar o hidrogênio de forma segura para armazenamento e distribuição, de modo a permitir que a sociedade pudesse usufruir de todo o seu potencial energético. Em 1970, segundo Grochala (2015), foram descobertas as primeiras evidências de que o hidrogênio poderia ser agregado em um composto intermetálico, gerando a forma de um hidreto. Esse achado deu progresso a tecnologias de armazenamento eletroquímico de hidrogênio e veículos movidos a bateria foram lançados em 1997 no Japão. Na Figura 1, é possível verificar a série de acontecimentos que envolveram o elemento ao longo do tempo e alguns dos avanços estabelecidos de maneira mais recente.

### **2.1.2 Propriedades**

Conforme ensinado por Lee (1999), o hidrogênio é o elemento que possui a estrutura mais simples da tabela periódica, sendo composto por um único elétron e um único próton. Ele

Figura 1 – Linha do tempo hidrogênio



Fonte: International Energy Agency (2019)

alcança estabilidade de três formas: a primeira é com formação covalente com outros átomos, como podemos observar na sua presença como  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ , entre outros, a segunda é na sua forma iônica  $H^+$ , onde ele perde um elétron e por último na sua forma iônica  $H^-$  onde

esse adquire mais um elétron. Além disso, Lee (1999) afirma também que as propriedades do hidrogênio são tão distintas dos outros elementos que ele não conseguiu ser encaixado em nenhum grupo de forma, sendo colocado destacado dos demais no topo esquerdo da tabela periódica.

Conforme evidenciado em Godula-Jopek (2015), o hidrogênio pode ser considerado uma fonte importante em termos energéticos, visto que ele pode ser armazenado de forma mais fácil que a eletricidade e utilizado posteriormente em outras formas úteis, como reconversão em energia ou como matéria base para outros processos industriais. Em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), o hidrogênio se apresenta em sua forma gasosa, sendo inodoro, incolor, insípido e atóxico. É um elemento mais leve que o ar e bastante abundante em todo universo, sendo que cerca de 90 wt de todo o universo possui hidrogênio conforme evidenciado por Grochala (2015). Porém, sua forma pura ( $H_2$ ), é pouco encontrada na terra devido ao campo gravitacional não conseguir conter um elemento tão leve conforme explicado por Lee (1999). Apesar de não ser uma fonte de energia por si próprio, pode ser produzido por meio de processos que envolvem a utilização de combustíveis fósseis ou fontes renováveis.

As propriedades do gás  $H_2$  geram relevância e perspectiva de futuro, principalmente as propriedades que tornam o hidrogênio um combustível potencial. Segundo evidenciado por Santos e Santos (2005), a molécula possui um alto conteúdo de energia por peso, aproximadamente 2,5 vezes mais poder calorífico que os hidrocarbonetos comumente utilizados, como por exemplo a gasolina. Essa característica o torna um bom candidato para utilização como combustível. Porém, apesar dessa característica se tornar uma propriedade útil, também se torna um gargalo da sua utilização devido a aspectos de segurança, pois ele também irá possuir 2,5 vezes mais energia de explosão.

Conforme explicado também pela International Energy Agency (2019), se comparado com outros combustíveis como o metano ou a gasolina, o hidrogênio possui mais energia por unidade de massa e, por isso, ele se torna um potencial combustível atraente. Porém, como mencionado, existem alguns gargalos que devem ser considerados, pois, por ser um elemento mais leve, ele tem uma baixa densidade de energia por unidade de volume, fazendo necessários volumes maiores desse gás para atender uma mesma demanda que hoje é feita com outros combustíveis. Logo, esse aspecto tem impacto direto no armazenamento do fluido para sua posterior utilização. As principais propriedades do hidrogênio são evidenciadas na Tabela 1.

Segundo o estudo da Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de

Tabela 1 – Propriedades do hidrogênio e comparação com outros compostos

Propriedade	Hidrogênio	Comparação
Densidade(gás)	0.089 kg/m <sup>3</sup> (0°C, 1 bar)	1/10 do gás natural
Densidade (líquido)	70.79 (-253°C, 1 bar)	1/6 do gás natural
Ponto de ebulição	-252.76°C (1 bar)	90° abaixo do LNG
Energia por unidade de massa (LHV)	120.1 MJ/kg	3x a da gasolina
Densidade Energética (ambiente cond., LHV)	0.01 MJ/L	1/3 do gás natural
Energia Específica (liquefeito., LHV)	8.5 MJ/L	1/3 do LNG
Velocidade da chama	346 cm/s	8x metano
Taxa de ignição	4-77% no ar por volume	6x mais que o metano
Temperatura de autoignição	585°C	220°C para gasolina
Energia de ignição	0.02 MJ	1/10 do metano

Fonte: International Energy Agency (2019)

Nota: cm/s = centímetro por segundo; kg/m<sup>3</sup> = kilogramas por metro cúbico; LHV = Valor de Aquecimento Baixo; MJ = megajoule; MJ/kg = megajoules por kilograma; MJ/L = megajoules por litro.

Janeiro (2021) as características gerais do hidrogênio trazem vantagens energéticas, mas também desafios, por conta da baixa densidade e baixos pontos de fusão e ebulição, como evidenciado anteriormente. Logo, manejar o hidrogênio pode ser bastante desafiador, pois, em condições de condições normais de temperatura e pressão (CNTP) ele tem grande potencial de difusão e efusão. O transporte vai ocorrer geralmente de forma gasosa, sob altas pressões de 500 ou 700 bar. No caso da não aplicação de altas pressões, ele pode ser transportado em sua forma liquefeita, essa aplicação só é possível com uma temperatura de -252°C, o que reflete na necessidade de utilização de processos criogênicos complexos e atualmente com altos custos financeiros. Porém, o que torna o hidrogênio tão atraente está relacionado à característica peculiar de ser um gás combustível sem átomos de carbono, que é uma característica marcante dos combustíveis de origem fóssil. Essa característica torna o hidrogênio o centro da discussão sobre como reduzir as emissões de gases de efeito estufa nos próximos anos.

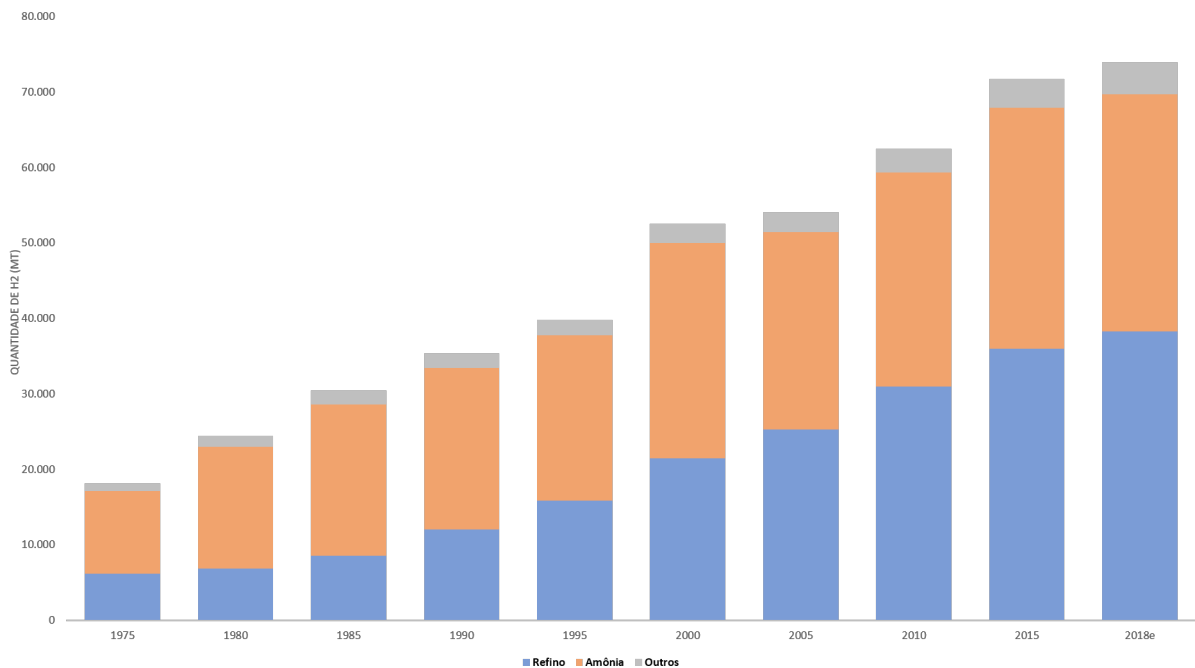
Como se pode notar a partir da linha do tempo mostrada na Figura 1, o hidrogênio é um elemento de grande relevância mundial e, ao longo de todos esses períodos, o seu potencial foi sendo descoberto e inserido na indústria, mesmo com suas limitações de segurança. Por suas características, o gás hidrogênio pode ser considerado um vetor energético ou um combustível primário. Conforme mencionado no mapeamento da Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021), pode-se encontrar o gás em reservas naturais e o Brasil tem potenciais reservas nos estados do Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais, tendo assim um grande potencial de exploração que deve ser levado em consideração. Segundo esse mesmo estudo, o que diferencia o hidrogênio da eletricidade é o fato de que o elemento pode ser utilizado como um portador de energia química, pois o gás é composto por um conjunto de moléculas



e não somente pelos elétrons. Diante disso, é notável que seria muito mais fácil, pelo menos teoricamente, realizar o armazenamento e transporte de forma similar e estável como outras fontes como petróleo, carvão, biomassa e gás natural.

Sendo assim, mediante ao exposto, é notável que, para o Brasil, o hidrogênio pode trazer diversas possibilidades para um melhor balanceamento do sistema elétrico nacional, visto que, atualmente, esse balanceamento não ocorre de forma eficiente entre a geração hidro e termelétrica. Além disso, nas últimas décadas, o país têm explorado mais possibilidades no que diz respeito ao uso e aplicação de fontes renováveis como solar e eólica. É notável que o hidrogênio está no centro das discussões relacionadas à energia do futuro e, conforme evidenciado na Figura 2, retirada do estudo International Energy Agency (2019), pode-se notar que a produção mundial de hidrogênio vem crescendo de forma significativa, nota-se que em 2018 ela já era 3 vezes maior do que a produção em 1975.

Figura 2 – Demanda de H<sub>2</sub> ao longo dos anos



Fonte: International Energy Agency (2019)

### 2.1.3 Classificação de Produção

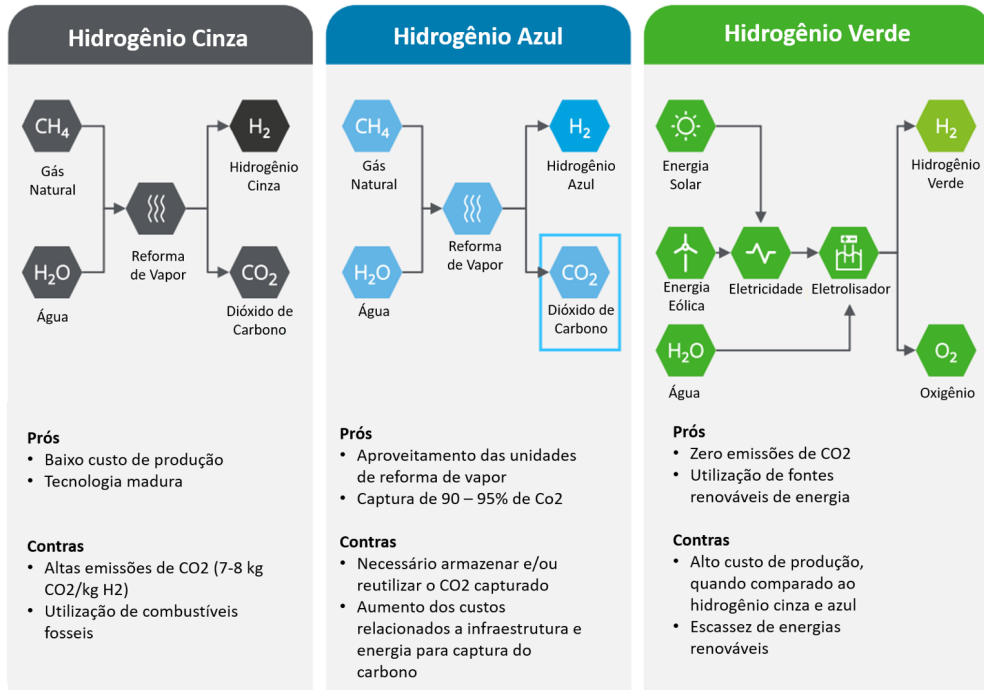
Para classificar as rotas de produção do hidrogênio, é utilizada a definição de cores que, apesar de não ser normatizada, é uma das principais formas de identificação e categorização das rotas de produção do gás e suas características. A primeira rota mencionada no estudo de

Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021) possui notavelmente a maior fatia de produção mundial (cerca de 95%) sendo classificada como produção de Hidrogênio Cinza. Essa rota é caracterizada pela geração do gás por meio da reforma a vapor de metano e gera uma proporção de 1:10 entre produção de hidrogênio e CO<sub>2</sub>, ou seja, nesse processo, para cada 1 tonelada de hidrogênio são geradas 10 toneladas de CO<sub>2</sub>, sem contar com o CO<sub>2</sub> que já foi produzido na pré-cadeia de produção, o que a torna extremamente nociva em aspectos ambientais, principalmente se a produção não tiver uma gestão que evite a emissão de CO<sub>2</sub>. Já o Hidrogênio Azul é classificado assim por ter sua rota de produção idêntica ao cinza, com a diferença que o CO<sub>2</sub> produzido não é lançado na atmosfera e sim capturado, armazenado e posteriormente utilizado em outros processos industriais. Mesmo sendo livre de carbono na etapa principal de produção, as emissões ainda estão presentes em outras etapas da cadeia, principalmente nas etapas anteriores à produção do gás.

A rota conhecida por zero emissões de carbono é a de produção do *Hidrogênio Verde* (H2V). Essa rota produz o gás por meio da eletrólise da água, na qual a fonte elétrica propulsora do processo vem de fontes de energia renováveis como a eólica e a solar. Ainda, outras cores são utilizadas para determinar mais possibilidades de rotas de produção do hidrogênio, como o Hidrogênio Roxo que possui uma rota de produção semelhante à do Hidrogênio Verde, no entanto ao invés de se utilizar fontes como a eólica ou a solar, é utilizada energia nuclear como propulsora. Já o Hidrogênio Turquesa é produzido através da pirólise do metano, gerando carbono sólido e evitando qualquer emissão de CO<sub>2</sub>. Nesse estudo, será dado foco à rota de produção de Hidrogênio Verde, visto que é uma das rotas mais promissoras para o futuro e diversos países no mundo, como Alemanha, Japão e Brasil têm se dedicado a explorar os potenciais dessa energia. Um resumo das possíveis classificações das rotas de produção de hidrogênio são evidenciadas na Figura 3.

O informativo promovido por Deloitte BE (2021), evidencia que cada tipo de produção atualmente possui seus pontos positivos e negativos. Conforme é possível evidenciar na Figura 3, os pontos negativos do hidrogênio cinza já foram mencionados nesse trabalho, estando muito relacionados com a utilização de combustíveis fósseis e altas emissões de CO<sub>2</sub>, porém suas vantagens são que se trata de um processo de produção mais barato se comparado a outros e já tem uma tecnologia bastante madura, visto que essa aplicação até agora foi a principal utilizada na indústria. Em relação à produção do Hidrogênio Azul, as desvantagens estão no alto custo energético e infraestrutural para captura de CO<sub>2</sub>, e sua vantagem está associada a evitar que o

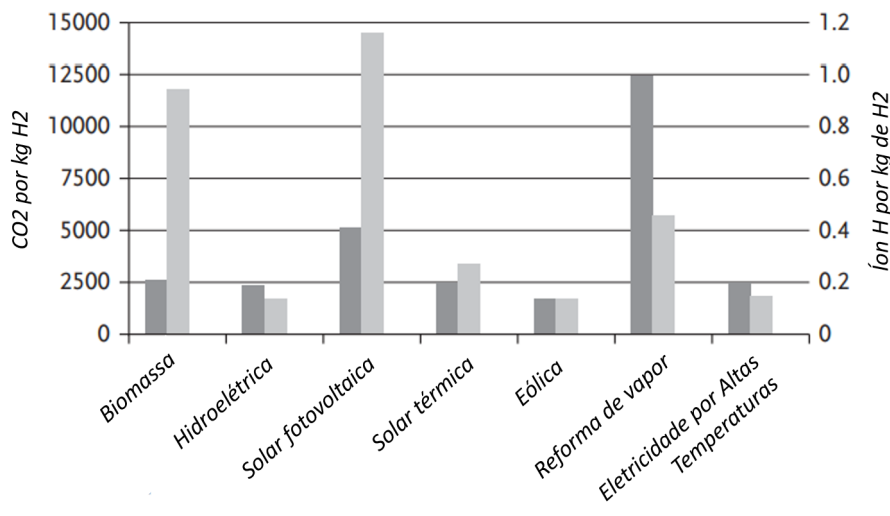
Figura 3 – Classificação das Rotas de Produção de Hidrogênio



Fonte: Deloitte BE (2021)

$CO_2$  seja lançado na atmosfera. Como se pode notar na Figura 4, as fontes renováveis de energia podem permitir a produção de quantidades consideráveis de hidrogênio, enquanto promovem uma menor emissão de gás  $CO_2$ . Por fim, as vantagens da produção verde estão relacionadas ao uso de fontes renováveis de energia e a não emissão de  $CO_2$ , porém, atualmente, um dos principais desafios para impulsionar essa produção são os altos custos comparados aos outros tipos e a ainda pequena proporção na utilização de fontes renováveis de energia.

Figura 4 – Comparação das fontes de produção de hidrogênio



Fonte: Hydrogen-Fundamentals (2012)

Evidenciando o cenário nacional do hidrogênio, a Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021) mostra que, assim como em outras partes do mundo, no Brasil a maior parte do hidrogênio produzido é do tipo cinza. No país, a principal fonte de produção ocorre nos processos da empresa Petrobras, por meio da reforma a vapor de gás natural, utilizando-se nafta e reforma catalítica. O hidrogênio gerado nesse processo é utilizado dentro do próprio processo produtivo da empresa, com o objetivo de ser utilizado no refino de derivados de petróleo, como é o caso do processo de hidrotreatamento de gasolina, diesel e lubrificante, para adequação de qualidade final desses produtos.

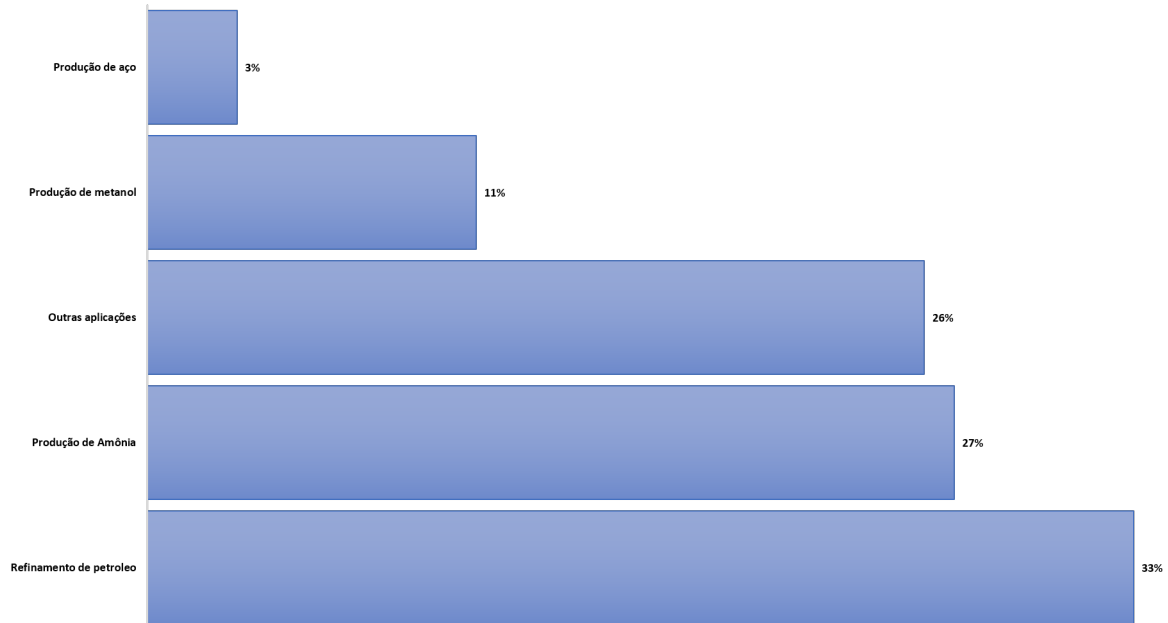
#### ***2.1.4 Principais Aplicações***

Segundo Ramachandran e Menon (1998), o hidrogênio possui sua principal aplicação associada ao seu uso como reagente. Eles evidenciam que as principais áreas de aplicação do hidrogênio como reagente são no processamento de petróleo, onde ele é unificado com hidrocarbonetos em processo de hidrocraqueamento e hidro-processamento, gerando, por meio destes, combustíveis mais refinados. Outra aplicação nesse processo é a utilização para remoção de compostos de enxofre e nitrogênio que não são interessantes para a operação e são retirados na forma de  $H_2S$  e  $NH_3$ , pois, segundo a International Energy Agency (2019) são considerados impurezas. Outro ponto mencionado, em relação a outra área que se utiliza bastante do  $H_2$ , que é o setor químico, onde o composto é bastante utilizado na produção de metanol, ácido acético e até polipropileno. Ainda como reagente, o hidrogênio é bastante utilizado na hidrogenação de óleo e gordura para diminuir a insaturação desses compostos, na produção de fertilizantes na indústria agrícola, onde reage com o nitrogênio para formar amônia, na indústria metalúrgica, onde é utilizado na produção do metal de Níquel, e na indústria de eletrônicos, onde é utilizado para tratar compostos de sílica.

Outra possibilidade do uso do hidrogênio é na remoção de  $O_2$ , segundo Ramachandran e Menon (1998), na indústria metalúrgica, onde é utilizado com o  $N_2$  em tratamentos térmicos para remoção de  $O_2$ , pela rota de produção do aço, que envolve redução direta. Já na indústria de vidro, é bastante aplicado na prevenção de oxidação de materiais. No seu contexto de uso como combustível, o hidrogênio sempre foi mais utilizado na indústria aeroespacial. Segundo International Energy Agency (2019), ainda hoje os usos do hidrogênio estão associados às indústrias mencionadas no estudo de Ramachandran e Menon (1998). Conforme é possível observar na Figura 5, nota-se que 33% do hidrogênio produzido, ainda é utilizado no refino de

petróleo, 27% corresponde a produção de amônia, 11% produção de metanol, 3% utilizado na produção de aço e o restante são as demais aplicações.

Figura 5 – Principais aplicações do hidrogênio



Fonte: International Energy Agency (2019)

Apesar da grande quantidade de aplicações do hidrogênio, a organização afirma que a maioria dessas utilizações ainda faz uso do hidrogênio cinza. Logo, existe um grande potencial de redução de emissões de CO<sub>2</sub> aplicando novas tecnologias e outros tipos de processos, como é o caso da utilização de hidrogênio verde também em setores como transporte, aquecimento e geração de energia.

## 2.2 Produção Verde

### 2.2.1 Definição

Conforme brevemente explicado na Seção 2.1.3, a produção considerada verde é caracterizada pela geração de hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia, como solar, eólica ou uso de biomassa. Sendo assim, o hidrogênio é gerado a partir de água e eletricidade, por meio do processo conhecido como eletrólise da água. Esse processo tem carácter eletroquímico e consiste em partir a molécula de água em hidrogênio e oxigênio, sendo que cerca de 9 litros de água são necessários para produzir 1kg de H<sub>2</sub> e se obtém 8 kg de O<sub>2</sub> como subproduto. Segundo

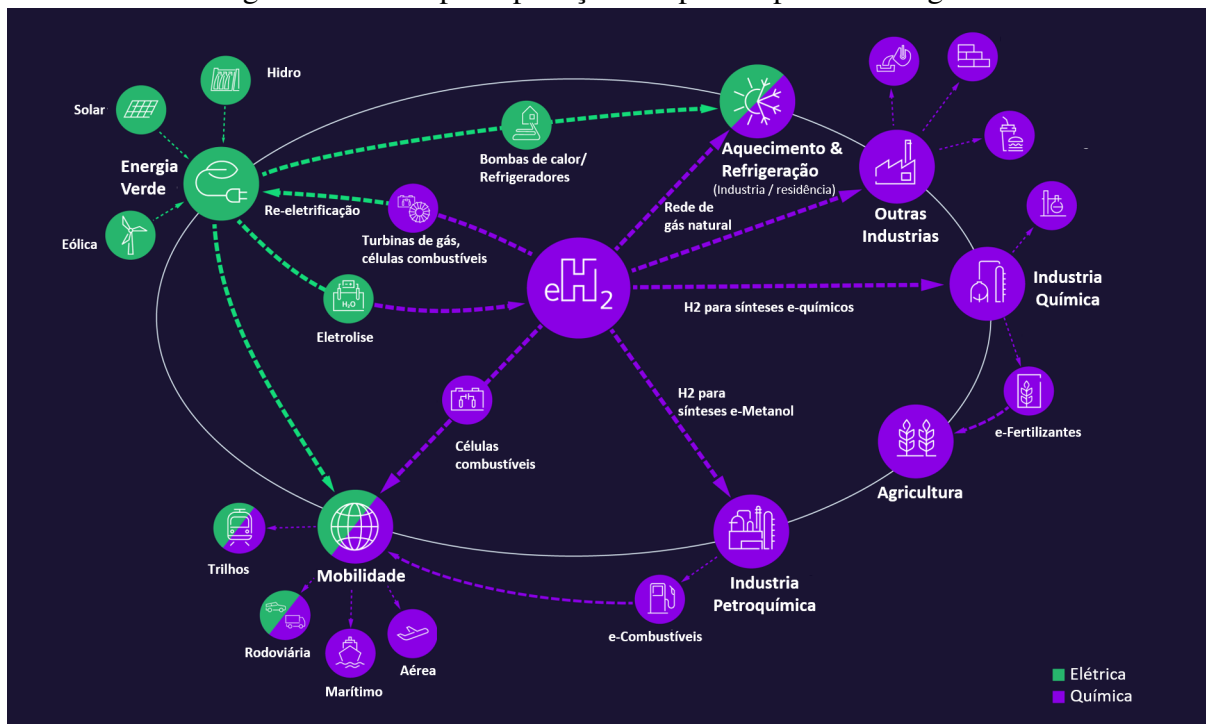
a International Energy Agency (2019), menos de 0.1% de todo hidrogênio produzido hoje vem dessa fonte. Uma das principais utilizações dessa rota está voltada para produção de hidrogênio com os excedentes da geração de energia que sejam superiores à demanda atual, ou seja, consumir o que não teria utilização imediata e armazenar em forma de gás, nesse caso, poderia ser uma vantagem. Sendo assim, o excesso de energia será destinado a eletrolisadores que vão produzir hidrogênio, o hidrogênio será armazenado e, em momentos em que a demanda de energia seja maior que a capacidade de geração, o hidrogênio pode ser empregado para produção de energia elétrica por meio da sua conversão em energia utilizando uma célula combustível. Além desses aspectos, o gás gerado por meio de eletrolisadores também pode ser empregado em vários outros processos, como será explicado a seguir.

### **2.2.2 Aplicações da produção verde**

O H<sub>2</sub> pode ser considerado um integrador, pois ele pode se tornar uma ponte entre geração de energia elétrica e outros usos e aplicações, seja como energético ou químico. Essa característica pode ser chamada de *Power – to – X* (PtX), na qual o conceito foi estabelecido pela entidade de certificação e inspeção do tema na Alemanha, a Tuv Sud (2021). A organização indica que *Power – to – X* se refere a todos os processos que convertem eletricidade renovável em fontes de energia química para armazenamento de eletricidade, combustíveis à base de eletricidade para mobilidade ou geração de matérias-primas para indústria química. A palavra *Power* vai se referir ao excedente temporário de energia elétrica que seja acima da demanda naquele momento e a letra "X" significa o uso pretendido para esse excesso de energia. Na Figura 6, é possível observar as diversas possibilidades e rotas de produção a partir da geração do hidrogênio verde. Segundo a Siemens Energy (2021), as tecnologias *Power – to – X* são de grande relevância para construção de um cenário favorável ao uso de hidrogênio verde, pois permitem o uso do composto em indústrias de mobilidade, petroquímica, agricultura, químicos, entre outros.

Portanto, é possível notar que a produção verde de hidrogênio em larga escala, se tornará essencial para suprir a alta demanda do gás que existirá em diversos setores da indústria. Por consequência, essa introdução do hidrogênio realizará a redução da emissão de gases de efeito estufa, já que, como citado anteriormente, o hidrogênio verde é considerado um combustível de carbono neutro, pois nem em sua produção direta, nem em sua cadeia são produzidos esses gases. Com a redução dos custos de produção por meio de fontes renováveis como a solar e

Figura 6 – Principais aplicações mapeadas para o hidrogênio

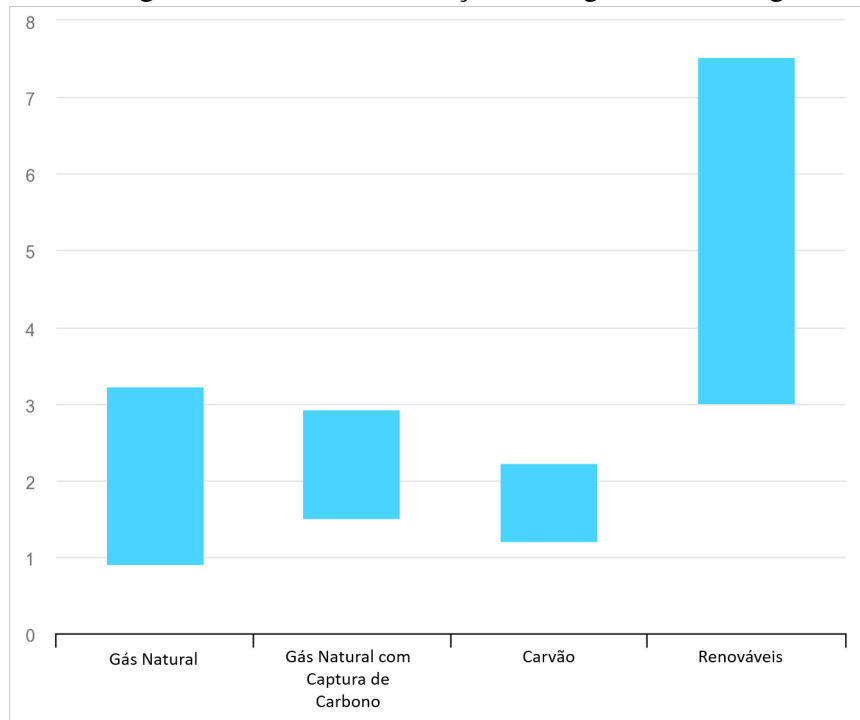


Fonte: Siemens Energy (2021)

eólica que, segundo International Energy Agency (2019), poderá chegar a 30% na próxima década, aumentou-se a expectativa da geração de hidrogênio por meio da eletrólise. Apesar dessa redução dos custos, a produção do hidrogênio por rotas verdes ainda mantém um desafio, pois, dependendo do foco de produção, a grande demanda por água do processo pode ser um gargalo e a localização da planta verde também. Outros gargalos atuais estão associados ao custo de produção, investimento em infraestrutura para essa geração, armazenamento em escala industrial, transporte, distribuição e condições de segurança. Conforme evidenciado na Figura 7, nota-se que os custos associados à produção de hidrogênio por fontes renováveis ainda precisa diminuir bastante para se tornar mais competitivo em aspectos econômicos com outras rotas de produção.

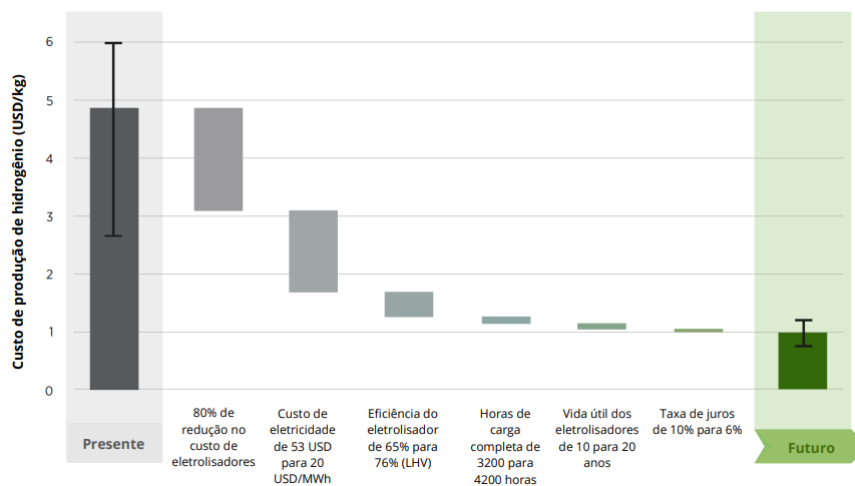
A expectativa é que esses custos reduzam significativamente, conforme evidenciado na Figura 8, por meio da redução dos custos de eletrolisadores, custos de eletricidade, melhoria na eficiência e vida útil do eletrolisador, aumento de horas de carga completa e redução das taxas de juros. Essas iniciativas devem ser tomadas para que exista de fato uma possibilidade de aumento da utilização de fontes renováveis para produção de hidrogênio.

Figura 7 – Custo de Produção Hidrogênio - USD/kg



Fonte: International Energy Agency (2019)

Figura 8 – Custo de Produção Hidrogênio - USD/kg



Fonte: Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021)

### 2.2.3 A eletrólise na produção verde

Segundo Hydrogen–Fundamentals (2012), a eletrólise da água é uma tecnologia aplicada industrialmente há mais de 80 anos. Essa tecnologia é fundamental para que o processo de produção verde do hidrogênio seja bem sucedido, pois o eletrolisador, que é o equipamento responsável pela eletrólise, é um dos equipamentos mais relevantes das plantas de produção de hidrogênio verde, e a produção do  $H_2$  irá depender diretamente da sua capacidade de conversão. O processo de eletrólise funciona baseado na reação evidenciada na Equação (2.1), a qual



necessita de uma corrente elétrica de aproximadamente 39 kWh para produzir 1 kg de H<sub>2</sub> em condições normais de pressão e temperatura (25°C e 1atm).



Conforme evidenciado por Hydrogen–Fundamentals (2012), as fontes de energia renováveis podem ser provenientes de dois sistemas principais. O primeiro é a geração por meio da utilização de placas fotovoltaicas, que permite que a radiação solar seja coletada e convertida em eletricidade ou calor, alimentando o eletrolisador, como é o caso de sistemas de energia solar e o segundo sistema considerado importante nessa aplicação é o eólico, que permite que a energia cinética do vento seja convertida em energia mecânica para as turbinas e, por consequência, torne-se também uma fonte propulsora para o processo de eletrólise.

#### **2.2.4 Cenário Mundial**

Conforme evidenciado no mapeamento Câmara de Industria e Comercio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021), existem diversas estratégias para tornar a economia do hidrogênio relevante em diversos países do mundo. O mapeamento explica que existem alguns objetivos principais que impulsionam as iniciativas: um deles é a redução das emissões de gases de efeito estufa, a qual tem como principal desafio a inserção de tecnologias em setores que possuem uma descarbonização mais desafiadora, como é o caso da indústria petroquímica e do setor de transporte, que já possuem tecnologias bem definidas e aplicadas. Um segundo ponto que diversos países tem como foco é a possibilidade de aumentar sua segurança energética, diversos países hoje não têm matrizes diversificadas e ficam dependentes de combustíveis fósseis ou de geração centralizada em uma única fonte, como é o caso do Brasil com a energia hidroelétrica. Por fim, o outro objetivo que se deseja alcançar está relacionado a construção de uma cadeia de valor para tornar possível o consumo de H<sub>2</sub> domesticamente, e assim, impulsionar a economia com geração de empregos e adesão de tecnologias.

Mapeando alguns países que são considerados chave para economia global, o estudo realizado por Câmara de Industria e Comercio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021) evidencia que os Estados Unidos da América (EUA) possuem objetivos para promover a transição de alguns meios de transporte para alternativas com menores emissões, incentivar o uso de H<sub>2</sub> em iniciativas de curto prazo e, por fim, estabelecer normas e padrões para produção de aço e

fertilizante considerados "verdes" em projetos públicos. Além disso, o país pretende seguir as estratégias definidas no documento *Road Map To A Hydrogen Economy* que traz iniciativas relacionadas ao H<sub>2</sub> para próxima década.

Juntamente com a aspiração em tornar as produções mais sustentáveis, diversos países do mundo tem se movimentado com projetos e investimentos nesse setor. Segundo o mapeamento feito por Deloitte BE (2021), existe a chamada economia do hidrogênio emergente e a União Europeia tem diversas iniciativas pautadas já para 2030. Por exemplo, países como Espanha e Holanda possuem um projeto que visa ter uma capacidade de eletrólise de 4GW até 2030. Já Portugal, pretende ter entre 2 à 2,5 GW de capacidade instalada para produção de hidrogênio, a França almeja ter 6,5 GW de hidrogênio verde e a Alemanha pretende possuir 5 GW até 2030 e 10 GW até 2040. Todos esses projetos surgem bastante pautados pelo acordo verde europeu e o plano de recuperação econômica da Europa. Essas iniciativas reconhecem os investimentos em hidrogênio como prioridade para impulsionar a economia e, para tornar tornar isso possível, o continente deve se preocupar em desenvolver uma infraestrutura de transporte e armazenamento desse insumo bem delimitada. Para muitas dessas iniciativas, segundo Câmara de Industria e Comercio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021) o continente estabeleceu estratégias, evidenciadas no documento *Hydrogen Roadmap Europe : A Sustainable Path for the European Energy Transition*.

Na Oceania, a Austrália, que possui sua economia bastante voltada para combustíveis fósseis, tem se mostrado bastante interessada em minimizar esse impacto e se voltar para estratégias mais sustentáveis do ponto de vista ambiental. Segundo Câmara de Industria e Comercio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021) as fontes renováveis vêm ganhando bastante relevância no território australiano, entre os anos de 2018 e 2019 essas fontes alternativas chegaram a representar 21% da matriz elétrica do país. Os australianos vêm se destacando com suas iniciativas voltadas para o H<sub>2</sub>V e estabeleceram o documento *Australia's National Hydrogen Strategy*, no qual uma das suas principais estratégias está na criação de HUBs de hidrogênio instalados em todo o país.

Na região da América do sul, além do Brasil, que terá suas iniciativas mapeadas na Seção 2.2.5, o Chile também vem ganhando destaque no tema em questão. Segundo Câmara de Industria e Comercio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021), o país tem o objetivo de tornar a produção de hidrogênio 100% verde por meio das estratégias traçadas no documento *Estrategia Nacional de Hidrogeno Verde* de 2020, com etapas que consistem em primeiramente

transicionar a indústria nacional para utilização de H<sub>2</sub>V, se concentrando em produções de grande escala. Posteriormente, o país quer, além de produzir e abastecer o mercado local, também exportar H<sub>2</sub>V para outros países.

No continente Asiático, existem dois países que têm tido iniciativas que se destacam: a Coreia do Sul e a China. Na Coreia do Sul, foram estabelecidas metas por meio de dois *roadmaps* que são "*Roadmap da Economia do Hidrogênio na Coreia*" e o "*Roadmap Nacional do Desenvolvimento da Tecnologia do Hidrogênio*". Segundo Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021), o foco dos sul-coreanos é ganhar destaque e pioneirismo com tecnologias que possibilitam veículos que sejam movidos a pilha combustível e sistemas estacionários para geração de energia. Além da Coreia, outro destaque no continente asiático é a China, hoje considerado o país que mais produz e consome hidrogênio no mundo, e que tem como foco o uso de hidrogênio no seu sistema de transporte e estabelecimento de *clusters* de produção de H<sub>2</sub>V.

Por fim, no Oriente Médio, a Arábia Saudita tem ganhado notoriedade com os investimentos voltados para a economia de H<sub>2</sub>V. Segundo Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021), o projeto de construção da mega cidade ("Neom") prevê a construção de uma usina de hidrogênio verde considerada de grande escala que será produzido com fontes solar e eólica e utilização de eletrolisadores com foco na produção de amônia "verde" para exportação.

### **2.2.5 Cenário Nacional e Regional**

Assim como muitos países mencionados na Seção 2.2.4, o uso de hidrogênio está restrito a aplicações industriais e cerca de 95% é de hidrogênio cinza, que é produzido pela Petrobras para utilização em refino e fertilizantes, conforme explicado por Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021). O Brasil possui um mercado consumidor de hidrogênio voltado para os setores de petroquímica, siderurgia, alimentação, vidraçaria e geração.

O mapeamento realizado no estudo da Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (2021) mostra que o Brasil tem tido suas primeiras iniciativas voltadas para essa produção, como experimentos em plantas-piloto, principalmente no Nordeste do país, visto que os principais propulsores dessa geração são as fontes renováveis de energia, que têm diversos polos já instalados nessa região, além do seu clima favorável para essa geração.

O estado do Ceará, por exemplo, tem ganhado bastante notoriedade nesses aspectos, com o intuito de inicializar o chamado Hub do hidrogênio verde, que será localizado no município de Pecém e terá foco em suprir a demanda nacional de hidrogênio e exportação.

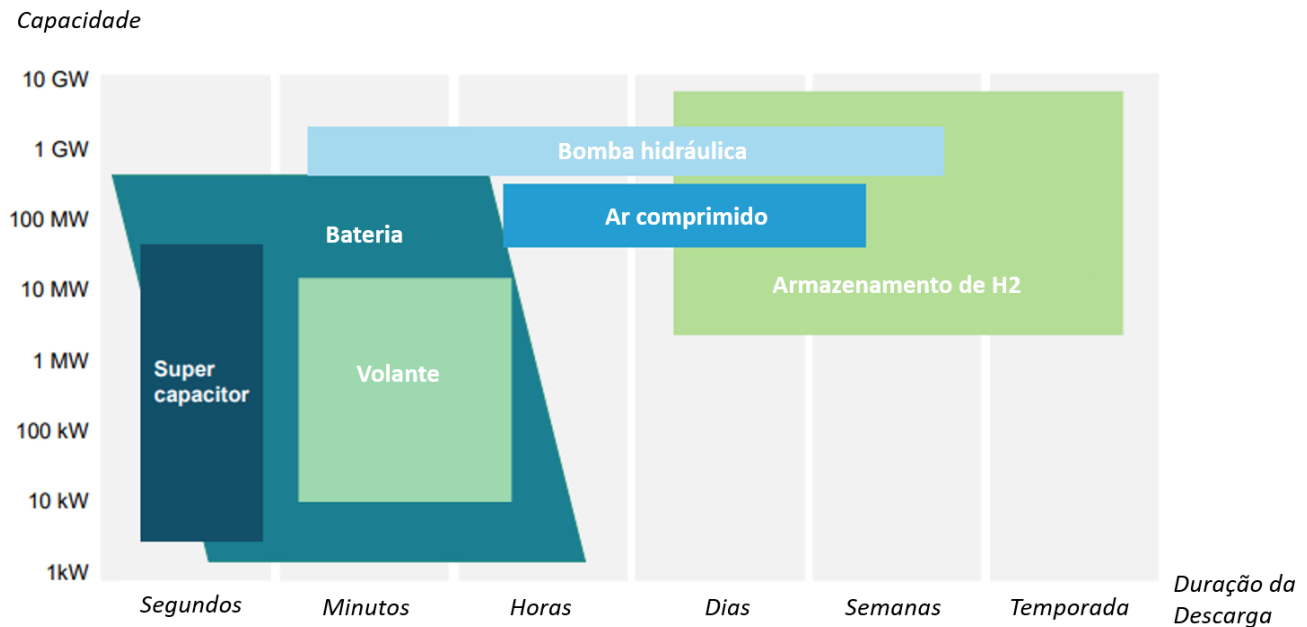
A iniciativa H<sub>2</sub> Brasil, promovida para a expansão do hidrogênio verde, tem sido estabelecida pelos governos do Brasil e da Alemanha. O projeto surgiu em 2021, tem como foco expandir o mercado nacional do H<sub>2</sub>V como forma de progredir no uso de energias descarbonizadas e irá promover ações como estudos de cenários de planejamento energético, melhorias no marco regulatório, estudo sobre as alternativas de existência de uma certificação H<sub>2</sub>V, incentivo ao desenvolvimento de inovação para a produção de H<sub>2</sub>V e seus derivados PtX, entre outras.

### **2.3 Armazenamento**

O armazenamento de excedentes de energia gerados tem sido um problema amplamente abordado na literatura. Segundo Langels e Syrjä (2021), o hidrogênio se torna foco no armazenamento de excedentes de energia pelos motivos que podem ser avaliados na Figura 9. Sendo possível notar que, comparado a outras possibilidades de armazenamento, como as baterias, o armazenamento por meio do hidrogênio (para produções maiores) se torna muito mais vantajoso, pois permite o estoque de uma alta capacidade de energia, podendo chegar a 10 GW, de modo que o tempo de descarga é muito maior, sendo em dias, semanas ou temporadas. Logo, para estoques a longo prazo, onde se deve esperar que a capacidade de produção de energia seja menor e os excedentes estocados sejam utilizados para essa compensação, o armazenamento por meio do H<sub>2</sub> pode ser mais recomendado.

Atualmente, segundo estudo publicado pela International Energy Agency (2019), o hidrogênio é normalmente armazenado como gás ou líquido, sendo utilizado em aplicações de mobilidade ou aplicações estacionárias. Porém, a crescente demanda por H<sub>2</sub> e seu protagonismo como o chamado "combustível do futuro" vão exigir uma maior variedade de opções de armazenamento para a aplicação em muitos outros processos industriais e aplicações na cadeia de valor do hidrogênio, pois possibilidades de armazenamento em larga escala serão necessárias para suportar a produção que está sendo feita em conjunto com a demanda sazonal que pode existir de eletricidade ou aquecimento. Logo, é possível notar que o armazenamento vai estar associado ao volume que deseja ser armazenado, por quanto tempo o H<sub>2</sub> ficará armazenado, qual será a velocidade de descarga, entre outros aspectos. Conforme evidenciado por Eljack e Kazi (2021), uma das grandes chaves para o crescimento econômico do hidrogênio é a indústria garantir um

Figura 9 – Comparação dos tipos de armazenamento de energia



Fonte: Langels e Syrjä (2021)

armazenamento seguro, compacto, leve e econômico.

Em relação ao hidrogênio em sua forma gasosa, existem dois tipos de armazenamentos possíveis, sendo eles o armazenamento em tanques e o geológico. No caso da utilização de tanques, geralmente são utilizados para armazenar o gás hidrogênio comprimido ou liquefeito, por essa opção possuir altas taxas de descarga e alta eficiência, segundo International Energy Agency (2019), cerca de 90% do armazenamento é realizado desta forma. Por conta da sua densidade energética, o espaço de armazenamento do H<sub>2</sub> deve ser bem maior se comparado a outros combustíveis, sendo assim, diversos estudos focam em pesquisas e formas de reduzir mais o tamanho dos tanques, o que seria muito útil em termos de logística e utilização em áreas com alta densidade populacional. Esses estudos focam em tanques que podem suportar versões mais comprimidas do gás, a partir de 800 bar ou mais. Porém, como será evidenciado também neste trabalho, para utilizações em aplicações industriais, em locais que possuem maior espaço físico, cilindros maiores e com menores pressões podem atender de forma adequada a demanda.

Diante disso, os materiais de armazenamento também precisam ser estudados, como materiais metálicos e compostos químicos híbridos, que estão em estágio inicial de pesquisa para essa aplicação e podem permitir densidades maiores de hidrogênio. Segundo evidenciado por Eljack e Kazi (2021), o hidrogênio pode também danificar e atacar alguns materiais, tanto no armazenamento como em tubos, válvulas e outros equipamentos até o ponto de descarga. Logo,

nota-se que o tema de tanques de armazenamento para o gás hidrogênio não é algo trivial, visto que diversas variáveis devem ser mapeadas e levadas em consideração.

Conforme explica Zuttel (2003), o principal desafio do armazenamento de hidrogênio está relacionado a grande necessidade de reduzir o volume do gás. As moléculas precisam se tornar o mais próximas possíveis para atingir uma grande densidade volumétrica, de modo que o material utilizado tenha um custo controlado que viabilize a estocagem. Conforme visto na Secção 2.1.2 e também explicado por (ZUTTEL, 2003), em condições ambiente de pressão e temperatura, 1 kg do gás ocupa 11 m<sup>3</sup> de volume, assim o armazenamento precisa proporcionar uma alta compressão. Além disso, outro aspecto bastante relevante que deve ser levado em consideração está relacionado aos critérios de reversibilidade da absorção e liberação do H<sub>2</sub>, logo, tanto os materiais inertes como também os que interagem de forma positiva com o gás devem ser estudados. Os principais tipos de armazenamento reversível de H<sub>2</sub> são evidenciados na Tabela 2.

Tabela 2 – Os 6 métodos básicos de armazenamento de hidrogênio

Método de armazenamento	$\rho m$ [%massa]	$\rho V$ [kg H <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> ]	T [°C]	P [bar]
Cilindros de alta pressão	13	<40	RT	800
Hidrogênio líquido em tanques criogênicos	dependente do tamanho	70.8	-252	1
Hidrogênio adsorvido	2	20	-80	100
Hidrogênio absorvido em componentes metálicos	2	150	RT	1
Compostos complexos	< 18	150	> 100	1
Metais e complexos juntos com água	< 40	> 150	RT	1

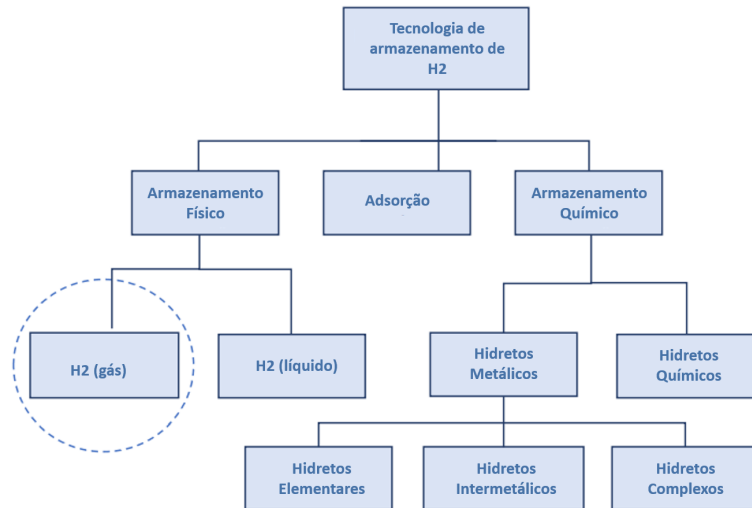
Fonte: (ZUTTEL, 2003)

Nota: Densidade gravimétrica  $\rho m$ ; densidade volumétrica  $\rho V$ ; temperatura de operação T e pressão P. RT indica temperatura ambiente de 25°C.

Para o armazenamento em cilindros de alta pressão evidenciado na Tabela 2, este é realizado comprimindo o gás H<sub>2</sub> em cilindros de estrutura de peso leve, com resistência do material em torno de 2000 MPa. No caso do armazenamento de H<sub>2</sub> líquido, deve-se estar atento para a perda de pequenas porcentagens de H<sub>2</sub> por dia em condições de temperatura constante. No caso da estocagem por adsorção, ocorre a adsorção física de H<sub>2</sub> em outros materiais, como o carbono, com uma grande área de superfície, e é inteiramente reversível. Diferente dos métodos citados anteriormente, que realizam o armazenamento do hidrogênio em sua forma molecular (H<sub>2</sub>), o armazenamento por absorção abrange o hidrogênio em sua forma atômica (H), nesse caso, ele é intercalado e situado em compostos metálicos, no caso de hidretos metálicos a operação é totalmente reversível. No caso do armazenamento por compostos complexos, os complexos AlH<sub>4</sub> ou BH<sub>4</sub> são utilizados de forma que ocorre a dessorção em altas temperaturas

e a adsorção em altas pressões. Por fim, a utilização de complexos e metais juntos com água tem seu armazenamento pautado por oxidação química dos metais e liberação do hidrogênio, ainda não se tendo certeza se será possível tornar a operação reversível. Na Figura 10, é possível verificar as possíveis tecnologias de armazenamento do hidrogênio.

Figura 10 – Comparação dos tipos de armazenamento de energia



Fonte: Langels e Syrjä (2021)

Como destacado na Figura 10, o foco desse estudo será voltado ao armazenamento do hidrogênio em sua forma gasosa em vasos de pressão e a otimização desse processo. Logo, serão evidenciados os principais estudos que envolvem esse tipo de armazenamento. Nesse caso, conforme evidenciado por Zuttel (2003), trata-se do sistema mais comumente utilizado para o armazenamento de hidrogênio.

### 2.3.1 Cilindros de Alta Pressão

Operando em sistemas com pressão em torno de 20MPa, segundo Zuttel (2003), nesse dimensionamento, as paredes internas e externas do cilindro devem ser levadas em consideração, além da pressão e da resistência à tração do material de construção do tanque. No caso dessa aplicação, a resistência do material pode ser bastante variada, indo de 50MPa, no caso de utilização de alumínio, até 1100MPa, no caso do uso do aço de alta qualidade. Atualmente, já existem aplicações que fornecem uma resistência de 2410MPa e densidade de apenas 2370  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , o que poderia favorecer bastante a logística do material. Além disso, novos cilindros construídos com compósitos mais leves dão a possibilidade de armazenamento de hidrogênio em pressões de 80 MPa, fazendo com que sua densidade volumétrica fique em torno de 36

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . O autor ainda afirma que as definições do material ideal para o cilindro de alta pressão estão relacionadas a alta resistência à tensão, baixa densidade, não reatividade com o hidrogênio e não permissão de difusão do hidrogênio. Atualmente, a maioria se utiliza de materiais como aço inoxidável, ligas de cobre ou alumínio, porém, existem perspectivas de utilização de materiais cada vez mais dedicados, com combinação de ligas metálicas e compósitos para tornar o armazenamento do gás mais seguro. Atualmente, a segurança é um dos principais aspectos de preocupação da utilização de cilindros de hidrogênio e inserção do gás em economias fora do contexto industrial e a expectativa é que os cilindros do futuro sejam compostos por três camadas, utilizando polímeros, fibra de carbono e fibra sintética, como aramida, que é capaz de conter qualquer dano de corrosão ou mecânico. Um dos maiores desafios do armazenamento é conseguir construir um cilindro de 110 kg, que suporte valores acima de 70 MPa de pressão, uma densidade gravimétrica de armazenamento de 6% massa e uma densidade volumétrica de armazenamento de  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Segundo Hu *et al.* (2009), existem quatro diferentes tipos de cilindros que podem ser utilizados para o armazenamento de hidrogênio comprimido. O Tipo I são cilindros metálicos, os quais permitem que o hidrogênio seja armazenado de forma mais limitada em pressões menores que 25 MPa, mas geralmente existem aspectos desse tipo de armazenamento que reduzem a segurança e eles estão associados à redução da força de contenção do cilindro. O Tipo II tem a mesma ideia do primeiro tipo, porém ele possui um reforço de compósitos de fibras na direção circunferencial do cilindro metálico. Na expectativa de melhorar o armazenamento comportando as possibilidades de aplicação em automóveis, surgiram os cilindros do Tipo III e IV, que são totalmente revestidos de compósitos, tanto em sua direção circunferencial, quanto na longitudinal. Os cilindros do tipo III e IV vão se diferenciar pelo material empregado internamente, no caso do Tipo III, será alumínio, e no caso do Tipo IV, um polímero, esse arranjo permitirá projetos com armazenamento de hidrogênio em altas pressões entre 5000 até 10000 psi e esse forro com alumínio ou polímero com grande peso molecular serve para atuar como uma barreira de permeação do gás hidrogênio, por conta da sua difusibilidade.

Cumalioglu (2005), afirma que, no mercado, geralmente existem vasos de alta pressão que suportam o armazenamento de hidrogênio acima de 30MPa e estes normalmente são feitos de aço. Além disso, as paredes do vaso são geralmente produzidas com as ligas evidenciadas na Tabela 3, com suas respectivas densidades e suas resistências à tração e, normalmente, o aço inox é aplicado na construção dos vasos de pressão. A resistência à tração vai representar



uma limitação à pressão máxima que o vaso suporta e, por conta disso, essa limitação deve ser levada em consideração na modelagem do problema, principalmente em suas restrições. Essa restrição acarreta uma limitação da densidade volumétrica, que seria, segundo o autor, definida como a quantidade de hidrogênio em massa para o volume permitido do cilindro. Ou seja, se existe um limite do volume do cilindro, a pressão vai limitar também a massa de hidrogênio. Além dessas duas propriedades, outras vão ser de grande importância na seleção do material das paredes, como os efeitos gerados pelos ciclos de carregamento e descarregamento do tanque e, também, como a fadiga e envelhecimento do material. Ainda evidenciando as possibilidades de tanques disponíveis no mercado, Cumalioglu (2005) mostra que existem tanques que suportam pressões acima de 70 MPa mas, em altas pressões, vão requisitar alta energia para comprimir o gás. Para operações em pressões menores, como 35 MPa, os tanques podem requisitar até três camadas para que a camada do meio aja como uma barreira estrutural e a interna como uma barreira de permeação do gás. Além disso, os tanques devem ter um Fator de Segurança de 2,25, pois este permite estabelecer uma margem de segurança.

Tabela 3 – Tipos de Ligas Aplicadas nas Paredes de Vasos de Alta Pressão

Tipo de Liga	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	S [MPa]
Ligas de Aço	7860	703
Ligas de Titânio	4430	924
Compósitos de Carbono	1900	2070

Fonte: Cumalioglu (2005)

## 2.4 Estudos de Otimização

Para modelagem de um problema como o que este trabalho aborda, deve-se levar em consideração outros estudos de otimização de vasos de alta pressão. Segundo Arnold e Stewart (2008), a maioria dos projetos de vasos de pressão são realizados seguindo as regras estabelecidas pela *American Society of Mechanical Engineers American Society of Mechanical Engineers* (ASME), por meio do código da mesma, no qual constam várias observações e regras para a construção de trocadores de calor e vasos de pressão. Tais autores dedicam os seus estudos a simplificar alguns pontos do código ASME e fornecem equações para aplicação em projetos de vasos de pressão. Essas equações tem parâmetros importantes para construção do vaso, como comprimento, volume, espessura das placas, pressão de operação, entre outras que serão detalhadas no decorrer deste trabalho. As dimensões e materiais de construção dos vasos de pressão

afetam diretamente os aspectos de custo do projeto de H<sub>2</sub>V. Por conta disso, essas variáveis devem ser estudadas e avaliadas no contexto de implementação dos projetos. A minimização do custo associada à construção de vasos de pressão, tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos como Sandgren (1990), Kannan e Kramer (1994), Azad *et al.* (2011), Garg (2013), Imanirad *et al.* (2013), Kattan e Alrawi (2014), NishidharBabu (2017) e Belkourchia *et al.* (2019).

Os autores citados realizam a minimização da função objetivo deduzida por Sandgren (1990), utilizando diversos tipos de algoritmos, e fazem comparações dos valores ótimos alcançados. Em cada pesquisa, os principais algoritmos abordados são a otimização não-linear, a otimização mista e os algoritmos genéticos e seus derivados, que são considerados por classificação como meta-heurísticos. Kannan e Kramer (1994), assim como Sandgren (1990), realizam o estudo de diversos casos, porém os autores realizam a aplicação da estratégia de otimização discreta inteira mista e contínua, para propor as soluções especificadas em seu trabalho. No caso de Azad *et al.* (2011), seu estudo teve como foco a aplicação do algoritmo *Big Bang~Big Crunch (BB~BC)*, que promove uma estratégia de otimização similar a de algoritmos genéticos, conhecidos amplamente na literatura como *Genetic Algorithm (GA)*. No estudo desenvolvido por Garg (2013), para proposta de solução do problema estrutural, o autor utilizou o algoritmo de colônia de abelhas artificial (*Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm*), que novamente é um algoritmo com estrutura bastante semelhante ao algoritmo genético. Imanirad *et al.* (2013), é abordada a aplicação do Algoritmo Vagalume (*Firefly Algorithm (FA)*) para resolução do problema. Kattan e Alrawi (2014), propõem a resolução do problema por meio de um algoritmo de busca harmônica adaptativa dinâmica (*Dynamic Self – adaptive Harmony Search (DSHS) Algorithm*). NishidharBabu (2017), utilizou-se de um algoritmo genético real *Real Coded Genetic Algorithms (RCGA)*. Por fim, Belkourchia *et al.* (2019), propõe para solução desse tipo de problema de engenharia um algoritmo de otimização híbrida (*Hybrid Optimization Algorithm*).

Sandgren (1990), com base nas condições estabelecidas no código do ASME, realizou a modelagem de um vaso de pressão cilíndrico com as cabeças hemisféricas para o armazenamento de ar comprimido a uma pressão de 3000psi. As considerações realizadas são que o material de construção do vaso é aço carbono ASME SA 203 grade B, a pressão interna é orientada verticalmente com eixo do casco do vaso, o comprimento do casco não pode ser superior à 20 ft e o volume máximo do recipiente é de 750 ft<sup>3</sup>. Em relação às espessuras do casco e da cabeça, o autor considera que estas devem assumir valores múltiplos de 0,0625 in (pois estes estão disponíveis no mercado) e não podem exceder a espessura de 2 in. Além disso, a espessura

do casco não pode ser inferior a 1,1 in e a da cabeça não pode ser menor que 0,6 in. Além dos custos associados ao material de construção, o autor afirma que a soldagem, do vaso tem um custo significativo e deve ser inserida na função objetivo. Para estimar o custo da soldagem o autor faz uma ponderação levando em consideração o custo da solda pela quantidade de solda necessária. Diante do exposto, Sandgren (1990) apresentou o seguinte modelo de programação linear: a função objetivo, evidenciada na Equação (2.2) e as restrições mostradas nas Equações (2.3), (2.4), (2.5), (2.6) e (2.7).

Índices:

$$i = \begin{cases} 1: & \text{Custos de construção do vaso} \\ 2: & \text{Custos de soldagem do vaso} \end{cases}$$

$$j = \begin{cases} 1: & \text{Relacionado ao casco} \\ 2: & \text{Relacionado à cabeça} \end{cases}$$

$$k = \begin{cases} 3: & \text{Restrições 1} \\ 4: & \text{Restrições 2} \end{cases}$$

Parâmetros:

$C_{ij}$ : Constantes de custos da função objetivo

$C_{kj}$ : Constantes de restrições de espessura mínima

$L_{max}$ : Comprimento máximo do casco

$V_{max}$ : Volume máximo do vaso

Variáveis de decisão:

$R$ : Raio do casco

$L$ : Comprimento do casco

$t_s$ : Espessura do casco

$t_h$ : Espessura da cabeça

Função Objetivo:

$$\min f(x) = C_{11}Rt_sL + C_{12}R^2t_h + C_{21}t_s^2L + C_{22}Rt_s^2 \quad (2.2)$$

Sujeito a:

$$g_1(x) = t_s - C_{31}R \geq 0 \quad (2.3)$$

$$g_2(x) = t_h - C_{41}R \geq 0 \quad (2.4)$$

$$g_3(x) = \pi R^2 L + \frac{4}{3} \pi R^3 - V_{max} \geq 0 \quad (2.5)$$

$$g_4(x) = L_{max} - L \geq 0 \quad (2.6)$$

$$L, R, t_s, t_h \geq 0 \quad (2.7)$$

As constantes definidas por Sandgren (1990) são evidenciadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Constantes aplicadas no trabalho de Sandgren (1990)

Constante	Valor
$C_{11}$	0.6224
$C_{12}$	1.7781
$C_{21}$	3.1611
$C_{22}$	19.8621
$C_{31}$	0.0193
$C_{41}$	0.00954
$L_{max}$	240
$V_{max}$	1296000

Fonte: Sandgren (1990)

Para definição das restrições das equações, nas Equações 2.3 e 2.4, Sandgren (1990) afirma que foram utilizadas equações presentes no código ASME que relacionam a espessura das placas com a pressão interna do vaso e outras variáveis de estresse. NishidharBabu (2017), cita que essas equações estão associadas a parâmetros de projeto, que são o estresse longitudinal ( $\sigma_L$ ) e o circunferencial, também chamado de estresse Hoop ( $\sigma_\theta$ ), demonstrados nas equações (2.9) e (2.8) respectivamente. Segundo Towler e Sinnott (2007) o estresse gerado pela pressão interna determina diretamente a espessura mínima das paredes do vaso de pressão, e como visto nas equações anteriores, esse estresse é determinado por um balanço das forças longitudinais e

circunferenciais de atuação. Todas as equações de espessura dos vasos de pressão são derivadas desse balanço inicial. A Figura 11 é utilizada para o entendimento de como essas forças atuam, por exemplo do casco do vaso de pressão.

$$\sigma_{\theta} = \frac{PR_{ext}}{t} \quad (2.8)$$

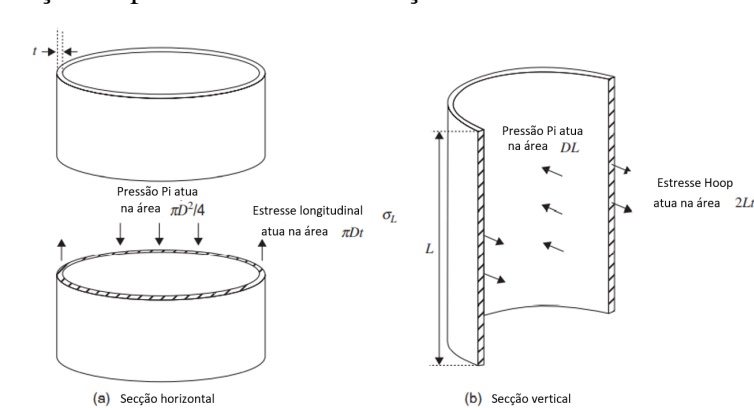
$$\sigma_L = \frac{PR_{ext}}{2t} = \frac{\sigma_{\theta}}{2} \quad (2.9)$$

em que:

$R_{ext}$ : Raio externo do casco

$t$ : Espessura do casco

Figura 11 – Atuação da pressão interna nas seções vertical e horizontal do vaso de pressão



Fonte: Towler e Sinnott (2007)

Cumalioglu (2005), afirma que, para essa modelagem, é necessário mapeamento baseado, na pressão interna do tanque, qual menor espessura de parede é permitida, levando em consideração um fator de segurança apropriado para a operação. Nesse caso, aplicam-se as equações (2.10) e (2.11). Nota-se que o entendimento dos estresses circunferencial e longitudinal são importantes para construção das equações de restrições que compõem o modelo.

$$t = \frac{P \cdot r \cdot FS}{S_y} \quad (2.10)$$

$$t = \frac{P \cdot r \cdot FS}{2 \cdot S_y} \quad (2.11)$$

em que:

- $P$ : Pressão de operação
- $t$ : Espessura do casco
- $r$ : Raio do tanque
- $FS$ : Fator de segurança
- $S_y$ : Resistências à Tração

Além dessas equações, o código ASME menciona também equações apropriadas para se levar em consideração a relação entre espessura do casco, pressão interna e tensões. Segundo Boiler e Committee (2017), a relação para cascos cilíndricos e cabeças hemisféricas são evidenciadas nas equações (2.12) e (2.13), respectivamente. A equação (2.12) é designada para dimensionar o estresse circunferencial ou as junções longitudinais, essa equação é aplicada quando a espessura não é mais que a metade do raio interno ou a pressão de operação não excede a relação  $0,385SE$ , com o estresse máximo ( $S$ ) e a eficiência de junção ( $E$ ). A equação (2.13) é utilizada para relacionar o estresse longitudinal ou junção circunferencial e essa equação é aplicada quando a espessura não é mais que a metade do raio interno ou a pressão de operação não excede a relação  $1.25SE$ .

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (2.12)$$

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad (2.13)$$

em que:

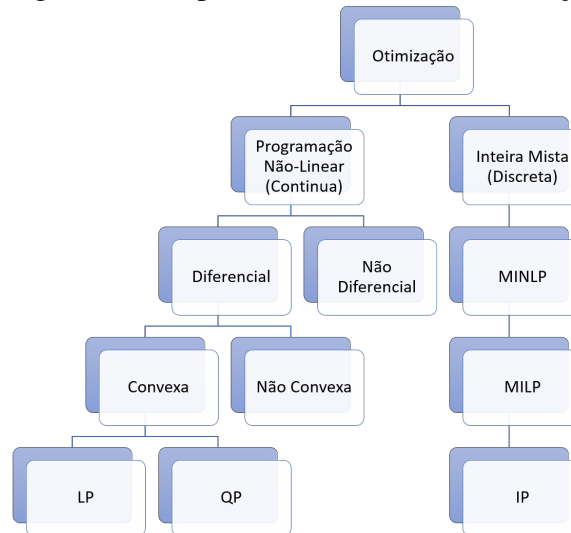
- $S$ : Estresse máximo que o material pode ser submetido
- $t$ : Espessura das paredes
- $R$ : Raio interno
- $P$ : Pressão de operação
- $E$ : Eficiência de junção

#### 2.4.1 Equações do Modelo

Segundo Biegler (2010), a otimização é de grande valia para o processo de decisão dentro de um projeto de engenharia química. Os problemas de otimização podem ser classificados

conforme evidenciado na Figura 12. Conforme explicado por Towler e Sinnott (2007), os retornos da função objetivo e restrições vão impactar diretamente em aspectos do processo, por isso, faz-se necessário o conhecimento de como desenvolver e especificar informações base de projeto, para que essas resguardem a análise de possibilidade de construção ou aquisição de vasos de pressão.

Figura 12 – Tipos de Problema de Otimização



Fonte: Biegler (2010)

Biegler (2010) complementa que problemas nesse campo são complexos e requerem muitas interações, que nem sempre retornam os melhores resultados, pela ambiguidade que algumas funções não-lineares podem gerar ao se procurar seu mínimo global e, na verdade, se encontrar uma mínimo local. Sendo assim, nota-se que as funções não-lineares trazem em seu escopo uma complexidade adicional em comparação às funções lineares, visto que, a depender do chute inicial utilizado, o resultado da função pode convergir para valores diferentes.

Conforme deduzia a função objetivo, nota-se que se tratará de uma equação não-linear, o que enquadra a questão em um problema de otimização não-linear. Em relação às restrições, nota-se que apenas a restrição associada ao comprimento máximo do vaso é linear, as demais são funções também não-lineares. Como é possível notar na Tabela 5, funções não-lineares são bastante comuns em modelagem de processos químicos.

Segundo Biegler (2010), na resolução desse tipo de problema de Programação Não-linear (NLP), pode-se realizar algumas considerações de hipóteses com o intuito de se encontrar os limites das restrições, considerando-se um volume total fixo do vaso e com base em que esse volume irá gerar um limite de comprimento e diâmetro. O autor afirma que, para esse tipo de

Tabela 5 – Potência eletrolisador, fluxo, massa e volume de hidrogênio produzido

Processos/Sistemas	LP	MILP	QP	NLP	MINLP
Modelagem do Processo				X	X
Projeto e Síntese do Processo					
Trocadores de Calor	X	X		X	X
Trocadores de Massa	X	X		X	X
Separadores		X		X	X
Reatores	X			X	X
Fluxos				X	X
Operação do Processo					
Agendamento	X	X			X
Suprimentos	X	X			X
Otimização em Tempo Real	X		X	X	

Fonte: Biegler (2010)

aplicação, caso não se conheça o comprimento, existe a abordagem de se eliminar esse termo da equação para que o problema seja solucionável. Como foi observado e será evidenciado no Capítulo 4, se o comprimento não for deduzido de outras formas na equação, deve-se conhecer os seus limites para que as restrições tornem a solução possível.

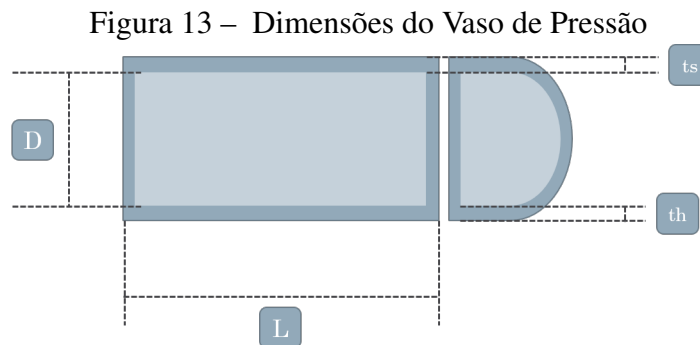


### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos para o trabalho em questão.

#### 3.1 Modelagem

Primeiramente, foi realizada uma revisão das equações encontradas em literatura, afim de que fosse utilizado um procedimento já respaldado e validado em diversos trabalhos, porém com a diferenciação de ser aplicado no contexto das variáveis pertinentes para o armazenamento de hidrogênio verde. Considerando o vaso de pressão como um cilindro com cabeças hemisféricas conforme evidenciado na Figura 13, com base na revisão bibliográfica apresentada na Secção (2.4), os volumes que dão base as equações são evidenciados nas Equações (3.1) e (3.2).



Fonte: Autor (2022)

$$V_{cas} = \pi D L t_{cas} = 2\pi R L t_{cas} \quad (3.1)$$

$$V_{cab} = \frac{\pi D^2}{2} t_{cab} = 2\pi R^2 t_{cab} \quad (3.2)$$

em que:

- $V_{cas}$ : Volume do casco  
 $V_{cab}$ : Volume da cabeça  
 $D$ : Diâmetro do casco  
 $R$ : Raio do casco  
 $L$ : Comprimento do casco  
 $t_{cas}$ : Espessura do casco  
 $t_{cab}$ : Espessura da cabeça

Por meio da análise do volume da Figura 13, as variáveis de decisão do problema são o Raio do casco ( $R$ ), o Comprimento do casco ( $L$ ), a Espessura do casco ( $t_{cas}$ ) e a Espessura da Cabeça ( $t_{cab}$ ).

Diante do exposto, uma das parcelas da função objetivo a ser minimizada se refere ao custo médio das placas e da modelagem do material, conforme a Equação 3.3. Observa-se que a equação do primeiro custo que compõe o vaso está associada além das variáveis de decisão, também à propriedades e custo do material de construção do vaso. Sendo assim, para a posterior análise de aplicação do modelo, pode-se realizar a testagem de diferentes materiais de construção.

$$CUSTO_1 = V_{cas} \times \rho \times C_{cas} + V_{cab} \times \rho \times C_{cab} \quad (3.3)$$

em que:

- $\rho$ : Densidade do material  
 $C_{cas}$ : Custo do material do casco  
 $C_{cab}$ : Custo do material da cabeça

Conforme evidenciado na Secção 2.4, além dos custos das placas, outros aspectos que devem ser levados em consideração são os custos com a soldagem. Os custos com a soldagem longitudinal estão representados na Equação (3.4), os custos com a soldagem circunferencial pela Equação (3.5) e o custo total de soldagem pela soma dessas duas equações mostrado em (3.6).

$$C_{SL} = V_L \times \rho \times C_s = \left( \pi \left( \frac{t_{cas}}{\cos(30)} \right)^2 \frac{60}{360} 2L \right) \times \rho \times C_s \quad (3.4)$$

$$C_{SC} = V_C \times \rho \times C_s = \left( \pi \left( \frac{t_{cas}}{\cos(30)} \right)^2 \frac{60}{360} 4R\pi \right) \times \rho \times C_s \quad (3.5)$$

$$CUSTO_2 = C_{SL} + C_{SC} \quad (3.6)$$

em que:

$C_{SL}$ : Custo soldagem longitudinal

$C_{SC}$ : Custo soldagem circunferencial

$V_L$ : Volume longitudinal

$V_C$ : Volume circunferencial

$C_s$ : Custo soldagem

Sendo assim, a função objetivo é evidenciada na equação (3.7).

$$\min C = CUSTO_1 + CUSTO_2 \quad (3.7)$$

em que:

$C$ : Custo Total

Em relação às restrições, tem-se que, conforme referenciado na Secção 2.4, as equações são formadas pelas limitações e relações que as variáveis de decisão devem cumprir. Sendo assim, as restrições estão relacionadas à comprimento máximo ( $L_{max}$ ) que um vaso de armazenamento de hidrogênio pode assumir, bem como volume máximo ( $V_{max}$ ) disponível em mercado e as relações que as espessuras das placas tem com a pressão ( $P$ ) interna do recipiente, dada pelas equações de espessura fornecidas na Boiler e Committee (2017). As restrições de comprimento, volume e espessura são evidenciadas nas Equações (3.8), (3.9), (3.10) e (3.11). Além da restrição de não negatividade mostradas na Equação (3.12).

$$L \leq L_{max} \rightarrow L_{max} - L \geq 0 \quad (3.8)$$

$$V \leq V_{max} \rightarrow V_{max} - V \geq 0 \quad (3.9)$$

$$t_{cas} = \frac{D}{2} \left( \exp \left[ \frac{P}{SE} \right] - 1 \right) \rightarrow t_{cas} - R \left( \exp \left[ \frac{P}{SE} \right] - 1 \right) \geq 0 \quad (3.10)$$

$$t_{cab} = \frac{D}{2} \left( \exp \left[ \frac{0.5P}{SE} \right] - 1 \right) \rightarrow t_{cab} - R \left( \exp \left[ \frac{0.5P}{SE} \right] - 1 \right) \geq 0 \quad (3.11)$$

$$L, R, t_{cas}, t_{cab} \geq 0 \quad (3.12)$$

em que:

$L_{max}$ : Comprimento máximo

$V_{max}$ : Volume máximo

$P$ : Pressão de operação

$S$ : Máxima tensão permitida - propriedade do material

$E$ : Eficiência de junção

Nota-se que, diferente das equações evidenciadas na Secção 2.4, as restrições relacionadas às espessuras mínimas do casco e da cabeça do vaso mudam, pois o fluido estudado nesse caso é o hidrogênio, no qual as pressões de operação interna do vaso são maiores, logo, as equações utilizadas devem ser aquelas apresentadas em Boiler e Committee (2019) e a divisão dois da secção VIII especifica as equações mais detalhadas no caso de pressões variando entre 20 e 68MPa, que será o *range* de pressões foco deste estudo.

Sendo assim, é importante ressaltar que o procedimento de modelagem realizado tem como base a modelagem apresentada na fundamentação teórica, ou seja se trata de uma abordagem adaptada para o caso do armazenamento do gás hidrogênio. As principais diferenças estão associadas ao uso de diferentes equações para o cálculo das espessuras mínimas do casco e da cabeça, e também do cálculo dos parâmetros das constantes das equações, que nesse caso vão estar associadas a diferentes materiais e o fluido abordado no trabalho em questão também se diferencia dos que foram abordados na literatura.

## 4 APLICAÇÃO MODELO

Neste capítulo, será evidenciado modo de aplicação da modelagem realizada no Capítulo 3. Nesse caso, aspectos de definição de parâmetros e limites das restrições serão discutidos e selecionados.

### 4.1 Parâmetros e Restrições

Com base na modelagem do problema realizada na Secção 3.1 do Capítulo 3, verifica-se que será necessário, para construção do problema de otimização, conhecer os parâmetros das equações que estão associadas ao fluido que será armazenado e ao material aplicado na construção vaso de armazenamento. Conforme estudado por Cumalioglu (2005), a performance do armazenamento vai depender de diversos parâmetros e eles podem ser classificados como propriedades do material, parâmetros geométricos e condições de operação do processo. Os parâmetros geométricos são o raio, o comprimento do tanque, a espessura das paredes e volume. As propriedades do material são a densidade dele, resistência e custo. Por fim, as condições de operação dizem respeito à capacidade de eletrólise, eficiência de conversão do eletrolisador, pressão e temperatura de operação. Conforme abordado no Capítulo 2, esses parâmetros vão depender diretamente do tipo de uso do hidrogênio e do porte da planta de produção do H<sub>2</sub>V.

#### 4.1.1 Parâmetros de Operação do Processo

Vasos de alta pressão, conforme classificação do código ASME, são os que suportam pressões acima de 68 MPa, são mais utilizada em aplicações veiculares, pois essa alta pressão permite que se obtenha um menor volume e, sendo assim, os vasos possam ser mais portáteis. Pressões intermediárias, entre 20 e 68 MPa, têm sua aplicação mais comumente na indústria, onde existe mais espaço para instalação e manutenção dos vasos. Segundo Klell (2010), comumente o gás hidrogênio em sua forma pura é armazenado com pressões entre 200 e 350 bar, porém, existem aplicações em altas pressões que podem chegar a 700 bar.

Cumalioglu (2005) afirma que, baseado em vasos de armazenamento de hidrogênio o, diâmetro do tanque deve ter um raio entre 25 e 55 cm e a espessura das paredes vai variar entre 1 e 2 cm. Em seu trabalho, o autor faz estudos para uma variação de pressões entre 10 e 100 MPa. Como mencionando na Secção 2.3.1, para o armazenamento de hidrogênio, existem no mercado vasos que suportam pressões internas a partir de 70 MPa e algumas opções com pressões internas

menores, como é o caso de 35 MPa. Por fim, o autor especifica que o vaso de pressão assume a temperatura ambiente de 25°C (298 K), na qual a relação de temperatura e pressão é levada em consideração pela equação do fator de compressibilidade. Outras restrições que autor leva em consideração são os limites de volume do sistema, que nesse caso são entre 0,062 e 0,111 m<sup>3</sup>, a massa do sistema (entre 55,6 e 83 kg) e uma massa fixa de 5 kg de hidrogênio. Nota-se que, nesse caso, os limites geométricos do projeto evidenciam se tratar de um tanque pequeno, voltado para aplicações veiculares.

Ainda sobre os aspectos das restrições dos parâmetros geométricos, Langels e Syrjä (2021) possuem uma abordagem para armazenamento que atenda demanda industrial. Como é possível observar na Tabela 10, para cada demanda de hidrogênio em kg, existem os parâmetros de armazenamento necessários para atendê-las.

Tabela 6 – Parâmetros geométricos para atender demandas industriais

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Demanda diária de H <sub>2</sub> [kg]	1309,20	4364,11	8728,22	13965,15
Volume de Armazenamento [m <sup>3</sup> ]	1456,32	4854,40	9708,81	15534,09
Comprimento do vaso [m]	17,02	25,4	32,03	37,47
Raio do vaso [m]	5,96	8,91	11,22	13,12
Diâmetro do vaso [m]	11,92	17,82	22,44	26,24
Relação L/D	1,43	1,43	1,43	1,43

Fonte: Langels e Syrjä (2021)

Como o objeto de estudo desse trabalho consiste em aplicar um método de otimização na modelagem realizada e o cenário consiste na análise do armazenamento de hidrogênio proveniente de eletrólise a partir de fontes renováveis de energia, os parâmetros devem partir da capacidade do eletrolisador de processar a energia vinda dessas fontes. Calado e Castro (2021) evidenciam que a quantidade de gás produzida por um eletrolisador, em um processo de funcionamento ligado por fontes de energias renováveis, pode ser calculada pela Equação 4.1, partindo da premissa que 1 kg de H<sub>2</sub> corresponde à 11,1 Nm<sup>3</sup> em condições normais de temperatura e pressão, considerando a conversão de horas para dia pelo fator 24. Ademais, o volume é dado pela Equação (4.2). Assim, é possível descobrir as dimensões aproximadas do vaso de armazenamento. A estimativa do fluxo de produção do gás hidrogênio partindo da capacidade do eletrolisador será mostrada próxima sub-seção.

$$M = \frac{24Q_n}{11,1} \rightarrow \left[ \frac{Nm^3}{h} \frac{24h}{1dia} \frac{1kg}{11,1Nm^3} \right] = \left[ \frac{kg}{dia} \right] \quad (4.1)$$

$$V = \frac{M}{\rho_f} = h\pi r^2 \rightarrow [kg] \left[ \frac{m^3}{kg} \right] = [m][m^2] = [m^3] \quad (4.2)$$

em que:

$M$ : Massa [kg/dia]

$Q_n$ : Fluxo de saída do eletrolizador [Nm<sup>3</sup>/h]

$V$ : Volume [m<sup>3</sup>/dia]

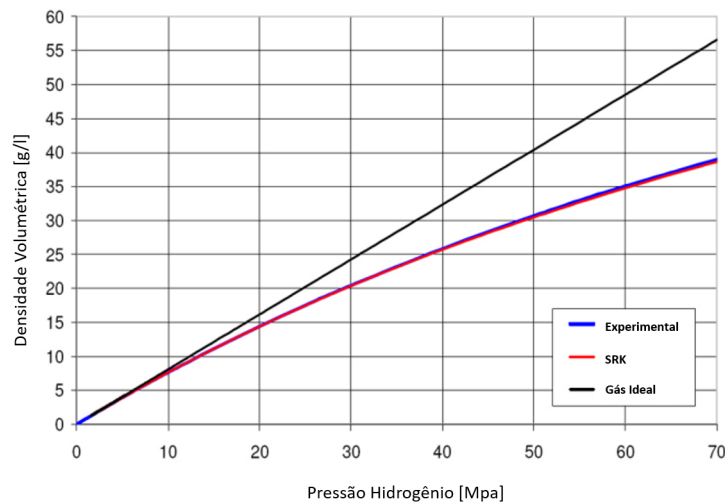
$\rho_f$ : Densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$h$ : Altura máxima do cilindro [m]

$r$ : Raio máximo do cilindro [m]

Para estimar o parâmetro  $\rho_f$  da Equação (4.2), é necessário conhecer a relação entre o Volume e a Pressão do fluido por meio de uma equação de estado. Na Figura 14, apresentam-se, para o hidrogênio a 300K, os valores de densidade volumétrica e sua relação com a pressão.

Figura 14 – Densidade volumétrica para o hidrogênio a 300 K em função da pressão, comparativo



Fonte: Veenstra e Hobein (2011)

Os pontos no gráfico que mais se assemelham aos dados experimentais mostrados na Figura 14 são gerados a partir da equação de Soave-Redlich-Kwong (SRK) em função da densidade dada por Elliott e Lira (2012) mostrada na Equação (4.5), com a relação para 1 mol de hidrogênio. Essa dedução e conferência dos valores mostrados no gráfico é importante, pois, no caso dos parâmetros do hidrogênio serem diferentes em relação à temperatura constante, vamos ter outros valores de pressão baseados no valor de densidade. Sendo assim a equação é obtida por meio da substituições das relações mostradas na Equação (4.4) na Equação de Soave-

Redlich-Kwong (SRK), que mostra a relação entre volume, pressão e temperatura, evidenciada na Equação (4.3).

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + Vb} \quad (4.3)$$

$$\rho_f = \frac{M}{V} = \frac{n}{V} \rightarrow V = \frac{M}{\rho_f} = \frac{n}{\rho_f} \quad (4.4)$$

$$P = \frac{RT\rho_f}{1-b\rho_f} - \frac{a\rho_f^2}{1+b\rho_f} \quad (4.5)$$

$$a = 0,42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (4.6)$$

$$a = 0,08664 \frac{RT_c}{P_c} \quad (4.7)$$

em que:

$a$ : Constante empírica  $a$

$b$ : Constante empírica  $b$

$R$ : Constante dos gases ideias [J/mol K]

$P_c$ : Pressão crítica do hidrogênio [Pa]

$T_c$ : Temperatura crítica do hidrogênio [K]

$\rho_f$ : Densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$T$ : Temperatura [K]

Utilizando essas equações, obtém-se uma forma de estimar as dimensões aproximadas do vaso de pressão de modo que, para a temperatura e pressão conhecidas, pode-se estimar o volume de gás que o vaso de pressão deve suportar, como será abordado a seguir. Monde *et al.* (2012), evidencia em seu trabalho que as temperaturas de vasos de pressão entre 35 e 70MPa podem variar em um intervalo de 20 e 85°C, no qual esse limite máximo pode ser alcançado em ambientes de temperaturas muito elevadas. Dessa forma, os limites estimados de volume para cada cenário serão calculados com base nesse mínimo e máximo de temperatura.



#### 4.1.2 Parâmetros Geométricos e de Construção do Vaso

Partindo do proposta na Subsecção anterior, Calado e Castro (2021) mostram que, para um caso onde existe um fluxo típico 5000 Nm<sup>3</sup>/h de hidrogênio, produzido por um eletrolisador com capacidade de 25 MW e um armazenamento sob uma pressão de 100 bar, poderia se obter, aplicando as equações deduzidas acima, o primeiro registro da Tabela 7 mostrada abaixo. Essa relação gera uma equação que para os demais valores, o autor afirma que é possível assumir uma variação linear para outras capacidades de eletrólise, pois isso é válido em amostras disponíveis no mercado. A equação pode ser vista na Equação (4.8). O autor evidencia ainda que, aplicando a Equação (4.2), obtém-se os valores aproximados de dimensões geométricas para cada cenário de capacidade do eletrolisador, como é possível observar na Tabela 8. A partir da mesma tabela, nota-se que, quando trabalhando com o range de potência entre 25 e 1000 MW, tem-se que os limites de raio do vaso está entre 9 e 30 metros e o limite de comprimento estão entre 6 e 20 metros.

$$Q_n = \left[ 5000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \left[ \frac{1}{25\text{MW}} \right] [\text{Capacidade Testada MW}] \rightarrow Q_n = 200[\text{Capacidade Testada}] \quad (4.8)$$

em que:

$Q_n$ : Fluxo de saída do eletrolisador [Nm<sup>3</sup>/h]

Tabela 7 – Potência eletrolisador, fluxo, massa e volume de hidrogênio produzido

Potência [MW]	Fluxo de H <sub>2</sub> [Nm <sup>3</sup> /h]	Massa de H <sub>2</sub> [ton/dia]	Volume de H <sub>2</sub> [m <sup>3</sup> /dia]
25	5.000	10,8	1.386
100	20.000	43,2	5.544
500	100.000	216	27.720
1000	200.000	432	55.440

Fonte: Calado e Castro (2021)

Nota-se, a partir das Tabelas 10 e 9, que para a obtenção das dimensões do vaso a partir do volume, foi levada em consideração uma relação comprimento sobre diâmetro. Essa relação pode ser superior a um se comprimento e diâmetro são iguais, menor que um se o diâmetro é maior que o comprimento, como é o caso da Tabela 9, ou maior que um no caso do diâmetro ser menor que o comprimento, como é o caso da Tabela 10. Langels e Syrjä (2021)

Tabela 8 – Limites de dimensões aproximadas para armazenamento do gás hidrogênio produzido

Potência [MW]	Volume de $H_2$ [m <sup>3</sup> /dia]	Raio do Vaso [m]	Comprimento do Vaso [m]
25	1.386	9	6
100	5.544	13	11
500	27.720	25	15
1000	55.440	30	20

Fonte: Calado e Castro (2021)

Tabela 9 – Limites de dimensões aproximadas para armazenamento do gás hidrogênio produzido

Volume de $H_2$ [m <sup>3</sup> /dia]	Diâmetro do Vaso [m]	Comprimento do Vaso [m]	Relação L/D
1.386	18	6	0,33
5.544	26	11	0,42
27.720	50	15	0,30
55.440	60	20	0,33

Fonte: Calado e Castro (2021)

mostram uma relação constante de 1,43 para todos os cenários. Levando em consideração outras literaturas, como é o caso da aplicação de Abiodun (2014), que realiza um estudo sobre os aspectos de do efeito da altura e raio do vaso de pressão e como esses aspectos se relacionam com a estabilidade e segurança do projeto, descobre-se que existe estabilidade em reatores que possuem até 16 metros de comprimento e 5,6 metros de raio, o que resulta também em uma relação comprimento sobre diâmetro de 1,43, considerando a margem de segurança de construção.

Em relação aos materiais utilizados na construção do vaso, conforme evidenciado por Klell (2010), os tanques para aplicações voltadas ao uso do hidrogênio são construídos normalmente com aço inoxidável e ligas de alumínio, por conta das propriedades difusivas do gás. Além disso, Jawad (2018) confirma que os principais materiais utilizados para construção de vasos de pressão são o alumínio, aço carbono, cobre, aço inoxidável e titânio. Cada material terá seu próprio custo por peso, densidade e máxima tensão permitida, essas variáveis são de relevância para a aplicação das equações deduzidas na Secção 2.4.1. As principais propriedades e parâmetros dos materiais que serão avaliados neste trabalho são evidenciados na Tabela 10.

Segundo Bigelow e Lewis (2018), o revestimento interno do vaso de pressão testado em seu trabalho funcionou bem com uma espessura de 0,12 centímetros para a vasão desejada no contexto aplicado, porém a espessura pode variar entre 0,051 e 0,15 centímetros. Para a camada externa metálica, os limites podem ser considerados os mesmos de NishidharBabu (2017), onde as espessuras têm seu limite entre 0,16 e 3,175 centímetros. Logo, nota-se que os limites das

Tabela 10 – Parâmetros geométricos para atender demandas industriais

Material	\$/lb	\$/kg	kg/m <sup>3</sup>	S (MPa)
Alumínio	2	4,41	2710	144,8
Aço carbono	0,8	1,76	7850	137,9
Cobre	8,5	18,7	8940	56,3
Aço inoxidável	2,7	5,95	8000	206,8

Fonte: Jawad (2018), Boiler e Committee (2017)

dimensões do vaso vão depender da capacidade do eletrolisador, com base no cenário que for estabelecido. Além disso, a segunda divisão da norma ASME define que a espessura máxima de parede deve ser 5.08 cm. Sendo assim, as variáveis, parâmetros e limites são evidenciados na Tabela 11. Com a análise da Tabela e dos valores estabelecidos, é possível notar que existem diversos parâmetros que dependem de outros, dessa forma, é possível realizar análises por meio da construção de cenários que serão abordados na Seção 4.2.

Tabela 11 – Variáveis, parâmetros e limites

Parâmetro	Valor
$R$	Dependente do Volume de Produção de H <sub>2</sub> /dia
$t_{max}$	0,16 cm - 5.08 cm
$t$	Dependente da Pressão Interna e do Material
$V_{H2}$	Dependente da Capacidade Diária do Eletrolisador
$m_{H2}$	Dependente da Capacidade Diária do Eletrolisado
$L_{max}$	Dependente do Volume de Produção de H <sub>2</sub> /dia
$L$	Dependente do Volume de Produção de H <sub>2</sub> /dia
Material do Vaso	Aço carbono, Alumínio, Cobre, Aço inox
$C_{cas}$	Dependente do material
$C_{cab}$	Dependente do material
$C_s$	Dependente do material
$\rho$	Dependente do material
$S_y$	Dependente do material
$P$	20 MPa - 70 MPa
$T$	293 - 358 K
$\rho_f$	Dependente da Pressão e Temperatura

Fonte: Autor (2022)

## 4.2 Construção de Cenários e Aplicação do Modelo

Para a construção de cenários, serão levados em consideração vetores, variando entre as possibilidades que os valores de pressão podem assumir, diferentes possíveis materiais aplicados na construção do vaso e diferentes capacidades de eletrolisador. A Tabela 12 mostra um exemplo dos cenários avaliados na aplicação do modelo. O Apêndice A evidencia todos os cenários avaliados e ao todo serão testados 704 cenários para otimização da construção do

vaso. Para um *range* de pressão indo de 20 até 68 MPa, capacidades do eletrolisador de 1, 10, 100 e 1000 MW e possibilidade dos materiais de construção do casco e da cabeça como sendo alumínio, aço carbono, cobre ou aço inoxidável.

Tabela 12 – Exemplo de cenários abordados no problema

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
0	20	1.0	Alumínio	Alumínio
1	20	1.0	Alumínio	Aço carbono
2	20	1.0	Alumínio	Cobre
3	20	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
4	20	1.0	Aço Carbono	Alumínio
5	20	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
6	20	1.0	Aço Carbono	Cobre
7	20	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
8	20	1.0	Cobre	Alumínio
9	20	1.0	Cobre	Aço carbono
10	20	1.0	Cobre	Cobre

Fonte: Autor (2022)

Os cenários serão testados utilizando a linguagem de programação Python e as bibliotecas Numpy, recomendada para computação científica, Pandas, para análise de dados e Pyomo, para modelagem e aplicação da otimização por meio do solver *ipopt*. Segundo Hart *et al.* (2017), a Pyomo permite a possibilidade de se trabalhar com otimização de funções não-lineares de forma adequada. Porém, deve-se estar atento para casos de problemas não-convexos, nos quais possam existir mínimos locais que tirem o foco do mínimo global da otimização, ou seja, a função terá diversas soluções ótimas dependendo do chute inicial. Sendo assim, como abordado e explicado no Capítulo 3, o ponto de chute inicial da função deve ser bem especificado, por isso a importância da aplicação de uma estratégia de inicialização do modelo. O solver apropriado para solução do modelo em questão deve lidar com funções do tipo não-lineares, sendo assim, Hart *et al.* (2017) recomenda utilizar o IPOPT, que é uma solução *open – source* para otimização não-linear e é utilizado em vários exemplos do seu trabalho. Os critérios de parada do solver foram estabelecidos como sendo o *default* oferecido pela função de solução.

Para a aplicação do Algoritmo 1, como mencionado anteriormente, foi utilizada a linguagem de programação Python, conforme evidenciado no exemplo da Figura 15 e o código completo pode ser avaliado no Apêndice B. A estrutura de aplicação do modelo segue a lógica da utilização de estruturas de loops aninhados para que os cenários possam ser testados em sua totalidade. Essas estruturas garantem que todas as possibilidades estão sendo testadas e retornam suas soluções. Em relação à estratégia de chute inicial das variáveis, foram utilizados os limites

---

**Algoritmo 1:** Passos de aplicação do modelo e solução
 

---

**Step 1:** Para especificação dos materiais de construção da cabeça e do casco, calcular as constantes da função objetivo conforme Equação (3.7).

**Step 2:** Para todo range de Pressão de 20 até 68 MPa calcular as constantes das restrições como nas Equações (3.10) e (3.11).

**Step 3:** Para as capacidades de eletrolisador de 1, 10, 100 e 1000 MW calcular limites geométricos máximos que o vaso deve assumir nas Restrições (3.8) e (3.9) para cumprir a demanda de H<sub>2</sub> diária conforme Equações (4.1), (4.2) e (4.3).

**Step 4:** Aplicar loop de estratégia de inicialização da função para todas um range entre os limites máximos e mínimos de comprimento, raio e espessura das paredes.

**Step 5:** Aplicar o solver *ipopt* para minimização da função objetivo (3.7) com base nas restrições (3.8), (3.9), (3.10) e (3.11).

---

máximos e mínimos estimados conforme equação de estado e definição de razão comprimento por diâmetro ótimo, realizando quatro chutes por variável dentro desse intervalo estabelecido para cada uma delas. A escolha da quantidade de tentativas iniciais foi estabelecida com base no tempo de retorno de cada teste, já que, conforme o número de tentativas iniciais aumenta, o tempo para retorno completo dos valores ótimos também aumenta, podendo se tornar um gargalo para finalizar os experimentos computacionais e ter resultados disponíveis para análise. Por fim, vale ressaltar que o vetor de chutes iniciais das variáveis eram composto de quatro elementos a cada *loop* de aplicação do modelo.

Figura 15 – Exemplo de aplicação do algoritmo do código em Python

```
def modelo_minimizacao(l_ini, r_ini, th_ini, ts_ini, C_11, C_12, C_21, C_22, Lmax, Vmax, Rmax, Lmin, Vmin, Rmin, ts_min, ts_max, th_min, th_max,
# Criar o modelo concreto
model = pyo.ConcreteModel(name="Pressure Vessel Model")
# Criar as variáveis
model.r = pyo.Var(initialize = r_ini, within = pyo.PositiveReals) # r -> raio
model.l = pyo.Var(initialize = l_ini, within = pyo.PositiveReals) # l -> comprimento
model.ts = pyo.Var(initialize = ts_ini, within = pyo.PositiveReals, bounds=(ts_min, ts_max)) # ts -> t_casco
model.th = pyo.Var(initialize = th_ini, within = pyo.PositiveReals, bounds=(th_min, th_max)) # th -> t_cabeça
# Definindo a função objetivo
def func_objetivo(modelo):
    obj = C_11*model.r*model.l*model.ts + C_12*(model.r**2)*model.th + C_21*(model.ts**2)*model.l + C_22*(model.ts**2)*model.r
```

Fonte: Autor (2022)

Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo serão analisados utilizando o pacote *dataprep* para visão e análise geral das variáveis, correlações e gráficos de interações. Além desta biblioteca, serão utilizadas também *Matplotlib* e *Seaborn* para geração de gráficos

e visualização dos dados, pandas para tabulação dos retornos ótimos e aplicação da técnica de *Feature Engineering* para conversão de valores e cálculos de outras variáveis a partir das variáveis ótimas retornadas pela solução do modelo, sendo possível gerar outras possibilidades de análises.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão abordados os principais resultados obtidos por meio da modelagem realizada no Capítulo 3, e aplicação do modelo conforme premissas postas no Capítulo 4 com o foco em atingir os objetivos especificados no Capítulo 1. Sendo assim, para melhor entendimento dos resultados, este capítulo será dividido em seções que mostram as análises dos valores ótimos baseados nas quatro capacidades de eletrólise (1, 10, 100 e 1000 MW) que serão avaliadas aqui de forma classificativa. Para cada capacidade de eletrólise, serão levantados aspectos relacionados aos materiais de construção do vaso, às pressões de operação e aos valores ótimos de dimensão do vaso. Além disso, para cada análise serão levados em consideração os aspectos de variáveis numéricas e categóricas. Vale ressaltar que, o universo de análises apresentadas neste capítulo está relacionado apenas às soluções retornadas como possíveis pela aplicação do modelo. Para alguns chutes iniciais, o modelo retornava a mensagem conforme evidenciada na Figura 16. Ou seja, para alguns chutes iniciais, o modelo não tinha solução.

Figura 16 – Retorno do modelo em caso de retornos sem solução

```
WARNING:pyomo.core>Loading a SolverResults object with a warning status into model.name="Pressure Vassel Model";
- termination condition: infeasible
- message from solver: Ipopt 3.12.13\x3a Converged to a locally infeasible point. Problem may be infeasible.
```

Fonte: Autor (2022)

Para a análise dos resultados, serão utilizados princípios da Análise Exploratória de Dados (EDA), presando por elementos de categorização de variáveis, tabulação dos dados e artefatos estatísticos, como medidas de tendência central, análise de distribuições e correlações. Esses aspectos vão permitir encontrar as principais características dos resultados, garantindo que as hipóteses estabelecidas para a construção do modelo foram cumpridas e os resultados obtidos têm validade com o modelo matemático construído no Capítulo 3, que foi respaldado por toda a fundamentação teórica destacada no Capítulo 2. Esses artifícios serão utilizados para análise de aspectos de diferentes possibilidade de armazenamento, pressões de operação, custo total do projeto e segurança, que são tópicos que compõem o objetivo geral do trabalho.

A análise de medidas de dispersão, segundo Costa (2010), é amplamente utilizada no entendimento da dispersão dos dados analisados em torno da média. Ou seja, com a análise dessas medidas, é possível entender se os resultados do modelo possuem um grau mais homogêneo ou heterogêneo. Essas medidas podem ser classificadas como absolutas, quando tratamos de desvio padrão e variância, ou relativas, no caso da análise do coeficiente de variação. Para análise do coeficiente de variação de Pearson, podem-se considerar os intervalos evidenciados na Tabela 13.

Varição maiores que 30% vão indicar que a média para aquele conjunto não é significativa.

Tabela 13 – Análise de coeficiente de variação de Pearson

Coeficiente de Variação (CV)	Conclusão
CV < 15%	Dispersão Baixa
< 15% < CV < 30%	Dispersão Média
CV > 30%	Dispersão Alta

Fonte: Costa (2010)

A análise de interação mostra a relação entre duas variáveis por meio da utilização do gráfico de dispersão e é bastante utilizada para conhecimento dos aspectos de tendências entre duas variáveis. Outra análise que será utilizada é a análise de correlação, que descreve a medida de força de associação entre duas variáveis e a força direção dessa relação. Nesse caso, os coeficientes irão variar no intervalo de -1 até +1, onde os extremos evidenciam relações mais fortes, sejam elas positivas, no caso do +1 ou negativa, no caso do -1. Será abordada a análise bivariada da correlação de Pearson, já que, segundo Filho (2009) a análise da Tabela 14 pode ser utilizada para avaliação da força da correlação. Essa técnica assume uma correlação linear entre as variáveis e dará noção de quais variáveis estão mais correlacionadas. Apesar disso, deve-se estar atento às diferenças entre correlação e causalidade, como será discutido ainda neste Capítulo.

Tabela 14 – Análise de coeficiente da correlação de Pearson

Coeficiente de Correlação	Força e Direção da Correlação
-1.0	Perfeita Negativa
-0.8	Forte Negativa
-0.5	Moderada Negativa
-0.2	Fraca Negativa
0.0	Sem correlação
+0.2	Fraca Positiva
+0.5	Moderada Positiva
+0.8	Forte Positiva
+1.0	Perfeita Positiva

Fonte: Autor (2022)

## 5.1 Resultados para Capacidade de 1 MW

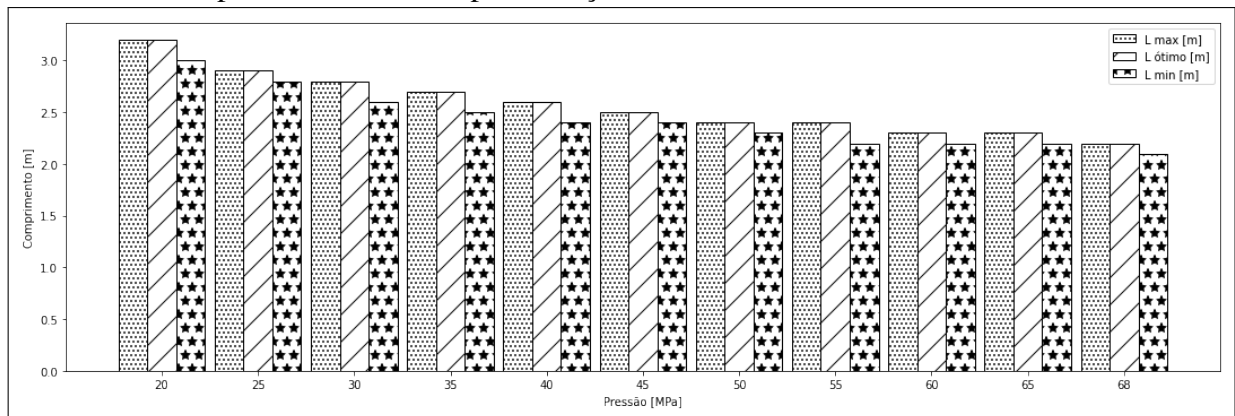
### 5.1.1 Análise das variáveis numéricas de decisão

Para a análise das variáveis numéricas, será dado foco nas variáveis de decisão estabelecidas no problema de otimização, que são: o comprimento, raio, espessuras do casco e da



cabeça. Os resultados para a capacidade de 1 MW evidenciam que os retornos de comprimento ótimo e comprimento limite máximo possuem distribuições similares, ou seja, o comprimento ótimo tendeu a alcançar o limite máximo fornecido como limite no modelo, como mostrado na Figura 17. Logo, como é possível observar na Tabela 15, essas duas variáveis tiveram, para as diferentes pressões testadas, um valor máximo de 3,15 metros e mínimo de 2,25 metros, os quais poderiam ser considerados valores factíveis para o mercado, conforme amplamente pontuado no Capítulo 2. Além disso, nota-se que o desvio padrão, que mede o grau de variação dos dados, é bastante pequeno, mostrando que os valores para as soluções aplicáveis do modelo retornaram para pontos bem próximos e o coeficiente de variação abaixo de 11% confirma isso.

Figura 17 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo



Fonte: Autor (2022).

Tabela 15 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de comprimento ótimo

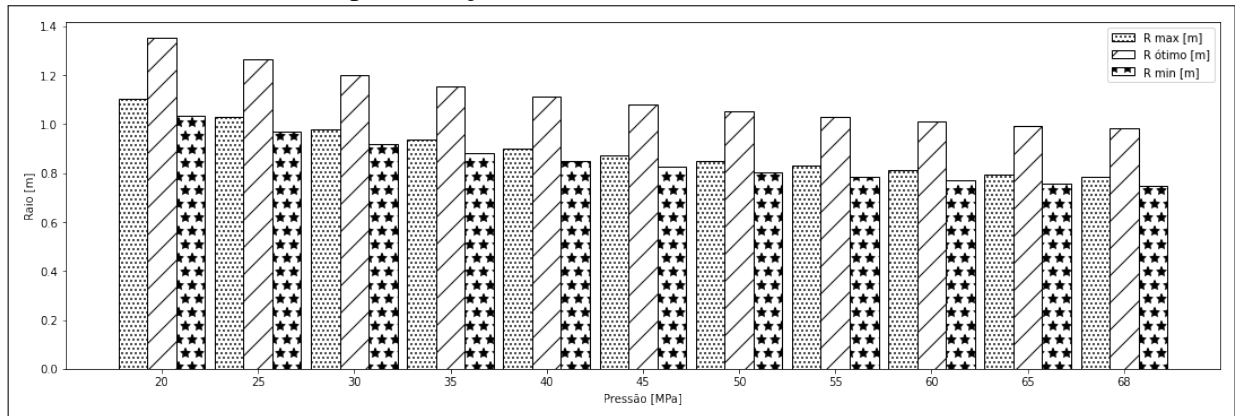
Medidas Descritivas e de Quartis	Valor
Mínimo	2,25
Mediana	2,50
Máximo	3,15
Média	2,57
Desvio Padrão	0,28
Variância	0,08
Coeficiente de Variação	0,11

Fonte: Autor (2022)

Em relação à variável raio do vaso e seus retornos ótimos, como é possível observar na Figura 18, para esse caso tive-se que os valores foram superiores até mesmo ao limite de raio máximo que foi estimado com base nos limites de volume de gás que o vaso de pressão deveria comportar. Esse se torna um comportamento aceitável visto que, para a construção do modelo

utilizando linguagem Python, não foram estabelecidos limites mínimo e máximo de raio e os limites considerados mínimos e máximos mostrados na figura seriam apenas estimativas com base no que foi explicado no Capítulo 4. Ou seja, o valor ótimo retornado está relacionado às condições possível para a aplicação do modelo e não necessariamente aos valores estimados inicialmente. As principais medidas de descrição e quartis dos valores de raio ótimo estão listadas na Tabela 16. Para esse caso, os limites do raio para as diferentes pressões testadas estão entre 0,98 e 1,35 metros, o que gera diâmetros de 1,96 e 2,70 metros, respectivamente. Novamente, as medidas de dispersão da variável indicam uma homogeneidade dos retornos ótimos.

Figura 18 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimados e o valor ótimo de raio retornado pela solução do modelo



Fonte: Autor (2022).

Tabela 16 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de raio ótimo

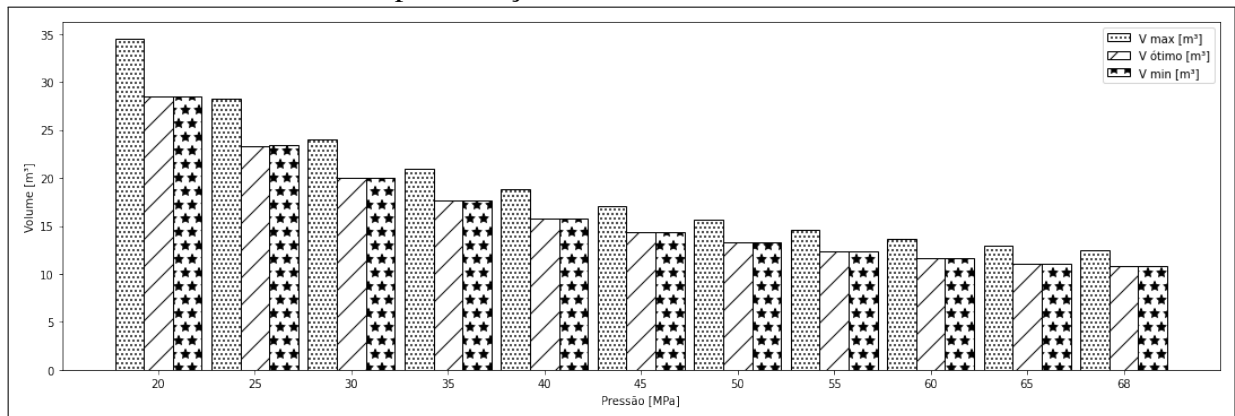
Medidas Descritivas e de Quartis	Valor
Mínimo	0,98
Mediana	1,08
Máximo	1,35
Média	1,11
Desvio Padrão	0,28
Variância	0,01
Coefficiente de Variação	0,10

Fonte: Autor (2022)

Outra variável importante de análise, que, apesar de não ser considerada diretamente uma variável de decisão pelo modelo, é gerada a partir delas, é o volume ótimo. Como é possível notar na Figura 19, outro aspecto de comparação dos retornos das variáveis ótimas está relacionado à similaridade de distribuição do volume ótimo alcançado e do limite de volume mínimo estabelecido pelos critérios de segurança da temperatura mínima e máxima que o interior

do tanque poderia assumir. Esse comportamento está intimamente ligado à restrição de volume e ao aspecto de minimização do problema pois, menores volumes, de forma lógica, irão trazer, por consequência, um menor custo de projeto. As principais medidas de descrição e dispersão dos valores de volume ótimo estão listadas na Tabela 17. Nota-se que o volume pode assumir valores entre 10,78 e 28,46 metros cúbicos e que, para essa variável, as medidas de dispersão mostram que os valores não são homogêneos.

Figura 19 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimados e o valor ótimo de volume retornado pela solução do modelo



Fonte: Autor (2022).

Tabela 17 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de volume ótimo

Medidas Descritivas e de Quartis	Valor
Mínimo	10,78
Mediana	14,42
Máximo	28,46
Média	16,27
Desvio Padrão	5,40
Variância	29,14
Coefficiente de Variação	0,33

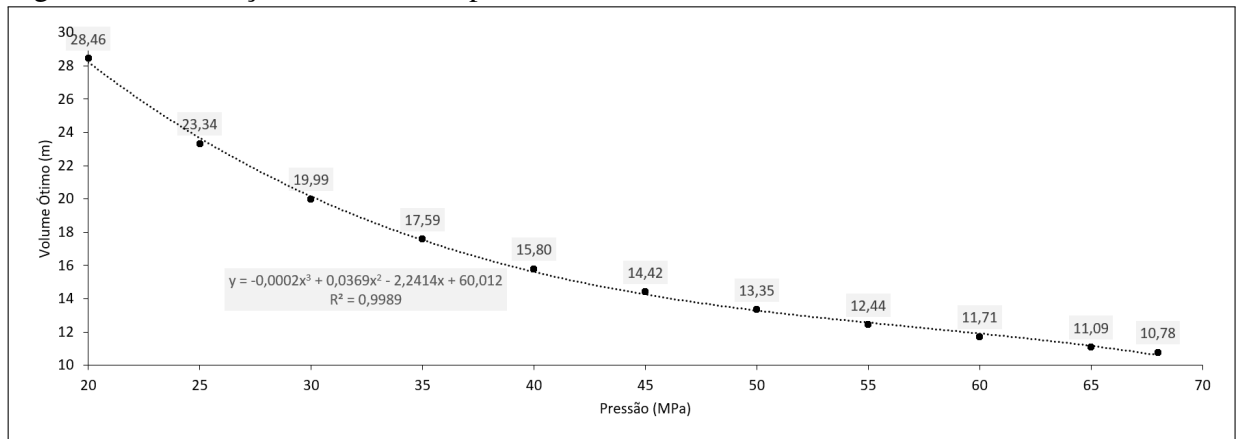
Fonte: Autor (2022)

Por fim, as variáveis de decisão da espessura do casco e da cabeça possuem um aspecto notável de terem se mantido constantes para todos os retornos de soluções possíveis do modelo, assumindo o valor máximo de 0,051 m (2 in) em todos os cenários. Diferente das demais variáveis, estas possuíram limites máximos e mínimos estabelecidos na construção do modelo, visto que a norma ASME estabelece esses limites de 0,0016 e 0,051 metros conforme evidenciado no Capítulo 2.

Iniciando o entendimento de como os retornos das variáveis de decisão se relacionam

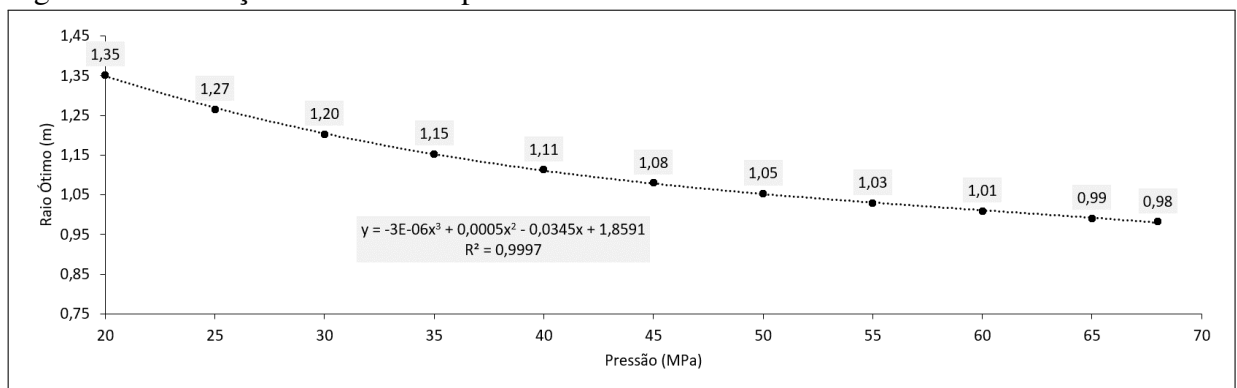
com as pressões analisadas, conforme estabelecido nas Figuras 51, 21 e 20, foi verificado que, com base na análise de interação por meio do uso do gráfico de dispersão, as variáveis demonstraram um comportamento já esperado, realizando uma boa validação do modelo. Pois, quanto maior a pressão no interior do vaso, menor serão o comprimento ótimo, o raio e, por consequência, o volume, sendo esse comportamento já esperado de acordo com o comportamento da pressão versus volume de gases no geral. Por fim, é possível notar, observando de forma simples, que as linhas de tendência demonstram se ajustar melhor a uma equação polinomial de terceiro grau. Em uma aplicação adequada, as equações podem ser utilizadas para prever outros valores ótimos, com base em uma pressão em um cenário que esteja dentro das premissas e hipóteses definidas nesse trabalho.

Figura 20 – Interação das variáveis pressão e volume ótimo



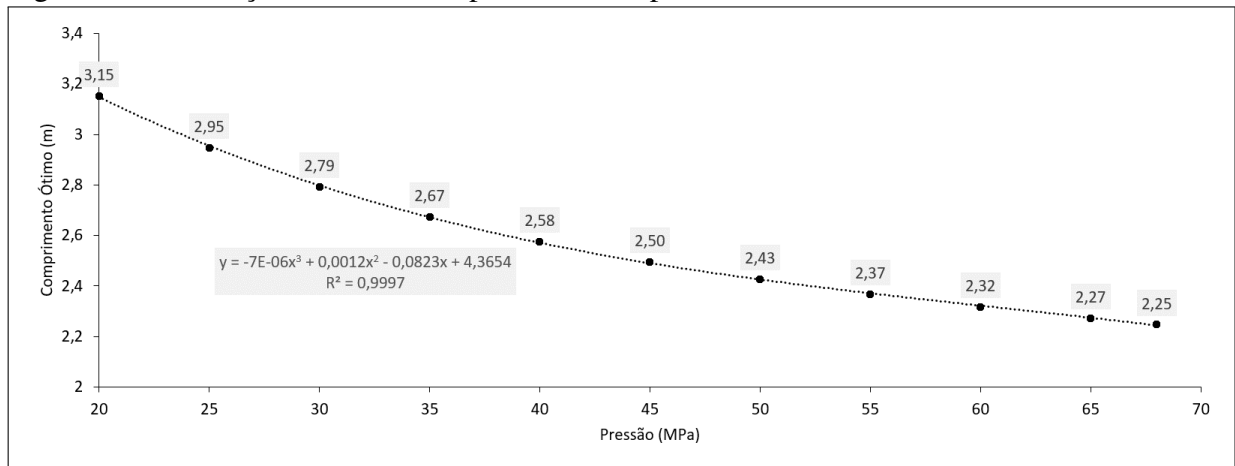
Fonte: Autor (2022).

Figura 21 – Interação das variáveis pressão e raio ótimo



Fonte: Autor (2022).

Figura 22 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo



Fonte: Autor (2022).

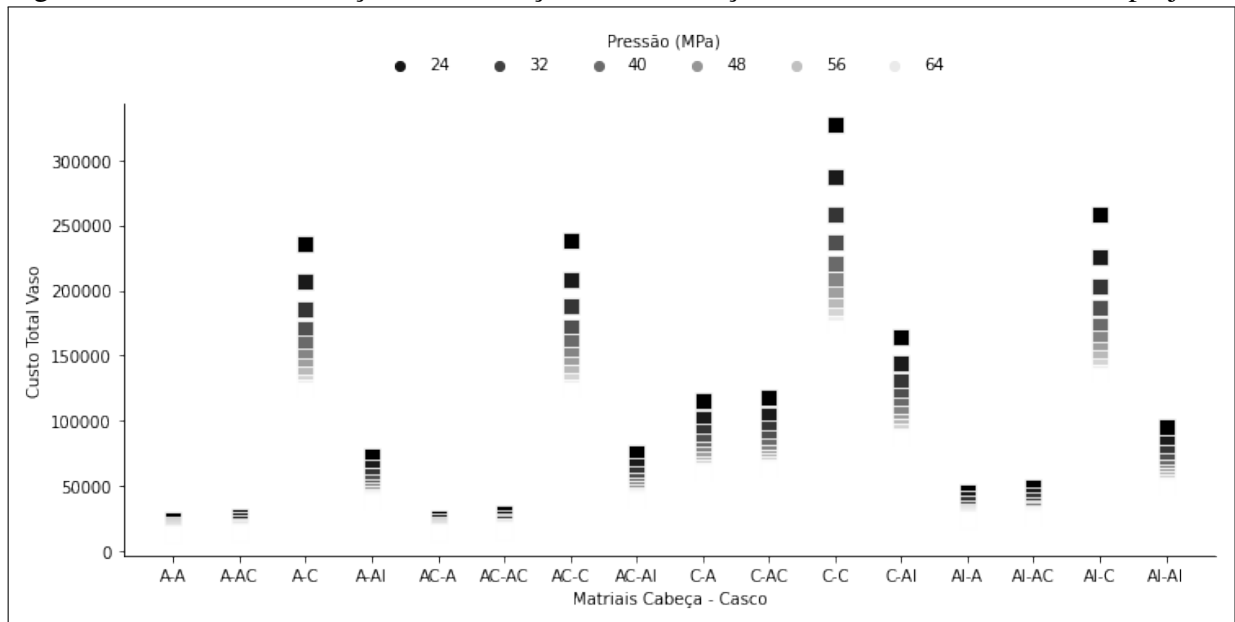
### 5.1.2 Análise das variáveis categóricas do problema

A principal análise de variáveis categóricas está associada aos pontos de combinação dos materiais de construção do casco e cabeça do vaso de pressão. Como é possível observar no Gráfico 52, os materiais alumínio (A), aço carbono (AC), aço inox (AI) e cobre (C) têm influência direta no custo do projeto e, como todas as restrições estão sendo respeitadas, pode-se selecionar a combinação de materiais que sejam mais barata, porém, devem-se levar em consideração aspectos de segurança e disponibilidade dos arranjos no mercado. Nota-se que, para algumas combinações e pressões internas, o custo total toma proporções altas, com valores acima de 100K, o que deve ser considerado em relação aos aspectos econômicos do projeto. Como se trata de um projeto de escala menor, a relação entre o custo do armazenamento e o custo total do projeto de instalação da planta verde pode ser significativa na escolha de um projeto de vaso que tenha um custo-benefício mais adequado à realidade do projeto.

### 5.1.3 Análise de correlação

Com o intuito de sumarizar todas as discussões realizadas anteriormente, em relação às análises de correlações entre as variáveis utilizadas no modelo, também é possível encontrar e confirmar aspectos que já eram esperados pelas características do problema abordado. Sendo possível confirmar os aspectos abordados para as variáveis de decisão, na Figura 53, já que essas variáveis (comprimento, raio e volume) têm uma tendência de relação inversa com a pressão. Além disso, essa análise consegue gerar uma perspectiva do que influenciou mais nos valores da função objetivo, que diz respeito à minimização do custo total para construção do vaso.

Figura 23 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto



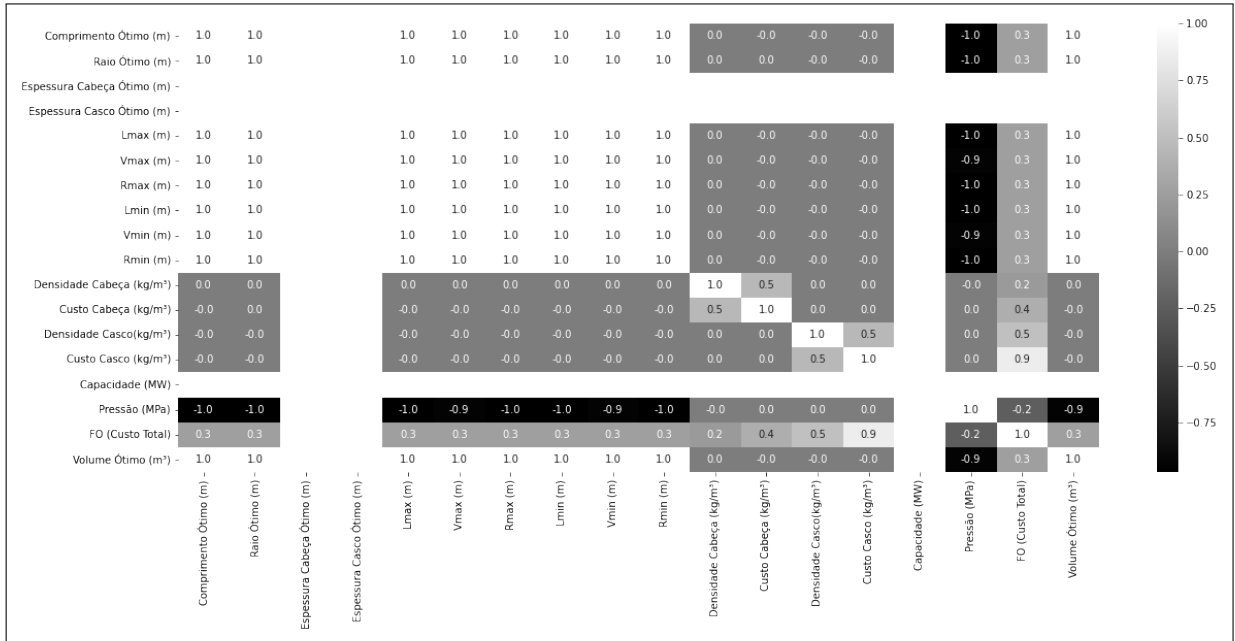
Fonte: Autor (2022).

Utilizando a correlação de Pearson, que assume uma possível relação linear entre as variáveis, é possível notar que a variável que mais influencia no custo do total do projeto é o custo do casco, tendo uma relação forte de 0,9. Ou seja, quanto maior o custo do casco, maior o custo total do projeto.

Nesse caso, nota-se também que a correlação entre a pressão e o custo total, como esperado, é negativa, porém não é tão forte, podendo ser considerada pela análise mostrada na Tabela 14 como negativa fraca. Podendo evidenciar que os parâmetros dos materiais de construção, como esperado, vão influenciar mais nos aspectos econômicos do projeto, e os aspectos de operação influenciam mais nas variáveis de decisão relacionadas às dimensões do vaso de pressão e, por consequência, às variáveis de operação.

Para uma análise de correlação, deve-se atentar aos aspectos que diferem os conceitos de correlação e causalidade. Segundo Trentz (2021), a correlação como explicada no início deste capítulo diz respeito à mensuração da relação entre duas variáveis. Porém, pode-se ou não existir causalidade entre as mesmas variáveis. A causalidade refere-se a conseguir associar relações de causa e efeito na análise, ou seja, causalidade implica em correlação, porém o contrário não é verdadeiro. Portanto, deve-se notar que todo efeito antes deve possuir uma causa. Como o escopo deste trabalho lida com um universo restrito de análise, ou seja, o que está sendo analisado é o sistema do vaso de pressão, pode-se afirmar que as correlações implicam sim em causalidade. Muito desse aspecto também é associado por estar sendo lidado com uma análise de conceitos

Figura 24 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 1 MW



Fonte: Autor (2022).

exatos e quantitativos, e não qualitativos.

## 5.2 Resultados Projeto Final

### 5.2.1 Análise geral das diferentes capacidades testadas

Para as demais capacidades de eletrolisadores, os aspectos das análises e discussões realizadas na Seção 5.1 se mantêm. A comparação das medidas descritivas de cada variável ótima para cada capacidade testada é evidenciada nas Tabelas 18, 19 e 20. Sendo possível notar que, para fins de referência, os valores de comprimento e raio ótimo crescem por um fator multiplicativo de aproximadamente dois, enquanto o volume cresce em um fator de dez. Essa ponderação evidencia a validade do comportamento próximo ao linear, que pode ser realizado com as capacidades e foi utilizado como artifício no Capítulo 4 para gerar a estimativa de valores de chute inicial de aplicação do modelo.

Como é possível notar nas Tabelas 25, 26, 27 e 28, a média dos valores ótimos e de custo total do projeto tomam proporções ainda maiores conforme se aumenta a capacidade de eletrólise da planta. Isso influencia em aspectos econômicos de decisão do projeto, já que, para capacidades maiores, pode fazer mais sentido que sejam instalados vários vasos de armazenamento do que somente um com dimensões que não sejam usualmente aplicadas na indústria e disponíveis no mercado. Outro ponto que se observa está relacionado à diferença

Tabela 18 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de comprimento ótimo

Medidas Descritivas e de Quartis	1 MW	10 MW	100 MW	1000 MW
Mínimo	2,25	4,84	10,43	22,48
Mediana	2,50	5,37	11,58	24,95
Máximo	3,15	6,79	14,63	31,52
Média	2,57	5,54	11,93	25,70
Desvio Padrão	0,28	0,61	1,31	2,81
Variância	0,08	0,37	1,70	7,91
Coefficiente de Variação	0,11	0,11	0,11	0,11

Fonte: Autor (2022)

Tabela 19 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de raio ótimo

Medidas Descritivas e de Quartis	1 MW	10 MW	100 MW	1000 MW
Mínimo	0,98	2,11	4,56	9,82
Mediana	1,08	2,33	5,01	10,80
Máximo	1,35	2,91	6,23	13,52
Média	1,11	2,40	5,16	11,12
Desvio Padrão	0,11	0,25	0,53	1,15
Variância	0,01	0,06	0,29	1,32
Coefficiente de Variação	0,10	0,10	0,10	0,10

Fonte: Autor (2022)

Tabela 20 – Medidas Descritivas e Quartis da variável de volume ótimo

Medidas Descritivas e de Quartis	1 MW	10 MW	100 MW	1000 MW
Mínimo	10,78	107,70	1076,60	10764,60
Mediana	14,42	144,22	1442,68	14428,71
Máximo	28,46	284,60	2847,38	28466,29
Média	16,23	162,67	1626,84	16268,88
Desvio Padrão	5,40	54,01	540,26	5401,19
Variância	29,14	2917,22	291880,93	$2,92 \times 10^7$
Coefficiente de Variação	0,33	0,33	0,33	0,33

Fonte: Autor (2022)

dos valores obtidos ao aumentar a pressão, já que a diferença de um valor para outro diminui conforme a pressão aumenta, ou seja, o decaimento da curva conforme a pressão aumenta evidencia um comportamento de decaimento exponencial. Pode-se concluir portanto que, em algum ponto da testagem dos valores ótimos, para as condições testadas nesse trabalho, não faria mais sentido aumentar tanto a pressão, pois o volume iria variar pouco se comparado à tentativa anterior, existindo uma espécie de estabilização de valores ótimos nesses pontos.



Figura 25 – Relação capacidade, pressão e média do volume ótimo [m<sup>3</sup>]

Pressão (Mpa)	Capacidade (MW)			
	1	10	100	1000
20	28	285	2.847	28.466
25	23	234	2.335	23.349
30	20	200	1.997	19.974
35	18	176	1.759	17.586
40	16	158	1.581	15.807
45	14	144	1.443	14.429
50	13	133	1.333	13.335
55	12	124	1.245	12.447
60	12	117	1.171	11.709
65	11	111	1.109	11.091
68	11	108	1.077	10.765

Fonte: Autor (2022).

Figura 26 – Relação capacidade, pressão e média do comprimento ótimo [m]

Pressão (Mpa)	Capacidade (MW)			
	1	10	100	1000
20	3,15	6,79	14,63	31,53
25	2,95	6,35	13,68	29,47
30	2,79	6,02	12,97	27,94
35	2,67	5,76	12,41	26,74
40	2,58	5,55	11,96	25,76
45	2,50	5,38	11,58	24,95
50	2,43	5,23	11,26	24,27
55	2,37	5,10	10,99	23,68
60	2,32	4,99	10,76	23,17
65	2,27	4,90	10,55	22,73
68	2,25	4,84	10,44	22,48

Fonte: Autor (2022).

Figura 27 – Relação capacidade, pressão e média do raio ótimo [m]

Pressão (Mpa)	Capacidade (MW)			
	1	10	100	1000
20	1,35	2,91	6,28	13,52
25	1,27	2,73	5,88	12,66
30	1,20	2,59	5,58	12,03
35	1,15	2,48	5,35	11,53
40	1,11	2,40	5,17	11,13
45	1,08	2,33	5,01	10,80
50	1,05	2,27	4,89	10,53
55	1,03	2,22	4,78	10,29
60	1,01	2,17	4,68	10,09
65	0,99	2,14	4,60	9,91
68	0,98	2,12	4,56	9,82

Fonte: Autor (2022).

Figura 28 – Relação capacidade, pressão e média do custo total da construção do vaso [\\$]

Pressão (Mpa)	Capacidade (MW)			
	1	10	100	1000
20	118.761	548.611	2.541.499	11.782.576
25	104.062	480.714	2.225.761	10.320.399
30	93.838	433.138	2.004.723	9.295.523
35	86.172	397.680	1.841.168	8.535.195
40	80.214	370.194	1.713.817	7.944.980
45	75.456	348.169	1.611.905	7.472.586
50	71.636	330.312	1.528.736	7.086.573
55	68.352	315.300	1.459.457	6.765.277
60	65.639	302.617	1.400.482	6.492.371
65	63.280	291.754	1.350.173	6.258.555
68	62.060	286.077	1.323.434	6.133.631

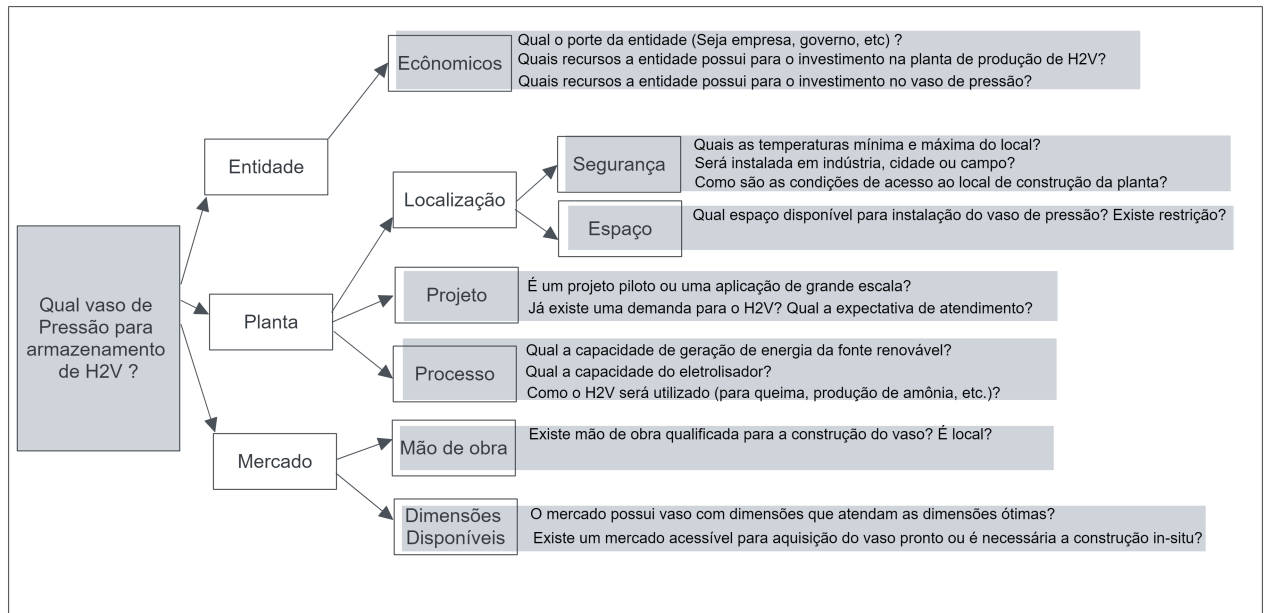
Fonte: Autor (2022).

### 5.2.2 Escolha do vaso de pressão para aplicação na produção de H<sub>2</sub>V

A escolha do vaso de pressão se trata de um problema adicional ao de testar diversos cenários com a aplicação e otimização do modelo matemático que foi abordado neste estudo, pois se trata de um problema que irá depender de outros aspectos, como porte da planta, capacidade, localização, porte da empresa, entre outros. Para isso, neste trabalho será utilizada a abordagem de criação de estruturas exaustivas de solução, pois essas estruturas promovem uma abordagem de onde deve ser o foco para resolução do problema que, nesse caso, será a escolha de um vaso de pressão adequado para a aplicação na produção de H<sub>2</sub>V. Essas abordagens são amplamente conhecidas por sua utilização em empresas de consultoria como McKinsey, sendo nomeadas de estruturas *Mutually – Exclusive – Collectively – Exhaustive* (MECE), conforme citado por Rasiel (1999). Para aplicação dessas estruturas, são criadas estruturas de "árvores" que permitem segmentar o problema na forma de processo, conceitos, segmentação ou termos algébricos, conforme explicado por Nogueira (2017). A estrutura desenhada para o problema foco do trabalho em questão é mostrada na Figura 29.

Sendo assim, para abordagem do problema de seleção de vaso de pressão para armazenamento de H<sub>2</sub>V, a árvore será dividida em aspectos como entidade, que diz respeito a quem é o interessado pelo projeto da planta, se é uma empresa ou governo e quais são os aspectos econômicos dessa entidade, como porte, faturamento e recursos dedicados ao projeto. Aspectos relacionados à planta e o seu projeto, como qual será a localização para instalação do vaso, se existe restrição de espaço e se os aspectos de segurança precisam se adequar a alguma realidade não pensada inicialmente. Em relação à planta, se é um projeto em larga escala, ou um projeto piloto, quais são as capacidades do projeto, quanto de volume de gás o vaso de pressão

Figura 29 – Estrutura de Solução



Fonte: Autor (2022).

deve suportar e por quanto tempo. Em relação ao mercado, devem ser levados em consideração aspectos como modelos de vaso de pressão disponíveis e mão-de-obra habilitada.

Diante disso, é possível observar que responder a essas perguntas, ou outras que possam surgir, e retornar a esses questionamentos de forma exaustiva até que todos tenham sido delimitados, traz uma abordagem que resulta na solução para a pergunta principal, sobre qual vaso de pressão deve ser escolhido para a etapa de armazenamento da planta de geração de hidrogênio verde. Mesmo tendo testado diversos cenários e obtido retornos ótimos para cada um deles, a escolha final está relacionada a muitas outras variáveis que não eram do escopo do estudo em questão. Logo, um estudo das variáveis e conceitos evidenciados na Figura 29 devem ser realizados, em complemento, pelas partes interessadas no projeto antes que uma recomendação de modelo de vaso de pressão possa ser diretamente feita para o armazenamento de H<sub>2</sub>V.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho em questão foi desenvolvido para cumprir os objetivos gerais e específicos que foram estabelecidos no Capítulo 1. Essas metas pautaram o trabalho com o foco da construção de um modelo matemático que representasse aspectos do armazenamento do gás hidrogênio e possibilitasse o encontro de dimensões ótimas do vaso, de forma que o custo total do projeto fosse minimizado. Com o modelo construído, o ponto de partida da aplicação deste foi estabelecer capacidades de eletrólise de um eletrolisador da planta de produção de  $H_2V$  e testar diversos cenários, levando em consideração diferentes condições de operação, materiais de construção da estrutura do vaso, englobando aspectos econômicos do projeto e de segurança.

Para elaboração do estudo, foram levantadas diversas possibilidades de armazenamento do  $H_2V$ , e soluções ótimas retornadas para cada cenário de análise foram amplamente discutidas no Capítulo 5. Diante dos resultados obtidos, foram determinadas soluções ótimas que podem se adequar e responder questões de projeto e instalação da etapa de armazenamento do gás hidrogênio em uma planta verde. Esses fatores trouxeram uma perspectiva de validação do modelo matemático que foi construído, o que pode ser útil para aplicação em outros cenários e estimativas para estudos que envolvam essa etapa de armazenamento de  $H_2V$ .

O objetivo não era trazer um único valor ótimo e tratá-lo como verdadeiro para todos os cenários desse tipo de projeto, mas sim, levantar diversos aspectos das variáveis e fomentar a discussão acerca dos cenários estabelecidos, bem como servir de introdução para construção de estudos mais complexos acerca do tema, visto que algumas hipóteses estabelecidas para o recorte apresentado nesse trabalho podem não ser tão aplicáveis em um contexto real. Por exemplo, o tratamento do sistema como estacionário, pois sabe-se que muitos sistemas reais não operam nesse contexto, mas sim em contextos transientes, com balanços mais robustos para as variáveis de operação.

Outros estudos gerados a partir deste podem estar relacionados a teste de outros métodos de otimização para fins comparativos como, por exemplo, Algoritmos Genéticos. Outras possibilidades são os testes de outros formatos de tanques de armazenamento como, por exemplo, o formato esférico, que já vem sendo utilizado amplamente para o armazenamento de diversos gases industriais. Essas outras abordagens dão chance de comparação de cenário e melhor adequação da solução ao projeto analisado.

Por fim, espera-se que a seleção de um vaso de pressão para o contexto apresentado aqui seja realizada respondendo as perguntas da estrutura MECE. Bem como, realizar um maior

aprofundamento na estrutura, por meio do desenvolvimento de hipóteses para cada questão, adequação do modelo conforme as novas hipóteses forem estabelecidas e, por fim, reunir dados que respaldem a solução baseada no cenário, utilizando-se de informações que se adéquem a cada contexto de projeto.

Além disso, o tema em questão se torna de grande relevância para a atuação do engenheiro químico na indústria visto que, segundo Towler e Sinnott (2007), muitas vezes o profissional possui o papel de analisar e especificar informações base de projeto. Isso ocorre pois as restrições, variáveis de operação e construção do vaso de pressão tem um impacto direto em aspectos do processo analisado. Sendo assim, outro aspecto interessante do estudo abordado está relacionado a agregar conhecimento sobre o processo de geração de hidrogênio por rotas verdes, que constitui um tema de grande relevância em aspectos de prospecção do futuro da indústria.

## REFERÊNCIAS

- ABIODUN, O. Assessing the design effect of pressure vessel height and radius on reactor stability and safety. v. 4, p. 19–33, 09 2014.
- ARNOLD, K.; STEWART, M. Mechanical design of pressure vessels. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2008. p. 316–350. ISBN 9780750678537.
- AZAD, S. K.; HASANÇEBI, O.; EROL, O. Evaluating efficiency of big-bang big-crunch algorithm in benchmark engineering optimization problems. **International Journal of Optimization in Civil Engineering**, v. 1, p. 495–505, 01 2011.
- BELKOURCHIA, Y.; AZRAR, L.; ES-SADEK, M. A hybrid optimization algorithm for solving constrained engineering design problems. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.
- BIEGLER, L. T. **Nonlinear Programming: Concepts, Algorithms, and Applications to Chemical Processes**. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. ISBN 0898717027.
- BIGELOW, E.; LEWIS, M. Conformable hydrogen storage pressure vessel. 2018. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1459184>>.
- BOILER, A. S. of M. E.; COMMITTEE, P. V. **2017 ASME Boiler & Pressure Vessel Code: An International Code**. American Society of Mechanical Engineers, 2017. ISBN 9780791870990. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=7tdxyAEACAAJ>>.
- BOILER, A. S. of M. E.; COMMITTEE, P. V. **2019 ASME Boiler & Pressure Vessel Code: An International Code**. American Society of Mechanical Engineers, 2019. ISBN 9780791870990. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=7tdxyAEACAAJ>>.
- CALADO, G.; CASTRO, R. Hydrogen production from offshore wind parks: Current situation and future perspectives. **Applied Sciences**, v. 11, p. 5561, 06 2021.
- COSTA, P. R. da. **Estatística**. 2010. Disponível em: <[https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/04\\_estatistica.pdf](https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/04_estatistica.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2022.
- CUMALIOGLU, B. I. **MODELING AND SIMULATION OF A HIGH PRESSURE HYDROGEN STORAGE TANK WITH DYNAMIC WALL**. 2005. Disponível em: <[https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/1035/Thesis\\_Ilgaz\\_Cumalioglu.pdf?sequence=1](https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/1035/Thesis_Ilgaz_Cumalioglu.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 16 set. 2022.
- CÂMARA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO BRASIL-ALEMANHA DO RIO DE JANEIRO. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2021. Disponível em: <<https://www.energypartnership.com.br>>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- DELOITTE BE. **The potential of hydrogen for the chemical industry**. 2021. Disponível em: <[https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/xen/Documents/energy-resources/me\\_pov-hydrogen-chemical-industry.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/xen/Documents/energy-resources/me_pov-hydrogen-chemical-industry.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- ELJACK, F.; KAZI, M.-K. Prospects and challenges of green hydrogen economy via multi-sector global symbiosis in qatar. **Frontiers in Sustainability**, v. 1, 2021. ISSN 2673-4524. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsus.2020.612762>>.

ELLIOTT, J.; LIRA, C. **Introductory Chemical Engineering Thermodynamics**. Pearson Education, 2012. (Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences). ISBN 9780132901093. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=1fM0uPLZZfEC>>.

FILHO, D. B. F. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de pearson (r). v. 18, p. 115–147, 01 2009.

GARG, H. Solving structural engineering design optimization problems using an artificial bee colony algorithm. **Journal of Industrial and Management Optimization**, v. 10, p. 777–794, 11 2013.

GODULA-JOPEK, A. **Hydrogen Production: By Electrolysis**. [S.l.: s.n.], 2015. 1-402 p. ISBN 9783527333424.

GROCHALA, W. First there was hydrogen. **Nature Chemistry**, v. 7, 2015. ISSN 2673-4524. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nchem.2186>>.

HART, W.; LAIRD, C.; WATSON, J.-P.; WOODRUFF, D.; HACKEBEIL, G.; NICHOLSON, B.; SIIROLA, J. **Pyomo — Optimization Modeling in Python**. [S.l.: s.n.], 2017. v. 67. ISBN 978-3-319-58819-3.

HU, J.; SUNDARARAMAN, S.; MENTA, V. G. K.; CHANDRASHEKHARA, K.; CHERNICOFF, W. Failure pressure prediction of composite cylinders for hydrogen storage using thermo-mechanical analysis and neural network. **Advanced Composite Materials**, Taylor Francis, v. 18, n. 3, p. 233–249, 2009.

HYDROGEN–FUNDAMENTALS. In: **HYDROGEN Storage Technologies**. John Wiley Sons, Ltd, 2012. cap. 2, p. 11–79. ISBN 9783527649921. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527649921.ch2>>.

IMANIRAD, R.; YANG, X.-S.; YEOMANS, J. S. A concurrent modelling to generate alternatives approach using the firefly algorithm. **International Journal of Decision Support System Technology**, IGI Global, v. 5, n. 2, p. 33–45, apr 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.40182Fjdsst.2013040103>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities**. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>. Acesso em: 8 ago. 2022.

JAWAD, M. H. **Structural analysis and design of process equipment**. Third edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. ISBN 9781119311522.

KANNAN, B. K.; KRAMER, S. N. An Augmented Lagrange Multiplier Based Method for Mixed Integer Discrete Continuous Optimization and Its Applications to Mechanical Design. **Journal of Mechanical Design**, v. 116, n. 2, p. 405–411, 06 1994. ISSN 1050-0472. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2919393>>.

KATTAN, A.; ALRAWI, R. Pressure vessel design using the dynamic self-adaptive harmony search algorithm. In: . [S.l.: s.n.], 2014.

KATZ, E. Electrochemical contributions: Christian friedrich schönbein (1799–1868). **Electrochemical Science Advances**, v. 2, n. 1, p. e2160007, 2022. Disponível em: <<https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/elsa.202160007>>.

KLELL, M. Storage of hydrogen in the pure form. In: \_\_\_\_\_. **Handbook of Hydrogen Storage**. John Wiley Sons, Ltd, 2010. cap. 1, p. 1–37. ISBN 9783527629800. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527629800.ch1>>.

LANGELS, H.; SYRJÄ, O. **Hydrogen Production and Storage Optimization based on Technical and Financial Conditions: A study of hydrogen strategies focusing on demand and integration of wind power**. Tese (Doutorado), 2021. Disponível em: <<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-435176>>.

LEE, J. D. **Química Inorgânica não tão concisa**. [S.l.: s.n.], 1999. 1-809 p. ISBN 8521201761.

MONDE, M.; WOODFIELD, P.; TAKANO, T.; KOSAKA, M. Estimation of temperature change in practical hydrogen pressure tanks being filled at high pressures of 35 and 70 mpa. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 7, p. 5723–5734, 2012. ISSN 0360-3199. XII International Symposium on Polymer Electrolytes: New Materials for Application in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911028709>>.

NISHIDHARBABU, M. Design and Optimization of Pressure Vessel using Real Coded Genetic Algorithm. **International Journal of Scientific Engineering Research**, v. 8, p. 1409–1415, 10 2017.

NOGUEIRA, B. **As 5 maneiras de ser MECE – Como nunca mais ficar sem estruturas**. 2017. Disponível em: <<https://www.craftingcases.com/the-5-ways-to-be-mece-part-2/>>. Acesso em: 12 nov. 2022.

RAMACHANDRAN, R.; MENON, R. K. An overview of industrial uses of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 23, n. 7, p. 593–598, 1998. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319997001122>>.

RASIEL, E. **THE MCKINSEY WAY**. 1999. Disponível em: <[http://csinvesting.org/wp-content/uploads/2012/07/the\\_mckinsey\\_way.pdf](http://csinvesting.org/wp-content/uploads/2012/07/the_mckinsey_way.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2022.

SANDGREN, E. Nonlinear Integer and Discrete Programming in Mechanical Design Optimization. **Journal of Mechanical Design**, v. 112, n. 2, p. 223–229, 06 1990. ISSN 1050-0472. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2912596>>.

SANTOS, F. M. S. M.; SANTOS, F. A. C. M. O combustível “hidrogênio”. **Millenium, Journal of Education, echnologies, and Health**, v. 10, n. 31, p. 252–270, 2005. Disponível em: <<https://revistas.rcaap.pt/millenium/issue/view/516>>.

SIEMENS ENERGY. **Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world**. 2021. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/technical-papers/download-power-to-x.html>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**. Elsevier Science, 2007. ISBN 9780080556956. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=EkK8X54BsTIC>>.

TRENTZ, M. K. **Análise de Correlação e Causalidade Entre Dados de Sensores Aplicada a Alarmes Industriais**. 2021. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/235787/001135909.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 nov. 2022.



VEENSTRA, M.; HOBEIN, B. On-board physical based 70 mpa hydrogen storage systems. **SAE International Journal of Engines**, v. 4, p. 1862–1871, 06 2011.

WARSHAY, M.; PROKOPIUS, P. R. The fuel cell in space: yesterday, today and tomorrow. **Journal of Power Sources**, v. 29, n. 1, p. 193–200, 1990. ISSN 0378-7753. Proceedings of the Grove Anniversary Fuel Cell Symposium. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877539080019A>>.

WEST, J. B. Henry cavendish (1731–1810): hydrogen, carbon dioxide, water, and weighing the world. **American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology**, v. 307, n. 1, p. L1–L6, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1152/ajplung.00067.2014>>.

ZUTTEL, A. Materials for hydrogen storage. **Materials Today**, v. 6, n. 9, p. 24–33, 2003. ISSN 1369-7021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702103009222>>.



**APÊNDICE A – CENÁRIOS AVALIADOS**

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
0	20	1.0	Alumínio	Alumínio
1	20	1.0	Alumínio	Aço carbono
2	20	1.0	Alumínio	Cobre
3	20	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
4	20	1.0	Aço Carbono	Alumínio
5	20	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
6	20	1.0	Aço Carbono	Cobre
7	20	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
8	20	1.0	Cobre	Alumínio
9	20	1.0	Cobre	Aço carbono
10	20	1.0	Cobre	Cobre
11	20	1.0	Cobre	Aço inoxidável
12	20	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
13	20	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
14	20	1.0	Aço inoxidável	Cobre
15	20	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
16	20	10.0	Alumínio	Alumínio
17	20	10.0	Alumínio	Aço carbono
18	20	10.0	Alumínio	Cobre
19	20	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
20	20	10.0	Aço Carbono	Alumínio
21	20	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
22	20	10.0	Aço Carbono	Cobre
23	20	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
24	20	10.0	Cobre	Alumínio
25	20	10.0	Cobre	Aço carbono
26	20	10.0	Cobre	Cobre
27	20	10.0	Cobre	Aço inoxidável
28	20	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
29	20	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
30	20	10.0	Aço inoxidável	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
31	20	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
32	20	100.0	Alumínio	Alumínio
33	20	100.0	Alumínio	Aço carbono
34	20	100.0	Alumínio	Cobre
35	20	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
36	20	100.0	Aço Carbono	Alumínio
37	20	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
38	20	100.0	Aço Carbono	Cobre
39	20	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
40	20	100.0	Cobre	Alumínio
41	20	100.0	Cobre	Aço carbono
42	20	100.0	Cobre	Cobre
43	20	100.0	Cobre	Aço inoxidável
44	20	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
45	20	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
46	20	100.0	Aço inoxidável	Cobre
47	20	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
48	20	1000.0	Alumínio	Alumínio
49	20	1000.0	Alumínio	Aço carbono
50	20	1000.0	Alumínio	Cobre
51	20	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
52	20	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
53	20	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
54	20	1000.0	Aço Carbono	Cobre
55	20	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
56	20	1000.0	Cobre	Alumínio
57	20	1000.0	Cobre	Aço carbono
58	20	1000.0	Cobre	Cobre
59	20	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
60	20	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
61	20	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
62	20	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
63	20	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
64	25	1.0	Alumínio	Alumínio
65	25	1.0	Alumínio	Aço carbono
66	25	1.0	Alumínio	Cobre
67	25	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
68	25	1.0	Aço Carbono	Alumínio
69	25	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
70	25	1.0	Aço Carbono	Cobre
71	25	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
72	25	1.0	Cobre	Alumínio
73	25	1.0	Cobre	Aço carbono
74	25	1.0	Cobre	Cobre
75	25	1.0	Cobre	Aço inoxidável
76	25	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
77	25	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
78	25	1.0	Aço inoxidável	Cobre
79	25	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
80	25	10.0	Alumínio	Alumínio
81	25	10.0	Alumínio	Aço carbono
82	25	10.0	Alumínio	Cobre
83	25	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
84	25	10.0	Aço Carbono	Alumínio
85	25	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
86	25	10.0	Aço Carbono	Cobre
87	25	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
88	25	10.0	Cobre	Alumínio
89	25	10.0	Cobre	Aço carbono
90	25	10.0	Cobre	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
91	25	10.0	Cobre	Aço inoxidável
92	25	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
93	25	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
94	25	10.0	Aço inoxidável	Cobre
95	25	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
96	25	100.0	Alumínio	Alumínio
97	25	100.0	Alumínio	Aço carbono
98	25	100.0	Alumínio	Cobre
99	25	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
100	25	100.0	Aço Carbono	Alumínio
101	25	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
102	25	100.0	Aço Carbono	Cobre
103	25	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
104	25	100.0	Cobre	Alumínio
105	25	100.0	Cobre	Aço carbono
106	25	100.0	Cobre	Cobre
107	25	100.0	Cobre	Aço inoxidável
108	25	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
109	25	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
110	25	100.0	Aço inoxidável	Cobre
111	25	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
112	25	1000.0	Alumínio	Alumínio
113	25	1000.0	Alumínio	Aço carbono
114	25	1000.0	Alumínio	Cobre
115	25	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
116	25	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
117	25	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
118	25	1000.0	Aço Carbono	Cobre
119	25	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
120	25	1000.0	Cobre	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
121	25	1000.0	Cobre	Aço carbono
122	25	1000.0	Cobre	Cobre
123	25	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
124	25	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
125	25	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
126	25	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
127	25	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
128	30	1.0	Alumínio	Alumínio
129	30	1.0	Alumínio	Aço carbono
130	30	1.0	Alumínio	Cobre
131	30	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
132	30	1.0	Aço Carbono	Alumínio
133	30	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
134	30	1.0	Aço Carbono	Cobre
135	30	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
136	30	1.0	Cobre	Alumínio
137	30	1.0	Cobre	Aço carbono
138	30	1.0	Cobre	Cobre
139	30	1.0	Cobre	Aço inoxidável
140	30	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
141	30	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
142	30	1.0	Aço inoxidável	Cobre
143	30	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
144	30	10.0	Alumínio	Alumínio
145	30	10.0	Alumínio	Aço carbono
146	30	10.0	Alumínio	Cobre
147	30	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
148	30	10.0	Aço Carbono	Alumínio
149	30	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
150	30	10.0	Aço Carbono	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
151	30	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
152	30	10.0	Cobre	Alumínio
153	30	10.0	Cobre	Aço carbono
154	30	10.0	Cobre	Cobre
155	30	10.0	Cobre	Aço inoxidável
156	30	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
157	30	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
158	30	10.0	Aço inoxidável	Cobre
159	30	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
160	30	100.0	Alumínio	Alumínio
161	30	100.0	Alumínio	Aço carbono
162	30	100.0	Alumínio	Cobre
163	30	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
164	30	100.0	Aço Carbono	Alumínio
165	30	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
166	30	100.0	Aço Carbono	Cobre
167	30	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
168	30	100.0	Cobre	Alumínio
169	30	100.0	Cobre	Aço carbono
170	30	100.0	Cobre	Cobre
171	30	100.0	Cobre	Aço inoxidável
172	30	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
173	30	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
174	30	100.0	Aço inoxidável	Cobre
175	30	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
176	30	1000.0	Alumínio	Alumínio
177	30	1000.0	Alumínio	Aço carbono
178	30	1000.0	Alumínio	Cobre
179	30	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
180	30	1000.0	Aço Carbono	Alumínio



Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
181	30	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
182	30	1000.0	Aço Carbono	Cobre
183	30	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
184	30	1000.0	Cobre	Alumínio
185	30	1000.0	Cobre	Aço carbono
186	30	1000.0	Cobre	Cobre
187	30	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
188	30	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
189	30	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
190	30	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
191	30	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
192	35	1.0	Alumínio	Alumínio
193	35	1.0	Alumínio	Aço carbono
194	35	1.0	Alumínio	Cobre
195	35	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
196	35	1.0	Aço Carbono	Alumínio
197	35	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
198	35	1.0	Aço Carbono	Cobre
199	35	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
200	35	1.0	Cobre	Alumínio
201	35	1.0	Cobre	Aço carbono
202	35	1.0	Cobre	Cobre
203	35	1.0	Cobre	Aço inoxidável
204	35	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
205	35	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
206	35	1.0	Aço inoxidável	Cobre
207	35	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
208	35	10.0	Alumínio	Alumínio
209	35	10.0	Alumínio	Aço carbono
210	35	10.0	Alumínio	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
211	35	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
212	35	10.0	Aço Carbono	Alumínio
213	35	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
214	35	10.0	Aço Carbono	Cobre
215	35	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
216	35	10.0	Cobre	Alumínio
217	35	10.0	Cobre	Aço carbono
218	35	10.0	Cobre	Cobre
219	35	10.0	Cobre	Aço inoxidável
220	35	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
221	35	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
222	35	10.0	Aço inoxidável	Cobre
223	35	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
224	35	100.0	Alumínio	Alumínio
225	35	100.0	Alumínio	Aço carbono
226	35	100.0	Alumínio	Cobre
227	35	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
228	35	100.0	Aço Carbono	Alumínio
229	35	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
230	35	100.0	Aço Carbono	Cobre
231	35	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
232	35	100.0	Cobre	Alumínio
233	35	100.0	Cobre	Aço carbono
234	35	100.0	Cobre	Cobre
235	35	100.0	Cobre	Aço inoxidável
236	35	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
237	35	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
238	35	100.0	Aço inoxidável	Cobre
239	35	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
240	35	1000.0	Alumínio	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
241	35	1000.0	Alumínio	Aço carbono
242	35	1000.0	Alumínio	Cobre
243	35	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
244	35	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
245	35	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
246	35	1000.0	Aço Carbono	Cobre
247	35	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
248	35	1000.0	Cobre	Alumínio
249	35	1000.0	Cobre	Aço carbono
250	35	1000.0	Cobre	Cobre
251	35	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
252	35	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
253	35	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
254	35	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
255	35	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
256	40	1.0	Alumínio	Alumínio
257	40	1.0	Alumínio	Aço carbono
258	40	1.0	Alumínio	Cobre
259	40	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
260	40	1.0	Aço Carbono	Alumínio
261	40	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
262	40	1.0	Aço Carbono	Cobre
263	40	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
264	40	1.0	Cobre	Alumínio
265	40	1.0	Cobre	Aço carbono
266	40	1.0	Cobre	Cobre
267	40	1.0	Cobre	Aço inoxidável
268	40	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
269	40	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
270	40	1.0	Aço inoxidável	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
271	40	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
272	40	10.0	Alumínio	Alumínio
273	40	10.0	Alumínio	Aço carbono
274	40	10.0	Alumínio	Cobre
275	40	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
276	40	10.0	Aço Carbono	Alumínio
277	40	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
278	40	10.0	Aço Carbono	Cobre
279	40	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
280	40	10.0	Cobre	Alumínio
281	40	10.0	Cobre	Aço carbono
282	40	10.0	Cobre	Cobre
283	40	10.0	Cobre	Aço inoxidável
284	40	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
285	40	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
286	40	10.0	Aço inoxidável	Cobre
287	40	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
288	40	100.0	Alumínio	Alumínio
289	40	100.0	Alumínio	Aço carbono
290	40	100.0	Alumínio	Cobre
291	40	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
292	40	100.0	Aço Carbono	Alumínio
293	40	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
294	40	100.0	Aço Carbono	Cobre
295	40	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
296	40	100.0	Cobre	Alumínio
297	40	100.0	Cobre	Aço carbono
298	40	100.0	Cobre	Cobre
299	40	100.0	Cobre	Aço inoxidável
300	40	100.0	Aço inoxidável	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
301	40	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
302	40	100.0	Aço inoxidável	Cobre
303	40	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
304	40	1000.0	Alumínio	Alumínio
305	40	1000.0	Alumínio	Aço carbono
306	40	1000.0	Alumínio	Cobre
307	40	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
308	40	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
309	40	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
310	40	1000.0	Aço Carbono	Cobre
311	40	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
312	40	1000.0	Cobre	Alumínio
313	40	1000.0	Cobre	Aço carbono
314	40	1000.0	Cobre	Cobre
315	40	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
316	40	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
317	40	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
318	40	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
319	40	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
320	45	1.0	Alumínio	Alumínio
321	45	1.0	Alumínio	Aço carbono
322	45	1.0	Alumínio	Cobre
323	45	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
324	45	1.0	Aço Carbono	Alumínio
325	45	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
326	45	1.0	Aço Carbono	Cobre
327	45	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
328	45	1.0	Cobre	Alumínio
329	45	1.0	Cobre	Aço carbono
330	45	1.0	Cobre	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
331	45	1.0	Cobre	Aço inoxidável
332	45	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
333	45	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
334	45	1.0	Aço inoxidável	Cobre
335	45	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
336	45	10.0	Alumínio	Alumínio
337	45	10.0	Alumínio	Aço carbono
338	45	10.0	Alumínio	Cobre
339	45	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
340	45	10.0	Aço Carbono	Alumínio
341	45	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
342	45	10.0	Aço Carbono	Cobre
343	45	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
344	45	10.0	Cobre	Alumínio
345	45	10.0	Cobre	Aço carbono
346	45	10.0	Cobre	Cobre
347	45	10.0	Cobre	Aço inoxidável
348	45	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
349	45	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
350	45	10.0	Aço inoxidável	Cobre
351	45	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
352	45	100.0	Alumínio	Alumínio
353	45	100.0	Alumínio	Aço carbono
354	45	100.0	Alumínio	Cobre
355	45	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
356	45	100.0	Aço Carbono	Alumínio
357	45	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
358	45	100.0	Aço Carbono	Cobre
359	45	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
360	45	100.0	Cobre	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
361	45	100.0	Cobre	Aço carbono
362	45	100.0	Cobre	Cobre
363	45	100.0	Cobre	Aço inoxidável
364	45	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
365	45	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
366	45	100.0	Aço inoxidável	Cobre
367	45	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
368	45	1000.0	Alumínio	Alumínio
369	45	1000.0	Alumínio	Aço carbono
370	45	1000.0	Alumínio	Cobre
371	45	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
372	45	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
373	45	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
374	45	1000.0	Aço Carbono	Cobre
375	45	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
376	45	1000.0	Cobre	Alumínio
377	45	1000.0	Cobre	Aço carbono
378	45	1000.0	Cobre	Cobre
379	45	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
380	45	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
381	45	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
382	45	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
383	45	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
384	50	1.0	Alumínio	Alumínio
385	50	1.0	Alumínio	Aço carbono
386	50	1.0	Alumínio	Cobre
387	50	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
388	50	1.0	Aço Carbono	Alumínio
389	50	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
390	50	1.0	Aço Carbono	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
391	50	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
392	50	1.0	Cobre	Alumínio
393	50	1.0	Cobre	Aço carbono
394	50	1.0	Cobre	Cobre
395	50	1.0	Cobre	Aço inoxidável
396	50	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
397	50	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
398	50	1.0	Aço inoxidável	Cobre
399	50	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
400	50	10.0	Alumínio	Alumínio
401	50	10.0	Alumínio	Aço carbono
402	50	10.0	Alumínio	Cobre
403	50	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
404	50	10.0	Aço Carbono	Alumínio
405	50	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
406	50	10.0	Aço Carbono	Cobre
407	50	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
408	50	10.0	Cobre	Alumínio
409	50	10.0	Cobre	Aço carbono
410	50	10.0	Cobre	Cobre
411	50	10.0	Cobre	Aço inoxidável
412	50	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
413	50	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
414	50	10.0	Aço inoxidável	Cobre
415	50	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
416	50	100.0	Alumínio	Alumínio
417	50	100.0	Alumínio	Aço carbono
418	50	100.0	Alumínio	Cobre
419	50	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
420	50	100.0	Aço Carbono	Alumínio



Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
421	50	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
422	50	100.0	Aço Carbono	Cobre
423	50	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
424	50	100.0	Cobre	Alumínio
425	50	100.0	Cobre	Aço carbono
426	50	100.0	Cobre	Cobre
427	50	100.0	Cobre	Aço inoxidável
428	50	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
429	50	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
430	50	100.0	Aço inoxidável	Cobre
431	50	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
432	50	1000.0	Alumínio	Alumínio
433	50	1000.0	Alumínio	Aço carbono
434	50	1000.0	Alumínio	Cobre
435	50	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
436	50	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
437	50	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
438	50	1000.0	Aço Carbono	Cobre
439	50	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
440	50	1000.0	Cobre	Alumínio
441	50	1000.0	Cobre	Aço carbono
442	50	1000.0	Cobre	Cobre
443	50	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
444	50	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
445	50	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
446	50	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
447	50	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
448	55	1.0	Alumínio	Alumínio
449	55	1.0	Alumínio	Aço carbono
450	55	1.0	Alumínio	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
451	55	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
452	55	1.0	Aço Carbono	Alumínio
453	55	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
454	55	1.0	Aço Carbono	Cobre
455	55	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
456	55	1.0	Cobre	Alumínio
457	55	1.0	Cobre	Aço carbono
458	55	1.0	Cobre	Cobre
459	55	1.0	Cobre	Aço inoxidável
460	55	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
461	55	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
462	55	1.0	Aço inoxidável	Cobre
463	55	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
464	55	10.0	Alumínio	Alumínio
465	55	10.0	Alumínio	Aço carbono
466	55	10.0	Alumínio	Cobre
467	55	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
468	55	10.0	Aço Carbono	Alumínio
469	55	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
470	55	10.0	Aço Carbono	Cobre
471	55	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
472	55	10.0	Cobre	Alumínio
473	55	10.0	Cobre	Aço carbono
474	55	10.0	Cobre	Cobre
475	55	10.0	Cobre	Aço inoxidável
476	55	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
477	55	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
478	55	10.0	Aço inoxidável	Cobre
479	55	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
480	55	100.0	Alumínio	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
481	55	100.0	Alumínio	Aço carbono
482	55	100.0	Alumínio	Cobre
483	55	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
484	55	100.0	Aço Carbono	Alumínio
485	55	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
486	55	100.0	Aço Carbono	Cobre
487	55	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
488	55	100.0	Cobre	Alumínio
489	55	100.0	Cobre	Aço carbono
490	55	100.0	Cobre	Cobre
491	55	100.0	Cobre	Aço inoxidável
492	55	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
493	55	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
494	55	100.0	Aço inoxidável	Cobre
495	55	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
496	55	1000.0	Alumínio	Alumínio
497	55	1000.0	Alumínio	Aço carbono
498	55	1000.0	Alumínio	Cobre
499	55	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
500	55	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
501	55	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
502	55	1000.0	Aço Carbono	Cobre
503	55	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
504	55	1000.0	Cobre	Alumínio
505	55	1000.0	Cobre	Aço carbono
506	55	1000.0	Cobre	Cobre
507	55	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
508	55	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
509	55	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
510	55	1000.0	Aço inoxidável	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
511	55	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
512	60	1.0	Alumínio	Alumínio
513	60	1.0	Alumínio	Aço carbono
514	60	1.0	Alumínio	Cobre
515	60	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
516	60	1.0	Aço Carbono	Alumínio
517	60	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
518	60	1.0	Aço Carbono	Cobre
519	60	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
520	60	1.0	Cobre	Alumínio
521	60	1.0	Cobre	Aço carbono
522	60	1.0	Cobre	Cobre
523	60	1.0	Cobre	Aço inoxidável
524	60	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
525	60	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
526	60	1.0	Aço inoxidável	Cobre
527	60	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
528	60	10.0	Alumínio	Alumínio
529	60	10.0	Alumínio	Aço carbono
530	60	10.0	Alumínio	Cobre
531	60	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
532	60	10.0	Aço Carbono	Alumínio
533	60	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
534	60	10.0	Aço Carbono	Cobre
535	60	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
536	60	10.0	Cobre	Alumínio
537	60	10.0	Cobre	Aço carbono
538	60	10.0	Cobre	Cobre
539	60	10.0	Cobre	Aço inoxidável
540	60	10.0	Aço inoxidável	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
541	60	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
542	60	10.0	Aço inoxidável	Cobre
543	60	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
544	60	100.0	Alumínio	Alumínio
545	60	100.0	Alumínio	Aço carbono
546	60	100.0	Alumínio	Cobre
547	60	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
548	60	100.0	Aço Carbono	Alumínio
549	60	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
550	60	100.0	Aço Carbono	Cobre
551	60	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
552	60	100.0	Cobre	Alumínio
553	60	100.0	Cobre	Aço carbono
554	60	100.0	Cobre	Cobre
555	60	100.0	Cobre	Aço inoxidável
556	60	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
557	60	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
558	60	100.0	Aço inoxidável	Cobre
559	60	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
560	60	1000.0	Alumínio	Alumínio
561	60	1000.0	Alumínio	Aço carbono
562	60	1000.0	Alumínio	Cobre
563	60	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
564	60	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
565	60	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
566	60	1000.0	Aço Carbono	Cobre
567	60	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
568	60	1000.0	Cobre	Alumínio
569	60	1000.0	Cobre	Aço carbono
570	60	1000.0	Cobre	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
571	60	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
572	60	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
573	60	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
574	60	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
575	60	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
576	65	1.0	Alumínio	Alumínio
577	65	1.0	Alumínio	Aço carbono
578	65	1.0	Alumínio	Cobre
579	65	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
580	65	1.0	Aço Carbono	Alumínio
581	65	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
582	65	1.0	Aço Carbono	Cobre
583	65	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
584	65	1.0	Cobre	Alumínio
585	65	1.0	Cobre	Aço carbono
586	65	1.0	Cobre	Cobre
587	65	1.0	Cobre	Aço inoxidável
588	65	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
589	65	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
590	65	1.0	Aço inoxidável	Cobre
591	65	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
592	65	10.0	Alumínio	Alumínio
593	65	10.0	Alumínio	Aço carbono
594	65	10.0	Alumínio	Cobre
595	65	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
596	65	10.0	Aço Carbono	Alumínio
597	65	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
598	65	10.0	Aço Carbono	Cobre
599	65	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
600	65	10.0	Cobre	Alumínio

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
601	65	10.0	Cobre	Aço carbono
602	65	10.0	Cobre	Cobre
603	65	10.0	Cobre	Aço inoxidável
604	65	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
605	65	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
606	65	10.0	Aço inoxidável	Cobre
607	65	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
608	65	100.0	Alumínio	Alumínio
609	65	100.0	Alumínio	Aço carbono
610	65	100.0	Alumínio	Cobre
611	65	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
612	65	100.0	Aço Carbono	Alumínio
613	65	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
614	65	100.0	Aço Carbono	Cobre
615	65	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
616	65	100.0	Cobre	Alumínio
617	65	100.0	Cobre	Aço carbono
618	65	100.0	Cobre	Cobre
619	65	100.0	Cobre	Aço inoxidável
620	65	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
621	65	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
622	65	100.0	Aço inoxidável	Cobre
623	65	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
624	65	1000.0	Alumínio	Alumínio
625	65	1000.0	Alumínio	Aço carbono
626	65	1000.0	Alumínio	Cobre
627	65	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
628	65	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
629	65	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
630	65	1000.0	Aço Carbono	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
631	65	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
632	65	1000.0	Cobre	Alumínio
633	65	1000.0	Cobre	Aço carbono
634	65	1000.0	Cobre	Cobre
635	65	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
636	65	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
637	65	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
638	65	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
639	65	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
640	68	1.0	Alumínio	Alumínio
641	68	1.0	Alumínio	Aço carbono
642	68	1.0	Alumínio	Cobre
643	68	1.0	Alumínio	Aço inoxidável
644	68	1.0	Aço Carbono	Alumínio
645	68	1.0	Aço Carbono	Aço carbono
646	68	1.0	Aço Carbono	Cobre
647	68	1.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
648	68	1.0	Cobre	Alumínio
649	68	1.0	Cobre	Aço carbono
650	68	1.0	Cobre	Cobre
651	68	1.0	Cobre	Aço inoxidável
652	68	1.0	Aço inoxidável	Alumínio
653	68	1.0	Aço inoxidável	Aço carbono
654	68	1.0	Aço inoxidável	Cobre
655	68	1.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
656	68	10.0	Alumínio	Alumínio
657	68	10.0	Alumínio	Aço carbono
658	68	10.0	Alumínio	Cobre
659	68	10.0	Alumínio	Aço inoxidável
660	68	10.0	Aço Carbono	Alumínio



Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
661	68	10.0	Aço Carbono	Aço carbono
662	68	10.0	Aço Carbono	Cobre
663	68	10.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
664	68	10.0	Cobre	Alumínio
665	68	10.0	Cobre	Aço carbono
666	68	10.0	Cobre	Cobre
667	68	10.0	Cobre	Aço inoxidável
668	68	10.0	Aço inoxidável	Alumínio
669	68	10.0	Aço inoxidável	Aço carbono
670	68	10.0	Aço inoxidável	Cobre
671	68	10.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
672	68	100.0	Alumínio	Alumínio
673	68	100.0	Alumínio	Aço carbono
674	68	100.0	Alumínio	Cobre
675	68	100.0	Alumínio	Aço inoxidável
676	68	100.0	Aço Carbono	Alumínio
677	68	100.0	Aço Carbono	Aço carbono
678	68	100.0	Aço Carbono	Cobre
679	68	100.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
680	68	100.0	Cobre	Alumínio
681	68	100.0	Cobre	Aço carbono
682	68	100.0	Cobre	Cobre
683	68	100.0	Cobre	Aço inoxidável
684	68	100.0	Aço inoxidável	Alumínio
685	68	100.0	Aço inoxidável	Aço carbono
686	68	100.0	Aço inoxidável	Cobre
687	68	100.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável
688	68	1000.0	Alumínio	Alumínio
689	68	1000.0	Alumínio	Aço carbono
690	68	1000.0	Alumínio	Cobre

Cenário	P (MPa)	Capacidade Eletrolisador (MW)	Material Cabeça	Material Casco
691	68	1000.0	Alumínio	Aço inoxidável
692	68	1000.0	Aço Carbono	Alumínio
693	68	1000.0	Aço Carbono	Aço carbono
694	68	1000.0	Aço Carbono	Cobre
695	68	1000.0	Aço Carbono	Aço inoxidável
696	68	1000.0	Cobre	Alumínio
697	68	1000.0	Cobre	Aço carbono
698	68	1000.0	Cobre	Cobre
699	68	1000.0	Cobre	Aço inoxidável
700	68	1000.0	Aço inoxidável	Alumínio
701	68	1000.0	Aço inoxidável	Aço carbono
702	68	1000.0	Aço inoxidável	Cobre
703	68	1000.0	Aço inoxidável	Aço inoxidável

## APÊNDICE B – CÓDIGO DE APLICAÇÃO DO MODELO

### Código-fonte 1 – Bibliotecas necessárias para aplicação do modelo

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import pyomo.environ as pyo
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import itertools
```

### Código-fonte 2 – Funções relacionadas aos materiais

```
1 mat_cas_list = ['Aluminio', 'AcoCarbono', 'Cobre', '
   AcoInoxidavel']
2 mat_cab_list = ['Aluminio', 'AcoCarbono', 'Cobre', '
   AcoInoxidavel']
3
4 def propriedades_mat(material):
5
6     rho_mat = 0
7     C_mat = 0
8     S = 0
9
10    if material == 'Aluminio':
11        rho_mat = 0.10
12        C_mat = 2
13        S = 21002
14    elif material == 'AcoCarbono':
15        rho_mat = 0.28
16        C_mat = 0.8
17        S = 20001
18    elif material == 'Cobre':
19        rho_mat = 0.32
```

```

20     C_mat = 8.5
21     S = 8166
22     elif material == 'AcoInoxidavel':
23         rho_mat = 0.29
24         C_mat = 2.7
25         S = 29994
26
27     return rho_mat, C_mat, S

```

### Código-fonte 3 – Função da relação PVT

```

1 def tabela_pv(T):
2
3     T = T
4     R = 8.31451
5     Tc = 32.23
6     Pc = 1.316*pow(10,6)
7     MM_f = 2.016
8
9     # Parametros SKR
10    a = 0.42748*((R**2)*(Tc**2))/Pc
11    b = 0.08664*(R*Tc)/Pc
12
13    rho_f_list = list(np.arange(0.5, 100.5, 0.01))
14
15    df = pd.DataFrame(rho_f_list, columns = ['rho_f (g/L)'])
16
17    df['rho_f (mol/m3)'] = (df['rho_f (g/L)']/2.016)*1000
18
19    df['P (Pa)'] = ( (R*T*df['rho_f (mol/m )']) / (1 - (b*df
        ['rho_f (mol/m )']) ) ) - (a*(df['rho_f (mol/m )'
        ]**2)/(1 + (b*df['rho_f (mol/m )'])))

```

```

20
21 df['P (MPa)'] = df['P (Pa)']/1000000
22 df['P (bar)'] = df['P (MPa)']*10
23 df['P (psi)'] = df['P (MPa)']*145.038
24
25 return df

```

#### Código-fonte 4 – Função de limites aproximados do vaso de pressão

```

1 def limites_aproximados(CAP, P_op, df):
2
3     parametros_list = []
4
5     Qn = 200 * CAP
6
7     M = 24*Qn/11.1
8
9     rho_f_analise = df.iloc[(df['P (psi)'] - P_op).abs().
10         argsort()[:2]]['rho_f (g/L)'].tolist()
11
12     rho_f = round(np.mean(rho_f_analise), 2) # (g/L) = (kg/
13         m ) - Densidade do fluido
14
15     V = M/rho_f
16     Vin = round(V*61023.7,2)
17
18     L_R = 16/5.6
19
20     L = ( (V*L_R)/np.pi )**(1/3)
21
22     Lin = round(L*39.3701, 2)

```

```

22 R = L/L_R
23 Rin = round(R*39.3701,2)
24
25 D = 2*R
26 Din = round(D*39.3701,2)
27
28 parametros_list.append([CAP, P_op, Qn, M, Vin, Lin, Rin,
    Din])
29
30 return parametros_list

```

#### Código-fonte 5 – Função do modelo de vaso de pressão

```

1 def modelo_minimizacao(l_ini, r_ini, th_ini, ts_ini, C_11,
    C_12, C_21, C_22, Lmax, Vmax, Rmax, Lmin, Vmin, Rmin,
    ts_min, ts_max, th_min, th_max, C_R1, C_R2):
2
3     model = pyo.ConcreteModel(name="Pressure Vassel Model")
4
5     model.r = pyo.Var(initialize = r_ini, within = pyo.
        PositiveReals)
6
7     model.l = pyo.Var(initialize = l_ini, within = pyo.
        PositiveReals)
8
9     model.ts = pyo.Var(initialize = ts_ini, within = pyo.
        PositiveReals, bounds=(ts_min, ts_max))
10
11     model.th = pyo.Var(initialize = th_ini, within = pyo.
        PositiveReals, bounds=(th_min, th_max))
12
13     def func_objetivo(modelo):

```

```
14
15     obj = C_11*model.r*model.l*model.ts + C_12*(model.r
16         **2)*model.th + C_21*(model.ts**2)*model.l + C_22
17         *(model.ts**2)*model.r
18
19     return obj
20
21 model.obj = pyo.Objective(rule=func_objetivo, sense=pyo.
22     minimize)
23
24 model.max_l = pyo.Constraint(expr = (model.l <= Lmax))
25
26 model.min_l = pyo.Constraint(expr = (model.l >= Lmin))
27
28 model.max_v = pyo.Constraint(expr = (np.pi*pow(model.r,
29     2)*model.l) + (np.divide(4,3)*np.pi*pow(model.r, 3))
30     <= Vmax)
31
32 model.min_v = pyo.Constraint(expr = (np.pi*pow(model.r,
33     2)*model.l) + (np.divide(4,3)*np.pi*pow(model.r, 3))
34     >= Vmin)
35
36 model.min_ts = pyo.Constraint(expr = (C_R1*model.r) <=
37     model.ts)
38
39 model.min_th = pyo.Constraint(expr = (C_R2*model.r) <=
40     model.th)
41
42 model.rel_LD = pyo.Constraint(expr = (np.divide(model.l,
43     2*model.r) == 1.43))
44
45 return model
```

## Código-fonte 6 – Definição de parâmetros

```
1 Pop = 9862.584
2 cap = 1000
3 C_s = 8
4 E = 1
5 t_in_min = 293
6 t_min = tabela_pv(t_in_min)
7 parametros_min = limites_aproximados(cap, Pop, t_min)
8 Vmin = parametros_min[0][4]
9 Lmin = parametros_min[0][5]
10 Rmin = parametros_min[0][6]
11 t_in_max = 358
12 t_max = tabela_pv(t_in_max)
13 parametros_max = limites_aproximados(cap, Pop, t_max)
14 Vmax = parametros_max[0][4]
15 Lmax = parametros_max[0][5]
16 Rmax = parametros_max[0][6]
17 passo_L = round((Lmax - Lmin)/4, 2)
18 passo_R = round((Rmax - Rmin)/4, 2)
19 ts_min = 0.0625
20 ts_max = 2
21 th_min = 0.0625
22 th_max = 2
```

## Código-fonte 7 – Solução do modelo

```
1
2 rows_list = []
3
4 for material_cab in mat_cab_list:
5     for material_cas in mat_cas_list:
6         rho_mat_cab = propriedades_mat(material_cab)[0]
```



```

7   C_mat_cab = propiedades_mat(material_cab)[1]
8   S_mat_cab = propiedades_mat(material_cab)[2]
9
10  rho_mat_cas = propiedades_mat(material_cas)[0]
11  C_mat_cas = propiedades_mat(material_cas)[1]
12  S_mat_cas = propiedades_mat(material_cas)[2]
13
14  C_11 = (2*np.pi*rho_mat_cas*C_mat_cas)
15  C_12 = (2*np.pi*rho_mat_cab*C_mat_cab)
16
17  C_21 = (np.divide(np.pi, pow(np.cos(30 * np.pi/180), 2)
18          )*2*np.divide(60, 360))*rho_mat_cas*C_s
19
20  C_22 = (np.divide(np.pi, pow(np.cos(30 * np.pi/180), 2)
21          )*4*np.divide(60, 360)*np.pi)*rho_mat_cab*C_s
22
23  C_R1 = np.exp(Pop/(S_mat_cas*E)) - 1
24  C_R2 = np.exp((0.5*Pop)/(S_mat_cab*E)) - 1
25
26  inicializa_l = list(np.arange(Lmin, Lmax+passo_L,
27          passo_L))
28  inicializa_r = list(np.arange(Rmin, Rmax+passo_R,
29          passo_R))
30  inicializa_th = list(np.arange(th_min, th_max, 0.5))
31  inicializa_ts = list(np.arange(ts_min, th_max, 0.5))
32
33  for l_ini in inicializa_l:
34      for r_ini in inicializa_r:
35          for th_ini in inicializa_th:
36              for ts_ini in inicializa_ts:
37
38                  print("Rodando conjunto:", material_cab,
39                        material_cas, l_ini, r_ini, th_ini, ts_ini)

```

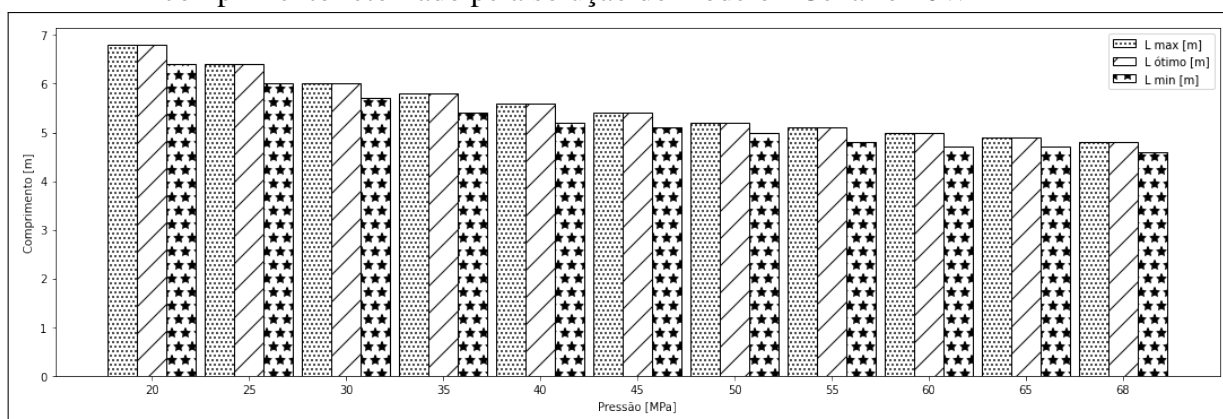
```
34     m = modelo_minimizacao(l_ini, r_ini, th_ini,
35                            ts_ini, C_11, C_12, C_21, C_22, Lmax, Vmax,
36                            Rmax, Lmin, Vmin, Rmin, ts_min, ts_max,
37                            th_min, th_max, C_R1, C_R2)
    status = pyo.SolverFactory('ipopt', executable=
        '/content/ipopt').solve(m)

    rows_list.append([material_cab, material_cas,
        l_ini, r_ini, th_ini, ts_ini, pyo.value(m.l)
        , pyo.value(m.r), pyo.value(m.th), pyo.value
        (m.ts), C_11, C_12, C_21, C_22, Lmax, Vmax,
        Rmax, Lmin, Vmin, Rmin])
```

## APÊNDICE C – ANÁLISE DAS CAPACIDADES DE 10, 100 E 1000 MW

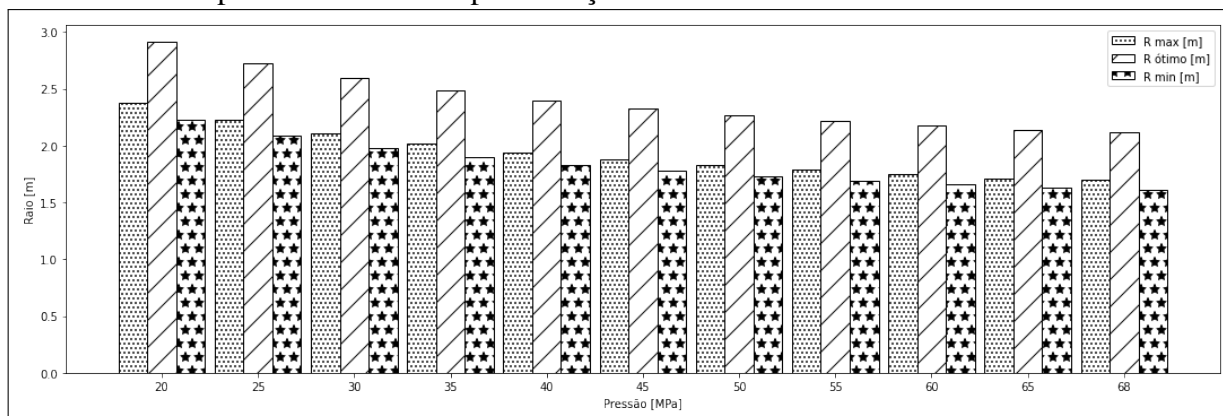
### C.1 Resultados para capacidade de 10 MW

Figura 30 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 10W



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 31 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 10W

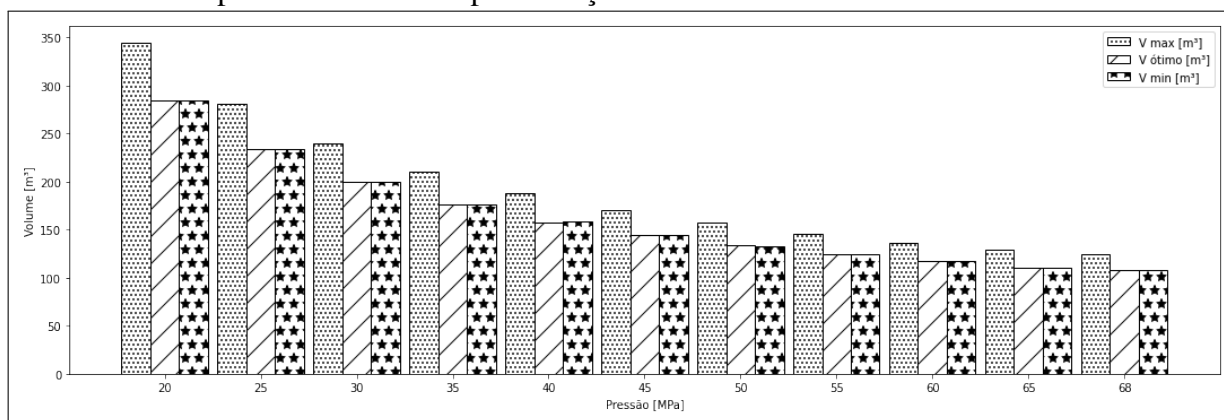


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### C.2 Resultados para capacidade de 100 MW

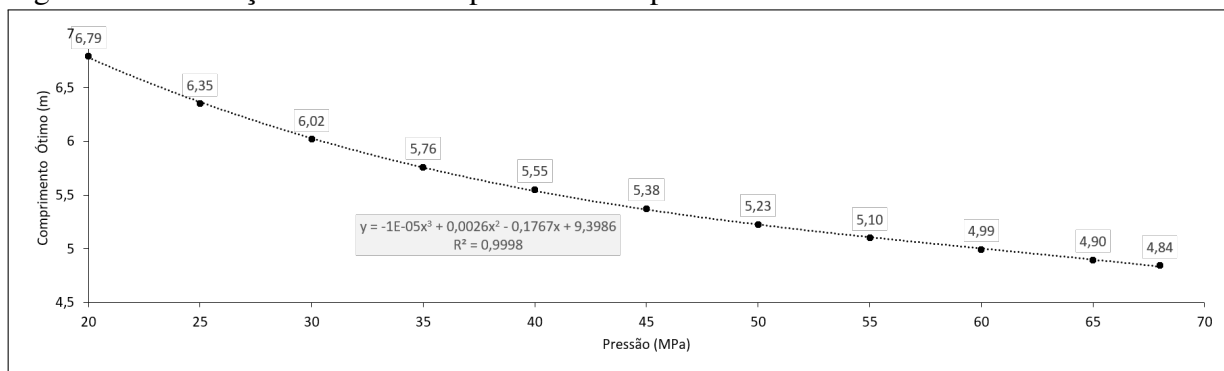
### C.3 Resultados para capacidade de 1000 MW

Figura 32 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 10W



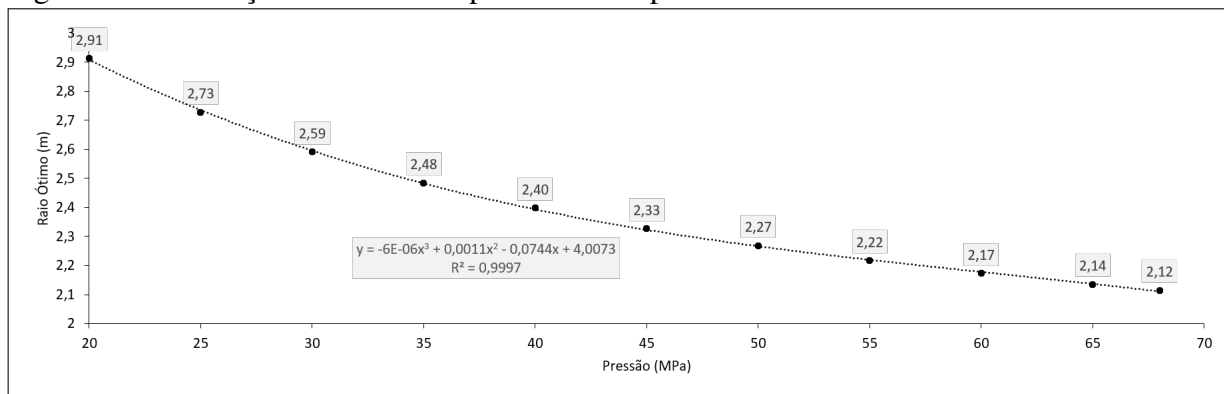
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 33 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 10W



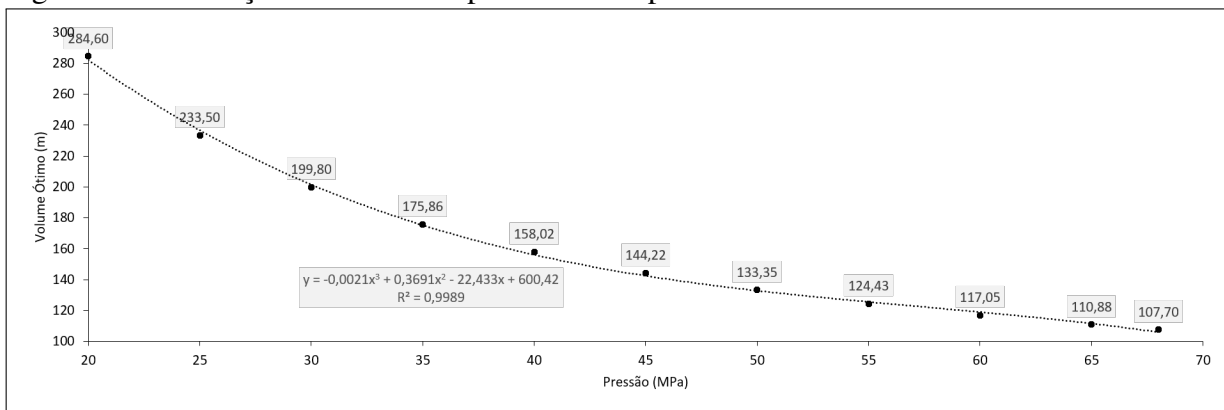
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 34 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 10W



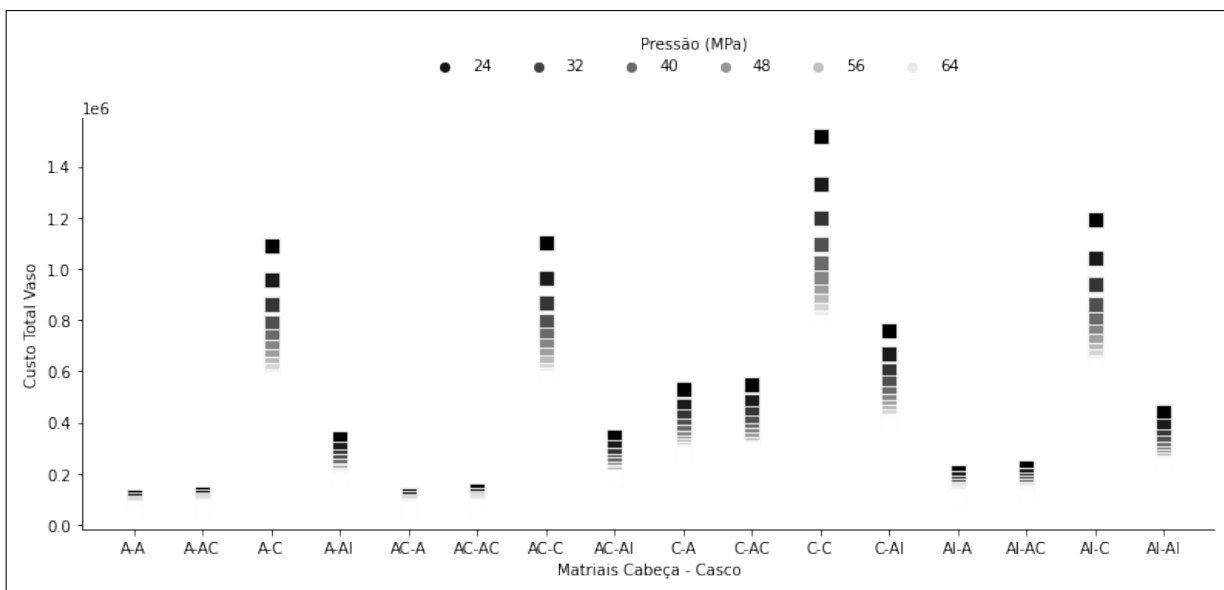
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 35 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 10W



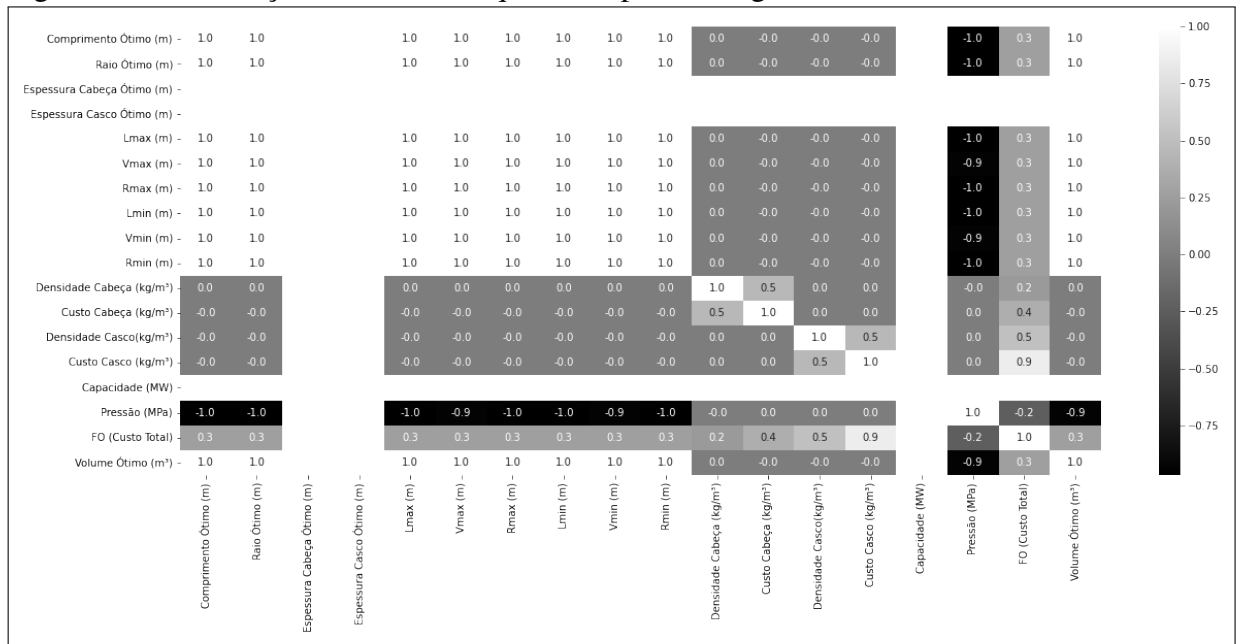
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 36 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto - Cenário 10W



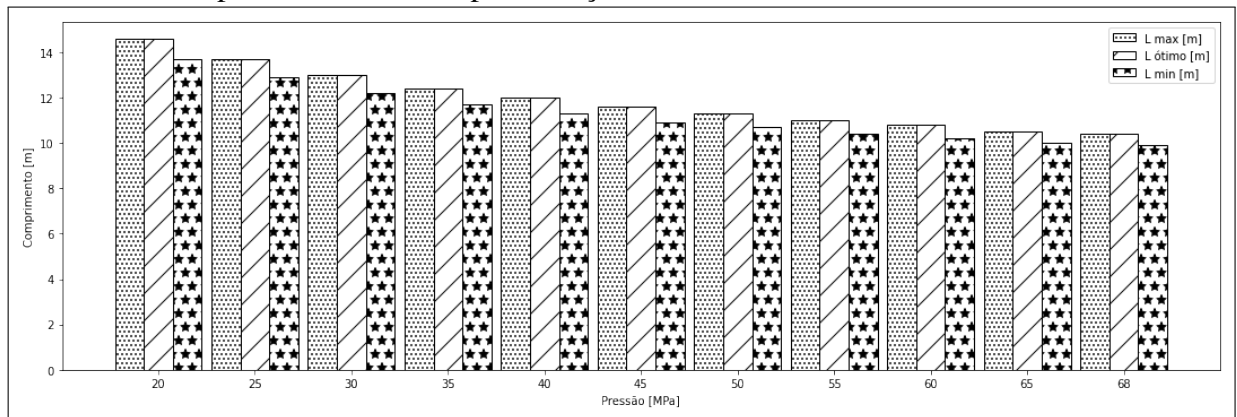
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 37 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 10 MW



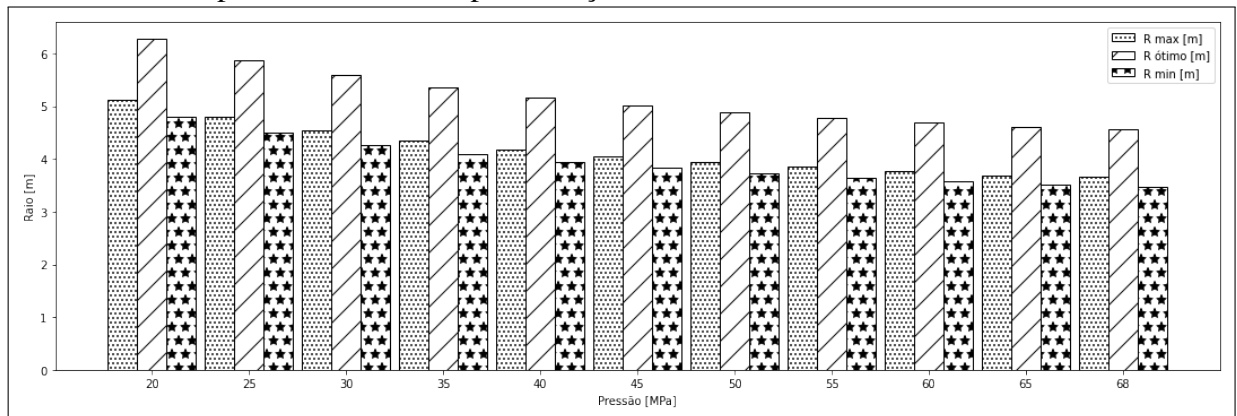
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 38 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 100W



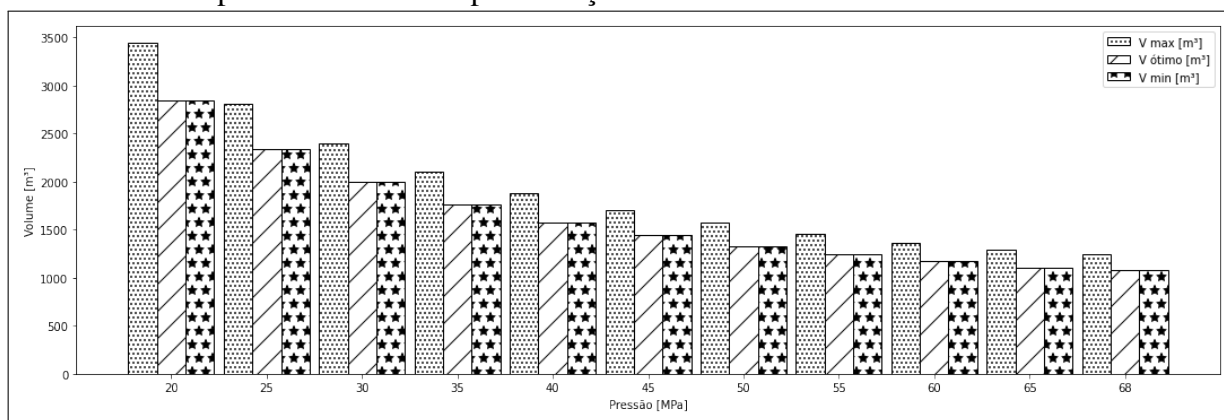
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 39 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 100W



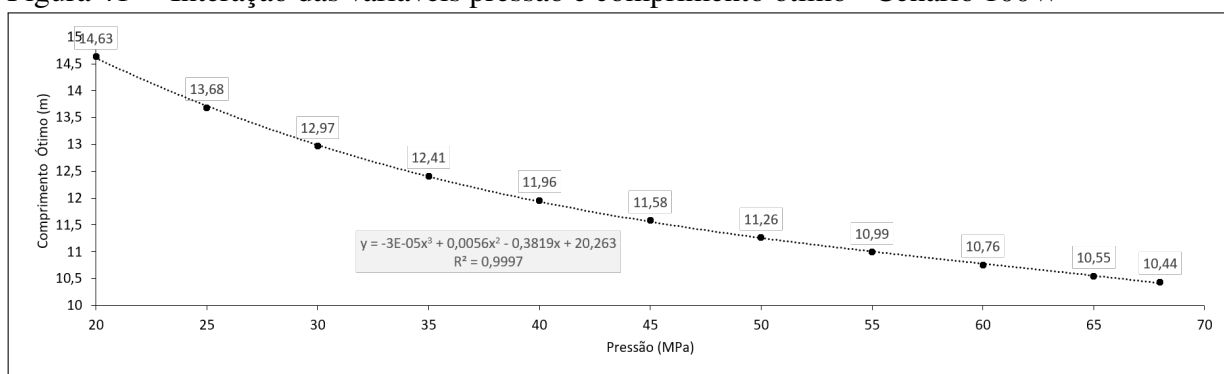
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 40 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 100W



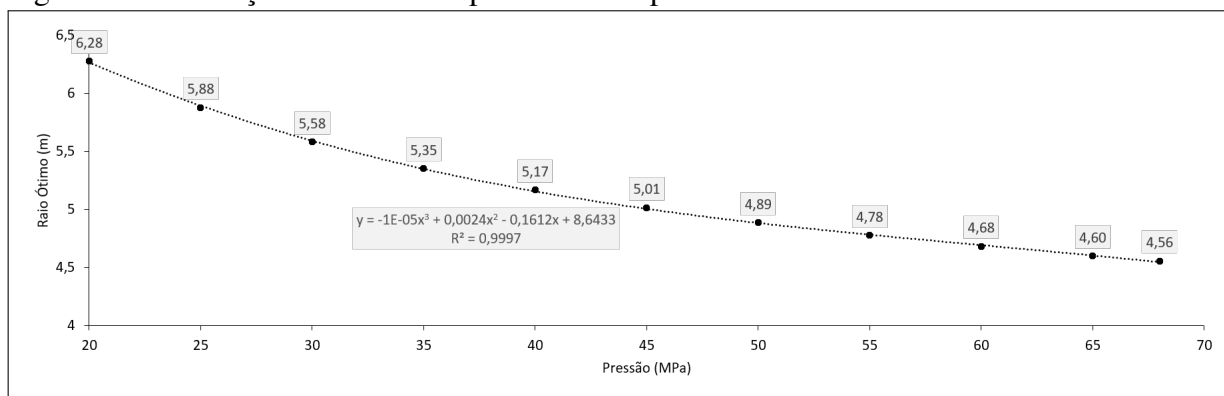
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 41 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 100W



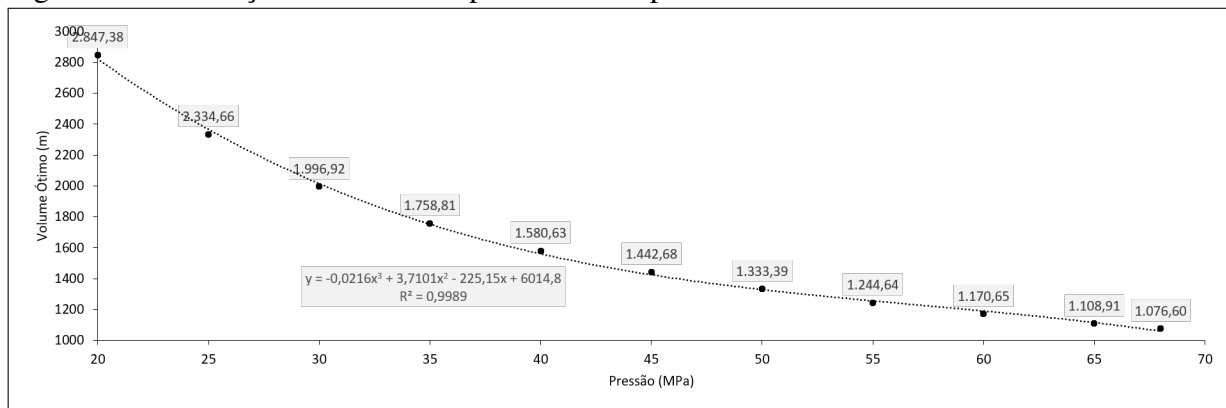
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 42 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 100W



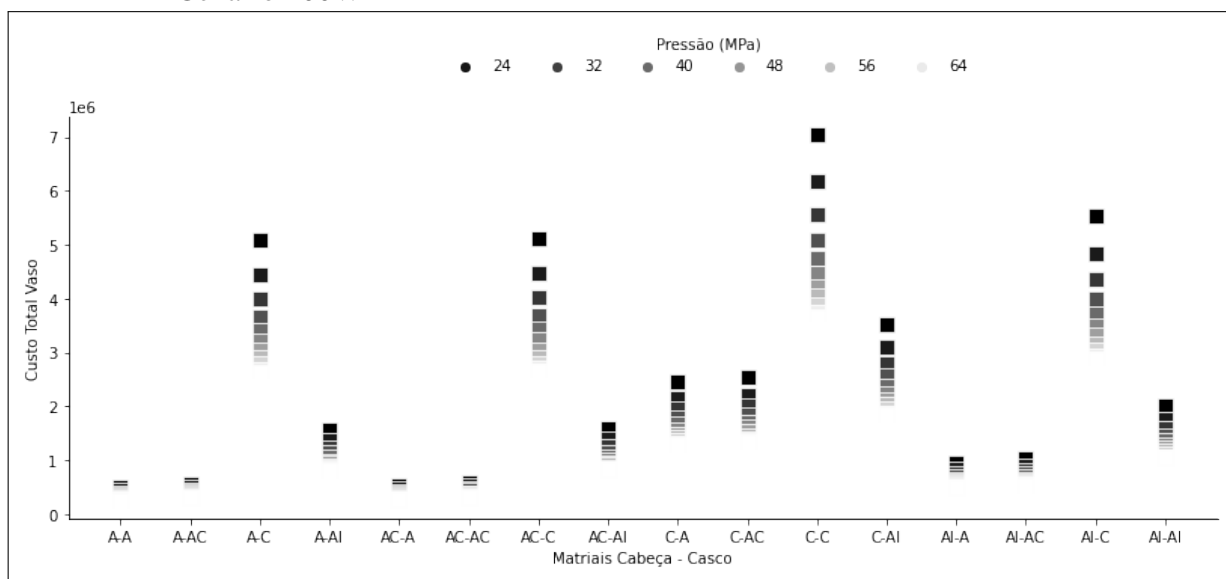
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 43 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 100W



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

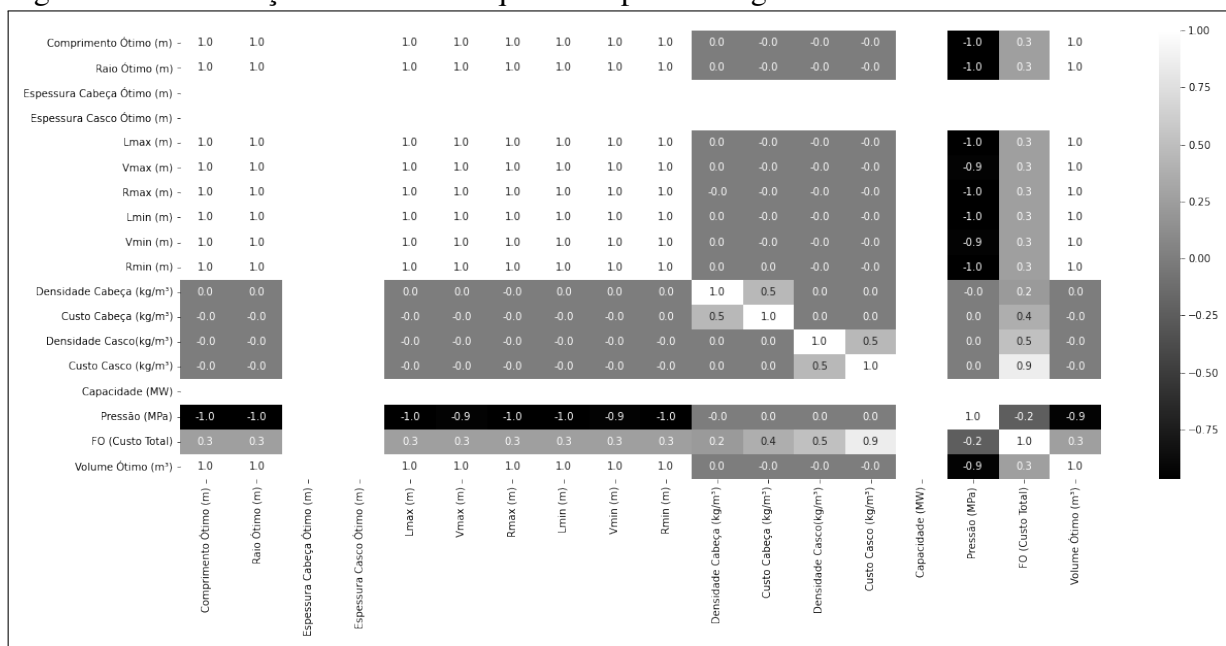
Figura 44 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto - Cenário 100W



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

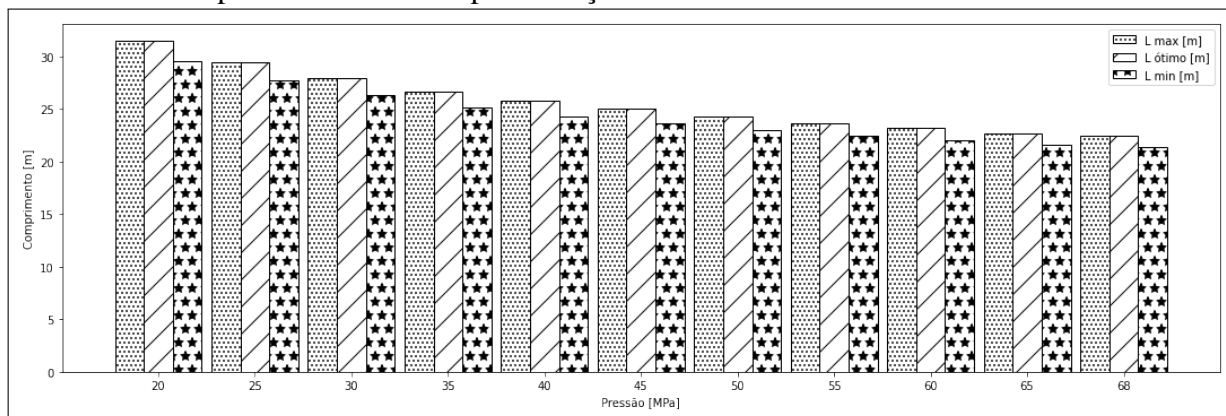


Figura 45 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 100 MW



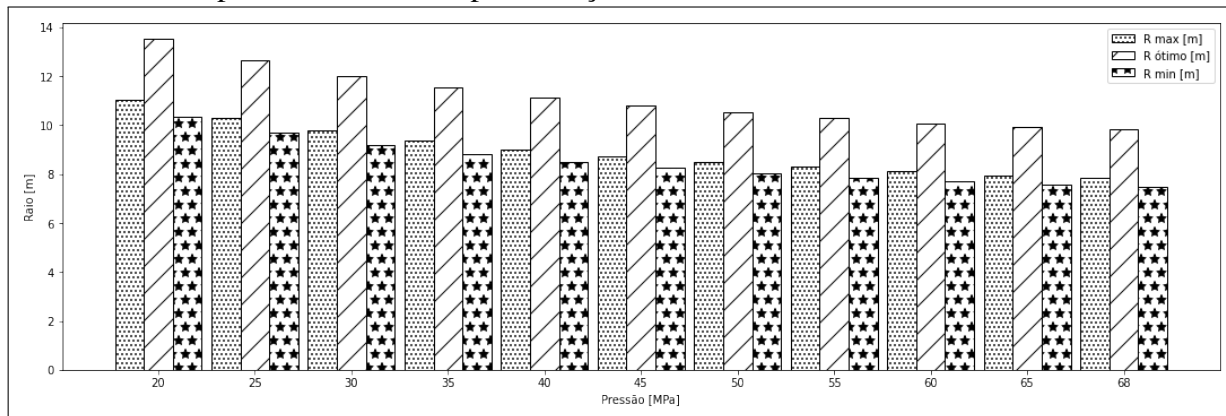
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 46 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 1000W



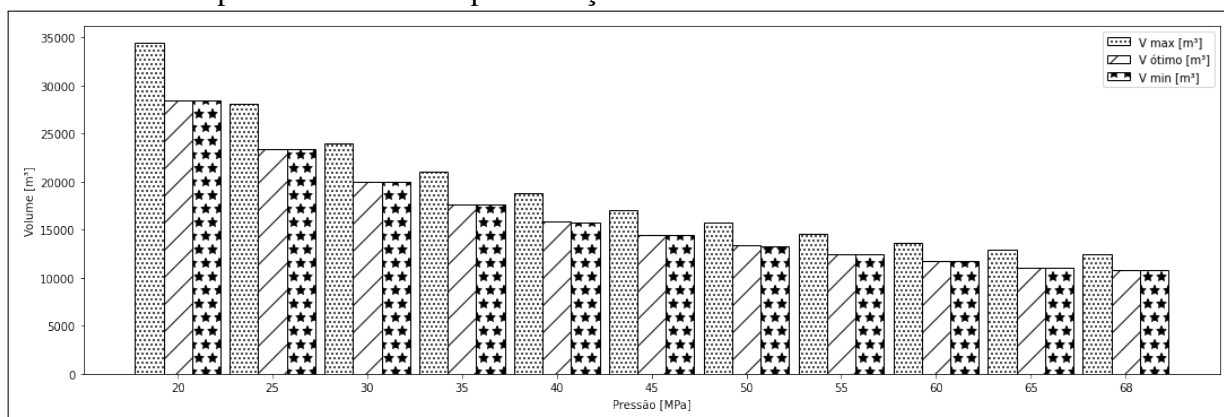
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 47 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo - Cenário 1000W



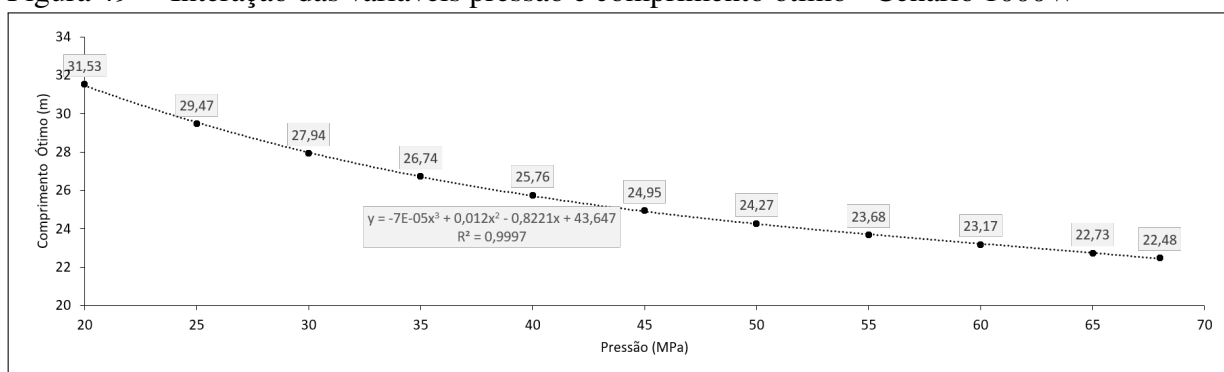
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 48 – Comparativo dos valores de limites mínimo e máximo estimado e o valor ótimo de comprimento retornado pela solução do modelo- Cenário 1000W



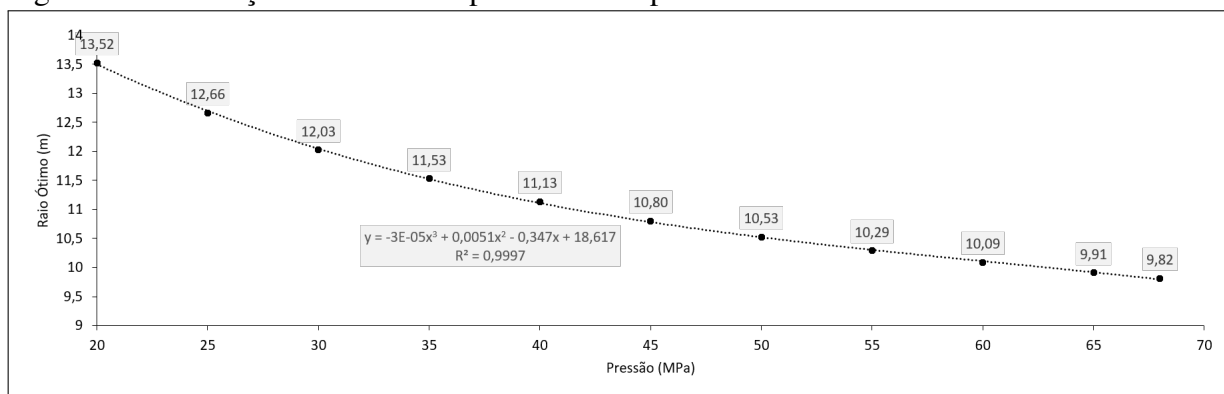
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 49 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 1000W



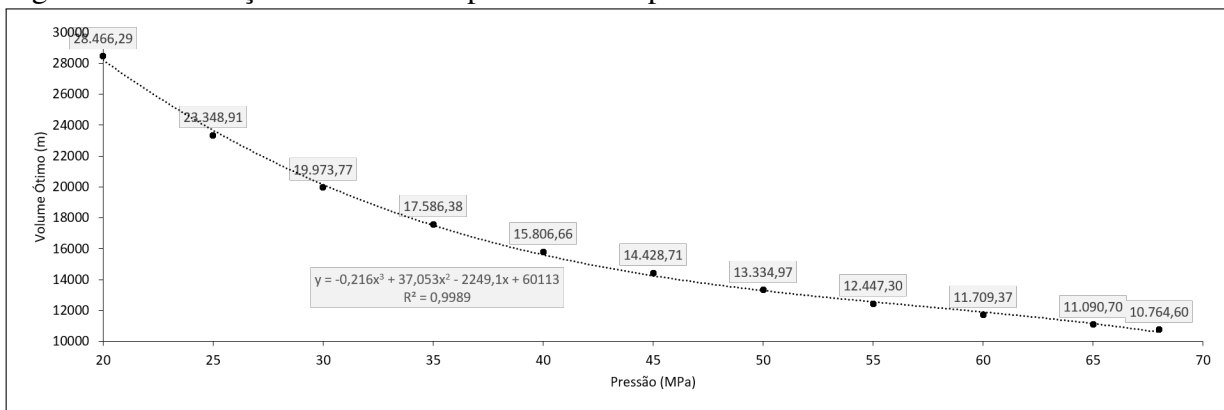
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 50 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 1000W



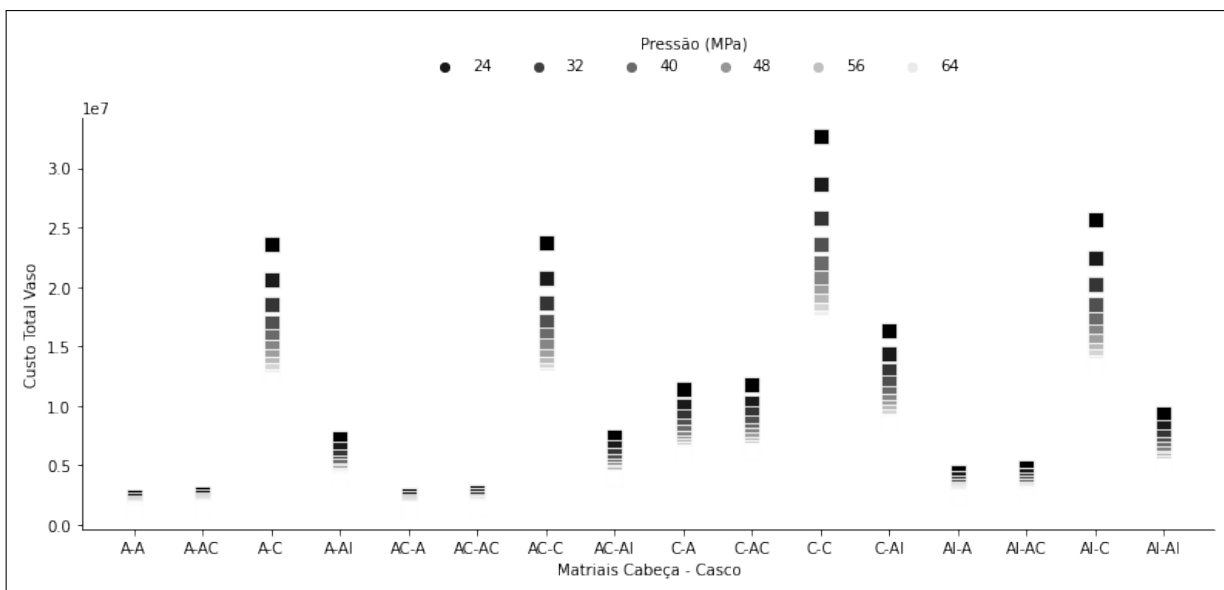
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 51 – Interação das variáveis pressão e comprimento ótimo - Cenário 1000W



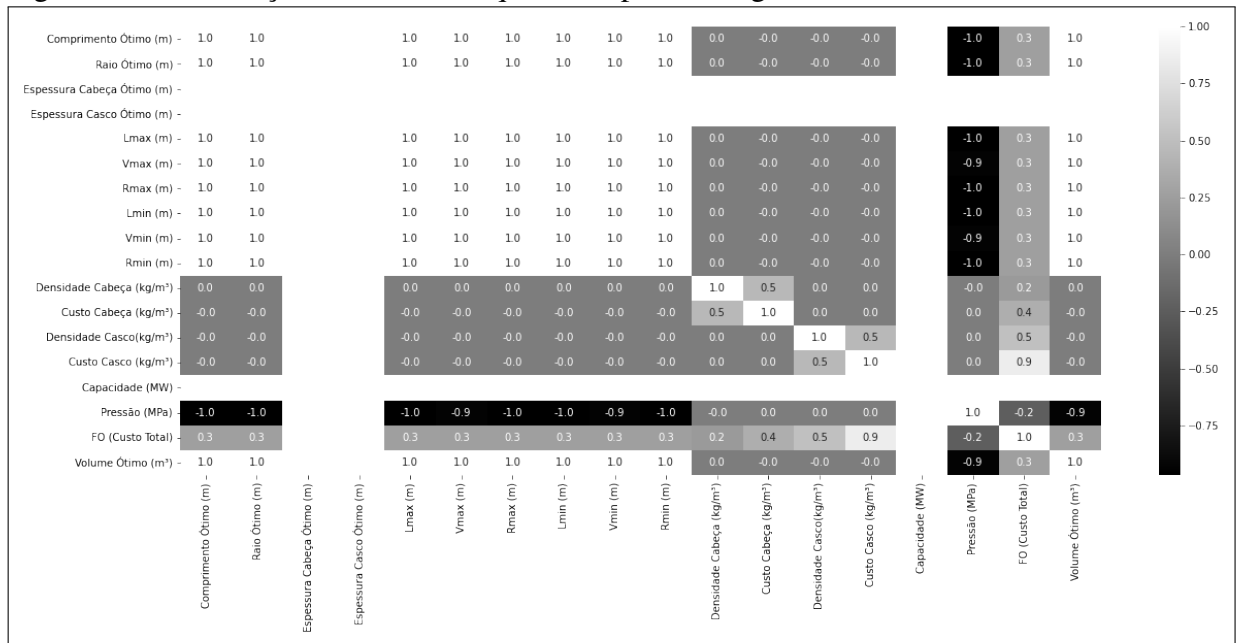
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 52 – Gráfico da relação de construção da combinação de materiais e custo total do projeto - Cenário 1000W



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 53 – Correlação das variáveis quando capacidade igual a 1000 MW



Fonte: elaborado pelo autor (2022).