



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**WILLIAM NEVES DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO HIDROGÊNIO  
VERDE BASEADA EM SIMULAÇÃO DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS**

**FORTALEZA**

**2024**

WILLIAM NEVES DA SILVA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO HIDROGÊNIO  
VERDE BASEADA EM SIMULAÇÃO DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

Coorientador: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

FORTALEZA

2024

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

---

- S584a Silva, William Neves da.  
Avaliação de desempenho da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde baseada em simulação de sistemas a eventos discretos / William Neves da Silva. – 2024.  
121 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.  
Coorientação: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata.
1. Energias Renováveis; Hidrogênio Verde; Simulação; Cadeia de Suprimentos; Tomada de Decisão. I.  
Título.

CDD 620.1

---

WILLIAM NEVES DA SILVA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO HIDROGÊNIO  
VERDE BASEADA EM SIMULAÇÃO DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em: 18/11/2024

BANCA EXAMINADORA

---

Prof Dr. Francisco Nivaldo Aguiar  
Freire (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata (Coorientador)  
Universidade Coorientador (UFC)

---

Prof. Dr(a). Ana Fabíola Leite Almeida  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr(a). Miriam Karla Rocha  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
(UFRN)

Agradeço a Deus e ao meu pai, Antônio Ribeiro da Silva, por sempre acreditarem em mim.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Antônio Ribeiro da Silva, por me proporcionar a grande oportunidade de estudar, por seu apoio incondicional em todos os momentos e por sempre me fazer acreditar na minha capacidade.

À Francisca dos Santos, Wicelene Maria dos Santos, Francisco Erber da Silva Rodrigues, Maria Silvandira Pereira, e aos demais familiares, pois sempre acreditaram, apoiaram e deram forças nos momentos difíceis, demonstrando confiança em mim.

Ao Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire pela orientação e pelo suporte oferecido na realização deste projeto, além de todo o apoio durante a Pós-Graduação.

Ao Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata pela orientação e participação ao longo da trajetória na Pós-Graduação, motivando, apoiando e ensinando. Muito obrigado por acreditar em mim e por me guiar de forma tão espetacular.

À Prof(a). Dr.(a) Ana Fabiola Leite Almeida pelas contribuições e sugestões de melhoria para o meu projeto.

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa pelas contribuições e sugestões de melhoria para o meu projeto.

À Prof(a). Dr.(a) Miriam Karla Rocha pelas contribuições e sugestões de melhoria para o meu projeto.

Ao Prof. Dr. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto por todo suporte e disponibilidade em ajudar e esclarecer dúvidas relacionadas ao meu projeto.

Ao secretário da pós-graduação, Valdi Matos, pela dedicação exemplar como profissional e pela amizade ao longo deste período de mestrado.

Agradeço o apoio da Coordenação e de todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM).

Agradeço ao meu grande amigo, Jardel Oliveira Maia, e à sua família por todo o apoio durante minha pós-graduação e por estarem presentes em todos os momentos, lembrando-me de todo o caminho percorrido e do quanto faltava para esta realização.

Aos meus amigos, Vagner Barbosa e Priscila Tavares, por toda a ajuda, comprometimento e apoio ao longo desta jornada.

Ao meu amigo, José Melo Borges Filho, pelo grande apoio durante todo o percurso e, também, pelo companherismo.

Agradeço ao meu amigo, Ewerton Henrique Bezerra Lima, por sempre acreditar em meu propósito, nunca duvidando da minha capacidade, mostrando, com suas palavras, que Deus nos direciona somente para batalhas que podemos vencer. Muito obrigado.

Ao meu amigo, José Janailton de Lima, pelo grande apoio durante todo o desenvolvimento deste projeto, contribuindo de forma significativa para a sua finalização. Sua colaboração foi de suma importância. Muito obrigado.

À minha amiga, Maria Marliete Fernandes de Melo Neta, pela companhia durante todo o período da Pós-Graduação, ajudando-me, motivando-me e compartilhando momentos difíceis, o meu mais sincero “muito obrigado”. Conte comigo sempre.

Ao meu amigo, Claudécir, pela disposição em ajudar, não importando o tamanho da dificuldade, mantendo sempre o bom humor.

Ao meu amigo, Renno de Holanda Sousa, por manter viva a importância do curso de Engenharia de Produção, lembrando-me todos os dias sobre a excelência desta profissão.

Agradeço a ajuda do Professor Francisco Adones de Oliveira Filho, Coordenador do curso de Engenharia de Produção que, com seu apoio, tornou possível a continuidade do meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

À amiga Prof. Dr. Fran Maria Cosme, pelo seu apoio, pelas valiosas sugestões e por toda a atenção dada neste período de Pós-Graduação. Muito obrigado por tudo. Conte comigo sempre.

À minha amiga, Adriadne Frazão Costa, por todo o apoio, pelos conselhos e pela ajuda ao longo deste percurso. O meu mais sincero e profundo agradecimento.

Agradeço a ajuda de todos os meus amigos e colegas de trabalho do laboratório LAFFER: Paulo Herbert França Maia Júnior, Nichollas Rodrigues Bezerra Freitas, Vanja Fontenele Nunes, João Pedro Santana Mota, Felipe Rodrigues da Silva, João Dionízio de Melo Neto, e Marcelo Rocha Braga, por todo o auxílio e suporte no desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Aos responsáveis pelo laboratório OPL, ao proporcionarem suporte para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Agradeço a todos os meus amigos que, direta e indiretamente, sempre estiveram presentes, na torcida pelo meu sucesso nesta jornada.

À ROCKWELL AUTOMATION por disponibilizar o software Arena Simulation em sua versão estudantil, tornando possível a realização do presente trabalho.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-(CAPES)-Código de Financiamento 001, uma vez que o presente trabalho tornou-se real mediante o seu apoio.



“A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original.”

(Albert Einstein)

## RESUMO

A busca incessante por fontes alternativas e renováveis de energia tem sido um tema recorrente em debates globais, principalmente devido à necessidade de atender a crescente demanda energética da população e mitigar os impactos ambientais causados pelos combustíveis não renováveis, que exacerbam a emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, contribuindo para o efeito estufa e para o aquecimento global. Diante desse cenário, a energia solar, eólica e de biomassa despontam como protagonistas nessa busca por soluções sustentáveis. Surge então uma opção promissora, o Hidrogênio Verde (H<sub>2</sub>V), produzido através da eletrólise da água, que se apresenta como um vetor energético viável para impulsionar a transição energética. No entanto, apesar de seu potencial, ainda são necessários investimentos significativos em tecnologia para superar desafios como o armazenamento complexo do H<sub>2</sub>V e o desenvolvimento de infraestrutura adequada para seu transporte. Como proposta metodológica, utiliza-se uma série de etapas, divididas em nove passos inter-relacionados, que guiam o desenvolvimento da simulação. Neste contexto, o presente projeto de Dissertação visa avaliar a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, empregando simulações de sistemas a eventos discretos, utilizando a análise bibliométrica para identificar e destacar os principais obstáculos nesta área. O desenvolvimento de modelos de simulação específicos permitirá uma análise detalhada de diversos cenários, utilizando valores extraídos da literatura como parâmetros de produção, custos e processos. A partir disso, serão fornecidos insights valiosos para os gestores, auxiliando na tomada de decisões ao longo de toda a cadeia produtiva do hidrogênio verde.

**Palavras-chave:** Energias Renováveis. Hidrogênio Verde. Simulação. Cadeia de Suprimentos. Tomada de Decisão.

## ABSTRACT

The relentless search for alternative and renewable energy sources has been a recurring theme in global debates, mainly due to the need to meet the growing energy demand of the population and mitigate the environmental impacts caused by non-renewable fuels, which exacerbate the emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into the atmosphere, contributing to the greenhouse effect and global warming. In this scenario, solar, wind and biomass energy are emerging as protagonists in this search for sustainable solutions. A promising option then emerges, Green Hydrogen (G<sub>2</sub>H), produced through the electrolysis of water, which presents itself as a viable energy vector to drive the energy transition. However, despite its potential, significant investments in technology are still needed to overcome challenges such as the complex storage of G<sub>2</sub>H and the development of adequate infrastructure for its transportation. As a methodological proposal, a series of steps are used, divided into nine interrelated steps, which guide the development of the simulation. In this context, this Dissertation project aims to evaluate the G<sub>2</sub>H supply chain, employing discrete event system simulations, using bibliometric analysis to identify and highlight the main obstacles in this area. The development of specific simulation models will allow a detailed analysis of several scenarios, using values extracted from the literature such as production, cost and process parameters. From this, valuable insights will be provided to managers, assisting in decision-making throughout the entire green hydrogen production chain.

**Keywords:** Renewable energy. Green Hydrogen. Simulation. Supply chain. Decision Making.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da análise bibliométrica. . . . .	24
Figura 2 – Gráfico anual de produção científica em relação ao tema hidrogênio verde a nível mundial. . . . .	25
Figura 3 – Palavras-chave utilizadas com maior frequência em pesquisas referentes ao tema H <sub>2</sub> V pelo mundo. . . . .	25
Figura 4 – Os 15 principais países em números de citações referentes ao tema H <sub>2</sub> V. . .	27
Figura 5 – Relação científica referente ao número de publicações e citações dos autores por país. . . . .	27
Figura 6 – Produção científica das universidades internacionais referente ao tema H <sub>2</sub> V. . .	28
Figura 7 – Evolução da produção científica relacionada ao tema H <sub>2</sub> V no Brasil. . . . .	29
Figura 8 – Palavras-chave utilizadas com maior frequência por pesquisadores brasileiros em relação ao tema H <sub>2</sub> V. . . . .	29
Figura 9 – Produção científica das universidades brasileiras referente ao tema H <sub>2</sub> V. . .	30
Figura 10 – Etapas de desenvolvimento de um estudo de simulação. . . . .	32
Figura 11 – Fluxograma de uma cadeia de suprimentos do H <sub>2</sub> V. . . . .	38
Figura 12 – Crescimento da demanda do hidrogênio. . . . .	40
Figura 13 – Cadeia de produção de hidrogênio a partir de diversas fontes. . . . .	42
Figura 14 – Etapas do desenvolvimento da metodologia. . . . .	51
Figura 15 – Modelo conceitual. . . . .	54
Figura 16 – Fluxograma da implementação da tomada de decisão para o cenário utilizando energia solar. . . . .	57
Figura 17 – Fluxograma da implementação da tomada de decisão para o cenário utilizando energia eólica. . . . .	58
Figura 18 – Fluxograma da implementação da tomada de decisão para o cenário utilizando energia de biomassa. . . . .	58
Figura 19 – Modelagem referente à simulação de uma cadeia de suprimentos completa do H <sub>2</sub> V. . . . .	59
Figura 20 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia solar. . . . .	65
Figura 21 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia solar. . . . .	68

Figura 22 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia solar. . . . .	70
Figura 23 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia eólica. . . . .	72
Figura 24 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia eólica. . . . .	74
Figura 25 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia eólica. . . . .	75
Figura 26 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia a partir de biomassa. . . . .	78
Figura 27 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia a partir de biomassa. . . . .	80
Figura 28 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia a partir de biomassa. . . . .	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Termos pesquisados e quantidade de documentos retornados referentes ao H <sub>2</sub> V.	23
Tabela 2 – Os dez principais autores dos artigos analisados segundo o número de publicações referentes ao tema H <sub>2</sub> V.	26
Tabela 3 – Softwares de simulação.	39
Tabela 4 – Parâmetros da escala de produção.	55
Tabela 5 – Processos e custos para produção do H <sub>2</sub> V	56
Tabela 6 – Setor produtivo, recursos, prioridades e custos em relação à implementação dos cenários simulados.	61
Tabela 7 – Parâmetros de entrada para o cenário comum de energia solar.	63
Tabela 8 – Possíveis tomadas de decisões para todos os cenários, utilizando a energia solar.	64
Tabela 9 – Parâmetros de entrada para o cenário otimista de energia solar.	67
Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o cenário pessimista de energia solar.	69
Tabela 11 – Parâmetros de entrada para o cenário comum de energia eólica.	71
Tabela 12 – Possíveis tomadas de decisões para todos os cenários utilizando energia eólica.	71
Tabela 13 – Parâmetros de entrada para o cenário otimista de energia eólica.	73
Tabela 14 – Parâmetros de entrada para o cenário pessimista de energia eólica.	75
Tabela 15 – Parâmetros de entrada para o cenário comum de energia de biomassa.	76
Tabela 16 – Possíveis tomadas de decisões para todos os cenários utilizando energia de biomassa.	77
Tabela 17 – Parâmetros de entrada para o cenário otimista de energia de biomassa.	79
Tabela 18 – Parâmetros de entrada para o cenário pessimista de energia de biomassa.	81
Tabela 19 – Custos totais da simulação do cenário comum resultantes da fonte de energia solar.	95
Tabela 20 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia solar em horas.	96
Tabela 21 – Custos totais da simulação do cenário otimista resultantes da fonte de energia solar.	98
Tabela 22 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia solar em horas.	99
Tabela 23 – Custos totais da simulação do cenário pessimista resultantes da fonte de energia solar.	101

Tabela 24 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia solar em horas. . . . .	102
Tabela 25 – Custos totais da simulação do cenário comum resultantes da fonte de energia eólica. . . . .	104
Tabela 26 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia eólica em horas. . . . .	105
Tabela 27 – Custos totais da simulação do cenário otimista resultantes da fonte de energia eólica. . . . .	107
Tabela 28 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia eólica em horas. . . . .	108
Tabela 29 – Custos totais da simulação do cenário pessimista resultantes da fonte de energia eólica. . . . .	110
Tabela 30 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia eólica em horas. . . . .	111
Tabela 31 – Custos totais da simulação do cenário comum resultantes da fonte de energia de biomassa. . . . .	113
Tabela 32 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia de biomassa em horas. . . . .	114
Tabela 33 – Custos totais da simulação do cenário otimista resultantes da fonte de energia de biomassa. . . . .	116
Tabela 34 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia de biomassa em horas. . . . .	117
Tabela 35 – Custos totais da simulação do cenário pessimista resultantes da fonte de energia de biomassa. . . . .	119
Tabela 36 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia de biomassa em horas. . . . .	120





## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>U</i>	Urânio
<i>Pu</i>	Plutônio
<i>CO<sub>2</sub></i>	Gás Carbônico
<i>H<sub>2</sub></i>	Hidrógeno
<i>H2V</i>	Hidrogênio Verde
<i>DES</i>	Simulação de Eventos Discretos
<i>kg</i>	Quilogramas
<i>L</i>	Litros
<i>kWh</i>	Quilowatt-hora
<i>US\$</i>	Dólares
<i>t</i>	Tempo
<i>SCM</i>	Supply Chain Management
<i>PEM</i>	Membrana de Troca de Prótons

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>21</b>
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>21</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>21</i>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Análise bibliométrica</b>	<b>23</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Produção científica no Brasil em relação ao tema H<sub>2</sub>V</i>	<i>28</i>
<b>2.2</b>	<b>Simulação e modelagem</b>	<b>31</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Simulação de sistemas a eventos discretos</i>	<i>33</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Simulação como ferramenta para tomada de decisões</i>	<i>34</i>
<b>2.3</b>	<b>Logística e armazenamento</b>	<b>35</b>
<b>2.4</b>	<b>Cadeia de suprimentos</b>	<b>36</b>
<b>2.5</b>	<b>Simulação de cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V</b>	<b>37</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Softwares de simulação</i>	<i>39</i>
<b>2.6</b>	<b>Demanda do hidrogênio</b>	<b>39</b>
<b>2.7</b>	<b>Processos tecnológicos para produção do hidrogênio</b>	<b>41</b>
<b>2.8</b>	<b>Armazenamento do hidrogênio</b>	<b>43</b>
<b>2.9</b>	<b>Modalidades de transporte para o hidrogênio verde</b>	<b>45</b>
<b>2.10</b>	<b>Custos da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde</b>	<b>47</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Revisão de literatura</b>	<b>52</b>
<b>3.2</b>	<b>Software de Simulação</b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>Coleta e análise dos dados</b>	<b>53</b>
<b>3.4</b>	<b>Concepção e implementação do modelo da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V</b>	<b>53</b>
<b>3.5</b>	<b>Construção dos cenários otimista, pessimista e normal</b>	<b>53</b>
<b>3.6</b>	<b>Modelo conceitual para a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V</b>	<b>54</b>
<i>3.6.1</i>	<i>Construção dos cenários</i>	<i>55</i>

3.7	Verificação do modelo de simulação . . . . .	57
3.8	Implementação dos cenários A, B e C . . . . .	57
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>59</b>
4.1	Modelagem da cadeia de suprimentos do H <sub>2</sub> V utilizando o Arena Simulation . . . . .	59
4.2	Processos produtivos, recursos e prioridades relacionados aos custos na cadeia de suprimentos do H <sub>2</sub> V. . . . .	61
4.3	Cenário A - Comum - Energia Solar . . . . .	63
4.4	Cenário A - Otimista - Energia Solar . . . . .	66
4.5	Cenário A - Pessimista - Energia Solar . . . . .	68
4.6	Cenário B - Comum - Energia Eólica . . . . .	70
4.7	Cenário B - Otimista - Energia Eólica . . . . .	72
4.8	Cenário B - Pessimista - Energia Eólica . . . . .	74
4.9	Cenário C - Comum - Energia de Biomassa . . . . .	76
4.10	Cenário C - Otimista - Energia de Biomassa . . . . .	79
4.11	Cenário C - Pessimista - Energia de Biomassa . . . . .	80
5	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE A – . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE B – . . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE C – . . . . .</b>	<b>100</b>
	<b>APÊNDICE D – . . . . .</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE E – . . . . .</b>	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE F – . . . . .</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE G – . . . . .</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICE H – . . . . .</b>	<b>115</b>
	<b>APÊNDICE I – . . . . .</b>	<b>118</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

A busca constante por formas energéticas sustentáveis torna-se alvo de debates frequentes, pois envolve suprir uma demanda populacional crescente e, conseqüentemente, reduzir os impactos ambientais. Esses impactos são ocasionados, em grande escala, pela utilização de fontes não renováveis, o que resulta em uma perspectiva voltada para os meios renováveis de energia. Isso acompanha diversas necessidades, como avanços tecnológicos e incentivos às formas alternativas, fatores que estão diretamente conectados a investimentos econômicos, visando uma matriz energética renovável e verdadeiramente sustentável (GUEDES, 2020).

Nessa perspectiva, a importância imediata da diversificação da matriz energética representa um grande desafio em escala global. Tal necessidade deve-se à poluição, à iminência do esgotamento dos combustíveis fósseis até o ano 2050, aos perigos associados à produção de energia nuclear e às emissões de CO<sub>2</sub> (gás carbônico) resultantes dos processos de geração de energia de outras fontes convencionais. Diante desse cenário, torna-se indispensável um maior investimento em fontes renováveis com o objetivo de alcançar a descarbonização e a transição energética (VELANDIA, 2018).

Considerando a importância da utilização de energias renováveis em relação às fontes tradicionais, com ênfase na sustentabilidade, descarbonização e mitigação do efeito estufa, torna-se evidente a necessidade de promover o uso de fontes alternativas e renováveis, como a energia solar, eólica e de biomassa. Dado que as principais emissões de CO<sub>2</sub> estão diretamente ligadas às indústrias e às diversas modalidades de transporte, é essencial direcionar a atenção para esses setores. Isso torna ainda mais atrativa a utilização de tecnologias renováveis como principal alvo para a descarbonização. Essas fontes são abundantes e consideradas meios de produção energética limpos. No entanto, essa questão demanda maiores investimentos em pesquisa, visando o desenvolvimento de formas eficientes para a utilização de tais recursos (EPE, 2021a)

## 1.2 Justificativa

A busca por meios energéticos renováveis tornou-se uma das grandes questões da atualidade, pois está diretamente relacionada ao crescimento populacional e à crescente necessidade de recursos, em particular a energia elétrica, amplamente utilizada em todos os setores, incluindo segmentos importantes como a indústria, onde é essencial para processos de manufatura e produção. Um dos propósitos associados a essa questão energética está ligado ao efeito estufa, causado pela emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, culminando no aumento da temperatura, principalmente devido à predominância de fontes não renováveis como combustíveis fósseis, carvão, gás natural, urânio (U) e plutônio (Pu) para suprir a demanda energética atual. Estes últimos enfrentam desafios logísticos reversos complexos e custos elevados (PARENTE, 2018).

Segundo Leão (2019), a substituição das fontes de energia fósseis por fontes de energia renováveis permitirá a redução da poluição, fator que diminuirá os efeitos na camada de ozônio, além da redução direta na emissão de CO<sub>2</sub>. O gás carbônico é diretamente responsável pelo efeito estufa, além de contribuir diretamente para o aumento da temperatura no planeta. Diante de fatores de magnitude tão significativa, torna-se cada vez mais importante o investimento em pesquisas relacionadas à obtenção de energias limpas.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética EPE (2022), as previsões indicam um aumento de aproximadamente de 2,9% anual na capacidade de produção de energia renovável, com ênfase em um crescimento de 6,7% para fontes de energia solar, eólica e biomassa para os próximos dez anos. Espera-se, no âmbito nacional, que a matriz energética renovável brasileira compreenda cerca de 48% de toda a produção energética até 2031. Diante desse contexto, tornou-se indispensável para o setor energético um maior investimento em pesquisas voltadas para suprir essa demanda.

A preocupação com a sustentabilidade tem despertado principalmente o interesse da comunidade científica. Isso ocorre porque a busca por uma fonte de energia predominantemente limpa e renovável é o grande desafio para a sociedade moderna. Pesquisas relacionadas ao hidrogênio (H<sub>2</sub>) o apresentam como um possível substituto para os combustíveis fósseis no papel de fonte energética dominante, devido a sua abundância e, também, à obtenção do hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) através de processos químicos. Esse elemento é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis (BEZERRA, 2021).

Existem muitas expectativas no que tange o H<sub>2</sub>V no mercado energético global, no entanto, ainda é preciso enfrentar uma série de desafios acerca dessa fonte energética, pois são

necessários investimentos e pesquisas para o desenvolvimento de formas eficientes de produção, armazenamento e distribuição para o desenvolvimento de uma cadeia completa de suprimentos e utilização do H<sub>2</sub>V (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Ao analisar os aspectos relevantes do H<sub>2</sub>V, pode-se evidenciar a importância de um estudo aprofundado sobre esse produto. O processo logístico do H<sub>2</sub>V exerce um papel fundamental no sucesso dessa fonte energética. Embora existam muitas conjecturas sobre a importância energética do hidrogênio verde como uma futura fonte de energia, ainda há um longo caminho a percorrer para sua utilização de forma adequada, nos mercados nacional e internacional (MEHR *et al.*, 2024).

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho é contribuir para o setor energético construindo, especificamente, um modelo de simulação que permita criar a cadeia de suprimentos do hidrogênio verde. Isso possibilitará o auxílio na tomada de decisões relacionada à distribuição energética baseada no hidrogênio verde no Estado do Ceará.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 *Objetivo geral***

O presente estudo tem como objetivo geral propor a avaliação de desempenho da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde baseada em simulação de sistemas a eventos discretos.

#### **1.3.2 *Objetivos específicos***

O presente trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

1. Mapear as atividades da cadeia logística do hidrogênio verde, possibilitando a modelagem e a simulação das atividades desenvolvidas;
2. Construir modelos de simulação computacional para o processo da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde;
3. Analisar a cadeia de suprimentos simulando cenários em distintos contextos do mercado, de acordo com a demanda;
4. Desenvolver uma base de dados para subsidiar o processo de tomada de decisão na cadeia de suprimentos do hidrogênio verde.

## 1.4 Estrutura do trabalho

O projeto é composto por seis capítulos, descritos a seguir: No Capítulo 1, apresenta-se uma breve introdução do tema, justificativa para a realização do trabalho, bem como o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa. O Capítulo 2 aborda a revisão da literatura, contemplando a bibliografia atual relacionada ao tema em discussão, incluindo os tópicos de simulação, cadeia de suprimentos e hidrogênio verde, este último dividido em tipos de H<sub>2</sub>V, processos tecnológicos e tipos de armazenamento. O Capítulo 3 detalha a metodologia adotada na pesquisa, servindo como base para a concepção e implementação do projeto. No Capítulo 4 são apresentados os resultados e expostas as discussões provenientes da investigação realizada ao longo do trabalho, incluindo a apresentação dos cenários simulados e suas respectivas abordagens e condições. O Capítulo 5 oferece uma perspectiva sobre o H<sub>2</sub>V, destacando sua relevância como forma de energia renovável e sua importância na redução das emissões de CO<sub>2</sub> e seus impactos. São delineados os objetivos alcançados em cada etapa, discutidas as dificuldades encontradas e sugeridas diretrizes para trabalhos futuros, visando auxiliar na tomada de decisão pelos gestores no Estado do Ceará.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Análise bibliométrica

A análise bibliométrica utiliza métodos matemáticos e estatísticos para filtrar dados, proporcionando credibilidade à pesquisa. Este método considera fatores como qualidade, produtividade e impacto do tema estudado, todos relacionados aos documentos (CASTRO *et al.*, 2024). O estudo propõe aprofundar o conhecimento necessário para a utilização dessa forma de energia com o objetivo principal de empregar parâmetros que auxiliem na análise dos dados investigados, contribuindo para o avanço do conhecimento e da aplicação prática do H<sub>2</sub>V como fonte energética (CARDOSO, 2022).

O contexto da pesquisa destaca pontos como formas de obtenção de energia, produção de hidrogênio, modelagem da cadeia de suprimentos, transporte, armazenamento e simulação, todos relacionados ao H<sub>2</sub>V. Para a análise dos dados deste estudo, foi utilizado o *software bibliometrix*, e a compilação foi realizada com a linguagem de programação R (SANTOS, 2022b).

Com isso, definiram-se os parâmetros de investigação, incluindo a data de pesquisa em 07/05/2024 e as restrições para o refinamento da busca: documentos escritos em inglês, incluindo artigos científicos e de revisão, em sua versão final até o ano de 2024. Na Tabela 1 são apresentadas as palavras-chave pesquisadas e a quantidade de documentos retornados por cada uma (BEZERRA *et al.*, 2022).

Tabela 1 – Termos pesquisados e quantidade de documentos retornados referentes ao H<sub>2</sub>V.

<b><i>Termos pesquisados</i></b>	<b><i>Quantidade de documentos</i></b>
<i>"Green Hydrogen"AND"Simulation"</i>	421
<i>"Green Hydrogen"AND"Logistics"</i>	37
<i>"Green"AND"Hydrogen"AND"Logistics"</i>	95
<i>"Supply Chain"AND"Green Hydrogen"</i>	161
<i>"Transport"AND"Green hydrogen"AND"Logistics"</i>	15

Fonte: Autor (2024)

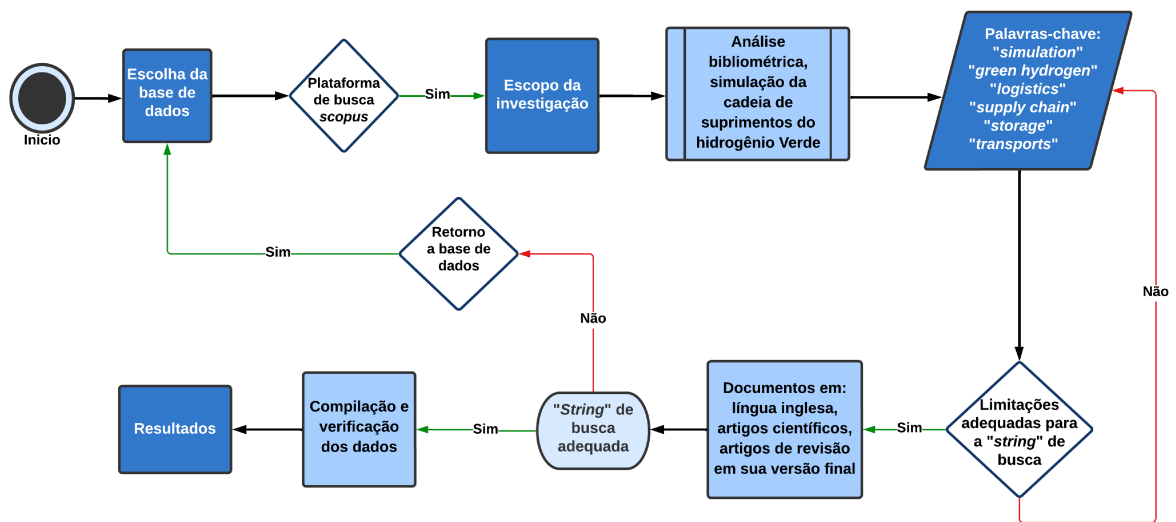
A investigação utilizou a plataforma *Scopus* como referência de busca e realizou uma análise bibliométrica para identificar as produções relacionadas ao tema. Inicialmente foram encontrados 729 artigos científicos pertinentes ao estudo e, em seguida, 79 artigos duplicados foram removidos com base nos parâmetros estabelecidos, resultando em um total de 650 artigos filtrados para análise. Esses dados foram tratados para obter um conjunto mais adequado ao



estudo do tema. A pesquisa considerou o período de 2013 a 2024 como critério de busca (CASTRO *et al.*, 2024).

Na Figura 1 são apresentados os parâmetros de pesquisa utilizados para obtenção dos respectivos dados. A partir da pesquisa realizada, observa-se que o estudo referente ao H<sub>2</sub>V ainda encontra-se em fase de desenvolvimento. Essa questão torna-se evidente ao analisar o estudo bibliométrico. Conforme ilustrado na Figura 2, a maioria das publicações sobre hidrogênio verde começou a crescer a partir de 2019, atingindo seu pico entre 2021 e 2024 (FERNANDES, 2020).

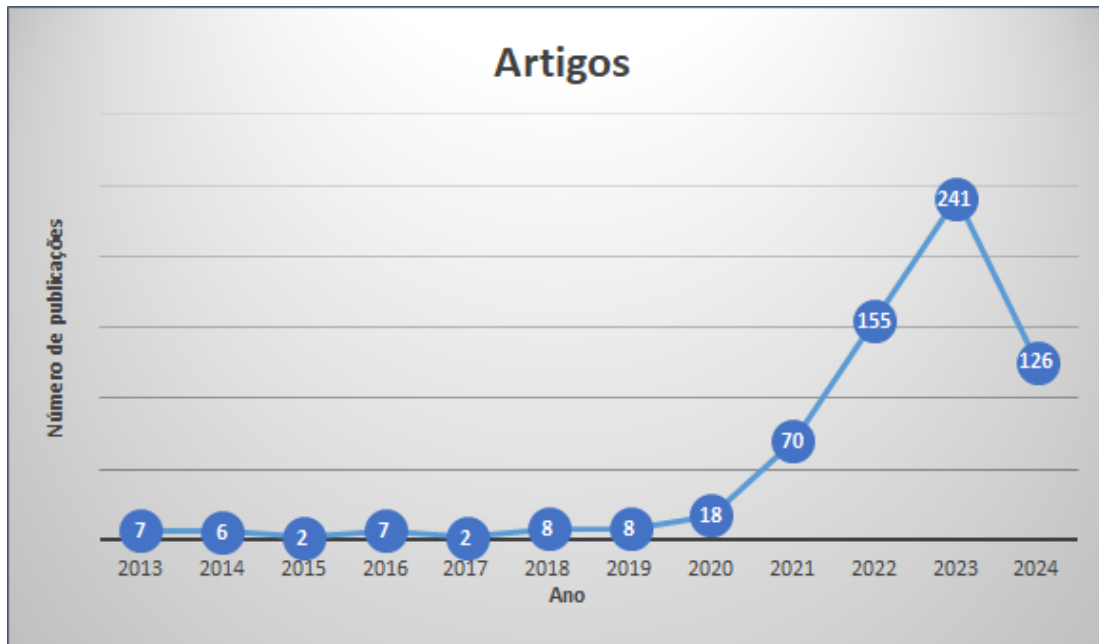
Figura 1 – Fluxograma da análise bibliométrica.



Fonte: Autor (2024)

De acordo com a Figura 2, pode-se observar a evolução das publicações relacionadas ao tema H<sub>2</sub>V. Essas publicações começaram em 2013, com 7 artigos publicados. Entre 2020 e 2024, o número de publicações atingiu 241, demonstrando um crescimento exponencial no interesse da comunidade científica pelo tema H<sub>2</sub>V (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Esses dados refletem o aumento do conhecimento e da pesquisa no campo do hidrogênio verde. Segundo as informações do período que compreendem os anos de 2013 a 2024, observa-se um aumento significativo das publicações sobre hidrogênio verde, devido à crescente conscientização acerca das necessidades e dos potenciais benefícios de uma fonte de energia renovável e abundante.

Figura 2 – Gráfico anual de produção científica em relação ao tema hidrogênio verde a nível mundial.



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 3 são apresentadas, de forma crescente, as palavras mais utilizadas em publicações nesse período (ABREU *et al.*, 2023). Os termos mais frequentes nas buscas realizadas entre 2013 e 2024, considerando este último ano até o mês de março, incluem as seguintes palavras-chave: produção de hidrogênio, armazenamento de hidrogênio, hidrogênio verde, hidrogênio, cadeia de suprimentos e eletrólise da água (BEZERRA *et al.*, 2022).

Figura 3 – Palavras-chave utilizadas com maior frequência em pesquisas referentes ao tema H<sub>2</sub>V pelo mundo.



Fonte: Autor (2024)

As publicações de alguns pesquisadores sobre H<sub>2</sub>V têm se destacado mundialmente, visto que suas produções científicas despertam maior interesse em comparação com as de nível nacional e internacional. Após a análise bibliométrica, foi possível identificar alguns autores com maior nível de produtividade. Na Tabela 2 são apresentados os dez autores com maior número de publicações em relação ao tema H<sub>2</sub>V entre os anos de 2013 e 2024 (ROSADO, 2018).

Tabela 2 – Os dez principais autores dos artigos analisados segundo o número de publicações referentes ao tema H<sub>2</sub>V.

Autor	Índice H	NP	TC	AC	PY_start
LI Y	6	12	234	19,50	2018
KANG S	6	7	386	55,14	2020
JANG D	5	7	341	48,71	2021
KIM K	5	7	230	32,86	2020
WANG J	5	7	77	11,00	2022
BACCIOLIA A	4	4	37	9,25	2021
CHO H	4	5	172	34,40	2021
GUERREIRO J	4	4	99	24,75	2021
KIM J	4	8	223	27,88	2020
LEE S	4	4	58	14,50	2022

Fonte: Autor (2024)

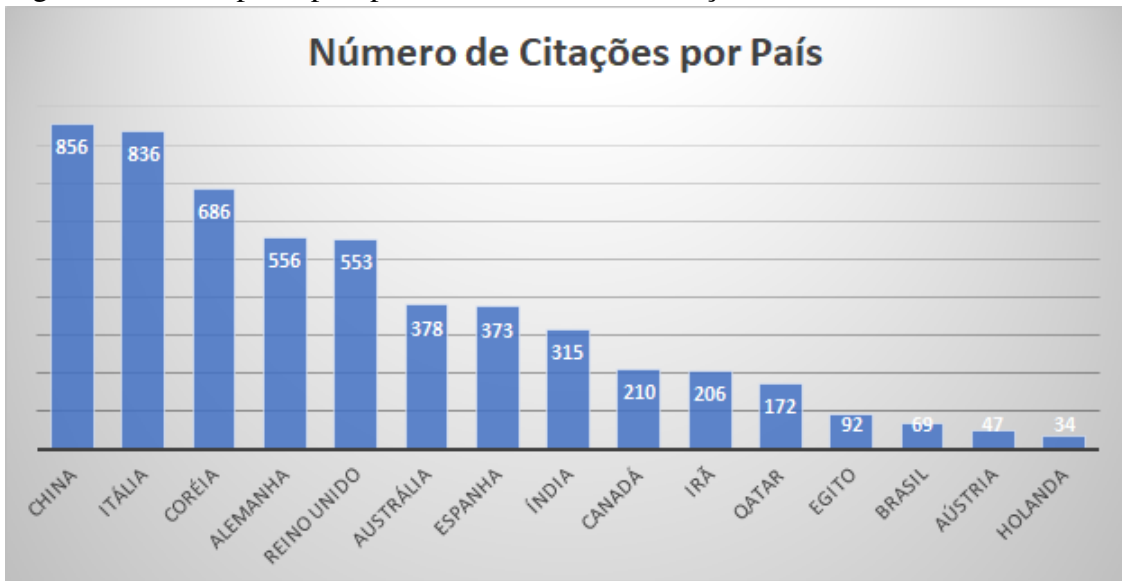
Legenda: H - índice H, TC - total de citações, NP - número de publicações, AC - Average Citation (TC/NP) representa a média de citações por artigo, *PY\_start* - Ano de início das publicações.

De acordo com a Figura 4, é possível observar os países com o maior número de citações. Entre os cinco primeiros destacam-se China, Itália, Coreia do Sul, Estados Unidos e Alemanha. Esses países evidenciam a importância de investimentos acadêmicos e tecnológicos em relação a outras fontes de energia renovável (ALVES *et al.*, 2022).

Entre os países destacados, é importante observar a China não apenas devido à sua alta população, que necessita de grandes quantidades de energia, mas também pela carência de meios renováveis para atender a essa demanda crescente. Tal demanda é suprida, nos dias atuais, principalmente pelo uso de termelétricas, tornando essencial a busca por substituição e a adoção de fontes renováveis (LIAO *et al.*, 2016).

Quanto aos países com potencial para a produção de energias renováveis, destacam-se a Alemanha, a França, a Austrália e o Brasil, demonstrando o interesse na utilização de fontes energéticas como solar e eólica para atender à demanda. Isso não apenas estimula a economia, mas também promove a conscientização quanto à sustentabilidade (YANG; LONG, 2024).

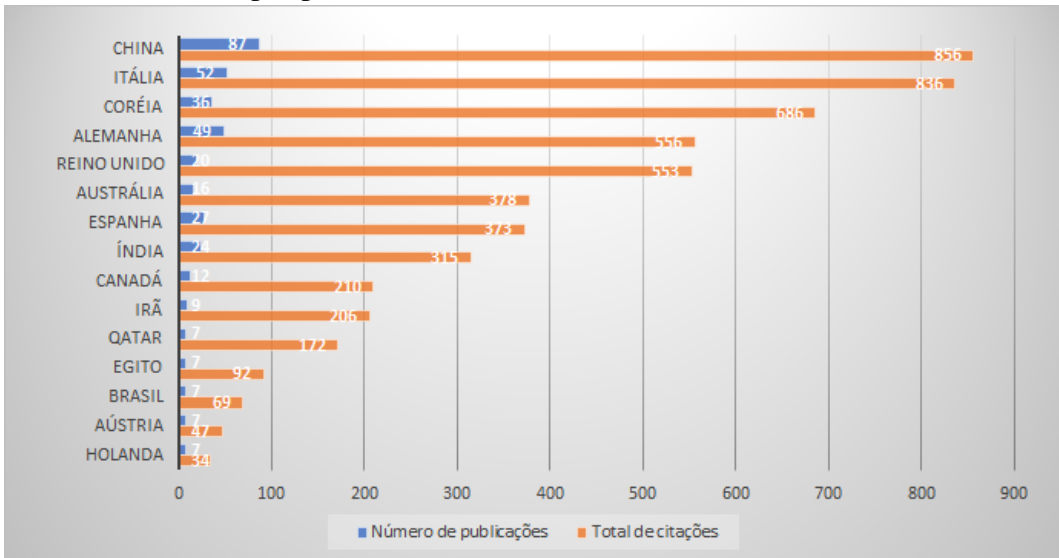
Figura 4 – Os 15 principais países em números de citações referentes ao tema H<sub>2</sub>V.



Fonte: Autor (2024)

De acordo com a Figura 5, a análise bibliométrica da produção científica dos países por autor, referente ao H<sub>2</sub>V, nos permite observar as crescentes contribuições no que diz respeito às publicações sobre o assunto no período de 2013 a 2024. É possível destacar os 15 principais países, e seus respectivos autores, quanto à investigação documental referente à produção científica do tema H<sub>2</sub>V (HANNAN *et al.*, 2022).

Figura 5 – Relação científica referente ao número de publicações e citações dos autores por país.



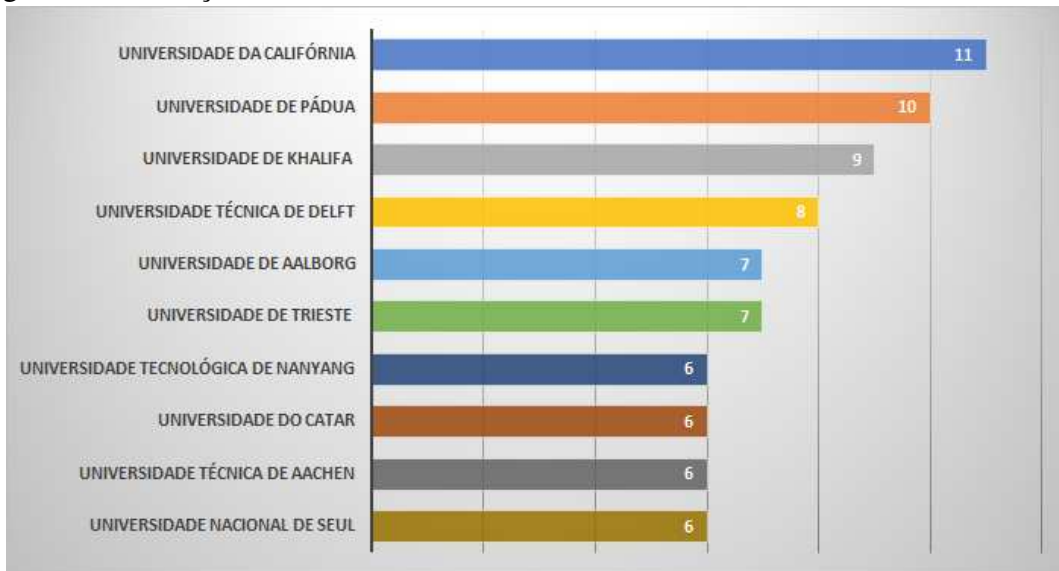
Fonte: Autor (2024)

Destacam-se como principais países: China, Itália, Coreia do Sul, Alemanha e Reino Unido, que contribuem com 244 documentos, representando 66,57% de toda a produção

científica global no estudo relacionado ao H<sub>2</sub>V. É importante ressaltar que o estudo utilizou como parâmetros de pesquisa os 15 principais países com o maior número de publicações, atualmente focadas no tema H<sub>2</sub>V (ARSAD *et al.*, 2023).

As universidades com maior relevância em relação às produções acadêmicas são apresentadas na Figura 6. Observa-se que países como China, Alemanha, Itália e Coreia do Sul têm feito grandes investimentos no tema H<sub>2</sub>V, aumentando cada vez mais o financiamento em pesquisas. Isso se torna um fator de grande importância para o futuro, especialmente no que diz respeito a financiamentos e investimentos nessa área de estudo (MATOS *et al.*, 2021).

Figura 6 – Produção científica das universidades internacionais referente ao tema H<sub>2</sub>V.



Fonte: Autor (2024)

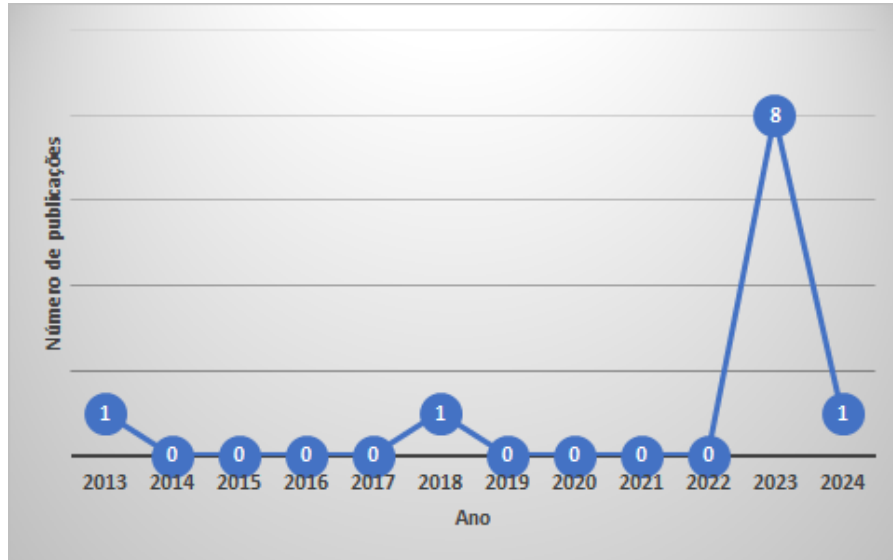
### 2.1.1 Produção científica no Brasil em relação ao tema H<sub>2</sub>V

O Brasil possui um dos maiores potenciais energéticos do mundo em relação às energias renováveis como solar, eólica e de biomassa. Isso coloca o país entre os mais promissores para o desenvolvimento de formas de obtenção do H<sub>2</sub>V. O estudo sobre hidrogênio é um tema que vem sendo abordado desde 2013 porém, apenas a partir de 2019, ganhou proporções mundiais como um possível substituto dos combustíveis fósseis (EPE, 2019).

As pesquisas relacionadas ao tema H<sub>2</sub>V estão em ascensão em todo o mundo. No entanto, ao compararmos o Brasil com outros países de maior produção científica, observamos que o desenvolvimento acadêmico brasileiro, em relação ao H<sub>2</sub>V, está progredindo em um ritmo mais lento. Outros países estão mais avançados no desenvolvimento dessa pesquisa. Pode-se

analisar o gráfico, na Figura 7, referente à produção acadêmica do tema H<sub>2</sub>V no cenário brasileiro, tendo início no ano de 2013 e atingindo o seu pico em de 2023 (SANTOS, 2022b).

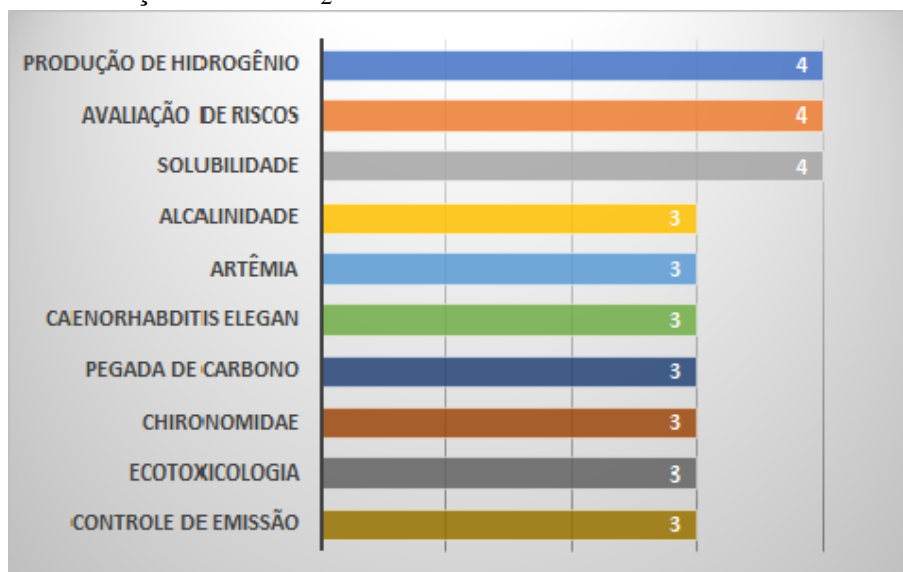
Figura 7 – Evolução da produção científica relacionada ao tema H<sub>2</sub>V no Brasil.



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 8 são apresentados, de forma crescente, os termos mais utilizados em pesquisas acadêmicas no Brasil, referentes ao H<sub>2</sub>V, no período entre 2013 e 2024. Sobre a pesquisa realizada utilizando análise bibliométrica, destacam-se os principais termos: produção de hidrogênio, avaliação de riscos, alcalinidade e artêmia (EPE, 2019).

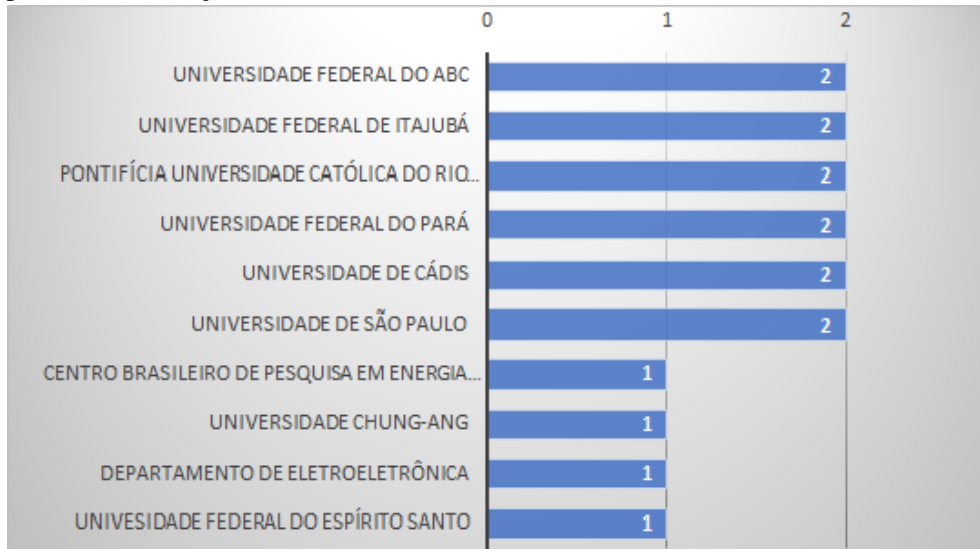
Figura 8 – Palavras-chave utilizadas com maior frequência por pesquisadores brasileiros em relação ao tema H<sub>2</sub>V.



Fonte: Autor (2024)

As universidades brasileiras com maior relevância, quanto às produções acadêmicas, são apresentadas na Figura 9. Observar-se que o tema H<sub>2</sub>V ainda necessita de estudos, especialmente no âmbito nacional, considerando o potencial energético do país.

Figura 9 – Produção científica das universidades brasileiras referente ao tema H<sub>2</sub>V.



Fonte: Autor (2024)

A partir do estudo realizado, é notória a necessidade de investimentos significativos em pesquisas, em nível nacional e internacional, relacionadas ao H<sub>2</sub>V. É fundamental desenvolver formas adequadas de utilização dessa fonte de energia, especialmente investindo em pontos críticos da cadeia de suprimentos, como o armazenamento, onde atualmente há grandes deficiências. Esta questão vem dificultando a utilização dessa energia, o que possivelmente permitirá a substituição das fontes não renováveis, como as energias fósseis e nucleares (PARENTE, 2018).

Os investimentos em formas de obtenção de energias renováveis têm mostrado grande relevância, uma vez que a necessidade de outros meios energéticos para suprir a demanda mundial é cada vez mais iminente. Apesar do crescimento das pesquisas relacionadas ao H<sub>2</sub>V, ainda há um longo caminho a percorrer em termos de estudos nessa área e, conseqüentemente, uma necessidade de maiores investimentos em pesquisas acadêmicas. Somente por meio de estudos mais aprofundados será possível alcançar uma utilização segura e viável dessa forma de energia (FARO *et al.*, 2022).

## 2.2 Simulação e modelagem

Segundo Montevechi *et al.* (2013), a simulação pode ser caracterizada como a representação fiel de um sistema por meio do desenvolvimento de uma modelagem específica. Ela pode ser descrita como a reprodução de um problema específico, sendo uma ferramenta presente em diversos tipos de sistemas. A simulação pode apresentar uma ampla variedade de combinações e é utilizada em uma diversidade de setores, incluindo construção civil e indústrias, dependendo do tipo de cenário. A modelagem pode ser classificada em três formas distintas: modelos de opinião, modelos matemáticos estáticos e modelos de simulação, todos com o propósito de otimizar problemas associados a sistemas dinâmicos e estocásticos, como mencionados a seguir:

- Modelos de opinião: Podem ser definidos como modelos que dependem de hipóteses. São frequentemente utilizados quando não se dispõe de dados significativos para avaliar alternativas em determinados contextos. No entanto, para esse tipo de abordagem, existe a possibilidade de gerar mais dúvidas do que soluções efetivas.
- Modelos matemáticos estáticos: São definidos com base em suas características operacionais, nas quais um sistema pode ser descrito por meio de equações matemáticas, podendo ser dividido em comportamento e desempenho. Nesse tipo de modelo, as variáveis individuais são utilizadas para representar diferentes aspectos do sistema.
- Modelos de simulação: Esta modelagem utiliza equações matemáticas para representar as características de cada sistema distinto. Aspectos como comportamento e desempenho têm um impacto direto em toda a simulação, podendo variar conforme a quantidade de atributos alocados. É importante ressaltar que esse modelo utiliza eventos, que ocorrem em pequenos intervalos de tempo, e podem modificar os valores de todo um sistema produtivo. Esta última característica apresentada é a diferença entre o modelo estático e o modelo de simulação.

Ainda em relação à modelagem, é importante destacar que, mesmo com as variações de modelos matemáticos, modelar é um processo complexo. Surge de uma necessidade específica, onde o detalhamento do início dessa demanda é essencial, assim como o desenvolvimento e a conclusão da modelagem. São necessárias inúmeras etapas para a aplicação de cada uma das distintas modelagens, que podem variar conforme a necessidade de mudanças ocasionadas por possíveis tomadas de decisão (FAGUNDES *et al.*, 2021).

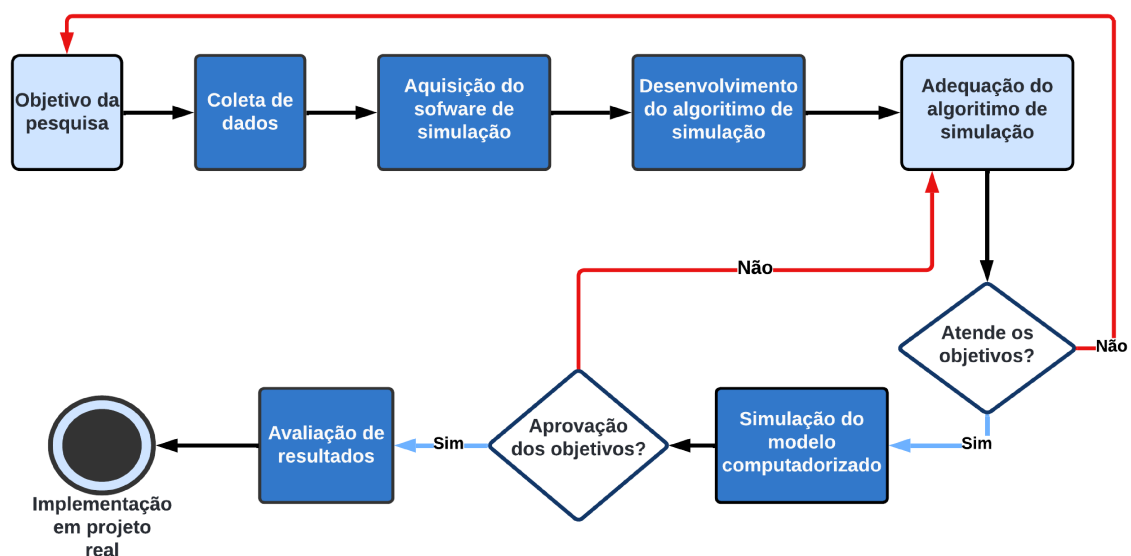


Ao compreender as características de uma problemática e desenvolver a modelagem, busca-se verificar as possibilidades conforme os requisitos. Nesse contexto, surge a necessidade de um recurso específico, como uma ferramenta computacional ou simulação, que tem como finalidade a resolução de diversas complicações em várias áreas. Além disso, é um recurso que proporciona auxílio na tomada de decisões em diversas áreas como, por exemplo, na engenharia e em vários tipos de sistemas produtivos (GREGÓRIO; LOZADA, 2019).

É fundamental compreender bem as ferramentas de modelagem e simulação, pois são essenciais para o sucesso de um processo produtivo. Ao modelar e simular as diversas possibilidades, respeitando suas etapas e características, é possível obter resultados promissores. Esses resultados podem influenciar diretamente na satisfação do cliente e, por consequência, no sucesso da cadeia produtiva de uma empresa em atender a essa necessidade de maneira satisfatória (SANTOS, 2022a).

As etapas para a implementação da modelagem e simulação podem variar de acordo com o propósito do modelo computacional. Para utilizar essa ferramenta, são necessárias diversas informações, como os custos dos insumos utilizados, as formas de produção, as possíveis formas de armazenamento e as rotas de transporte, entre outras considerações específicas da cadeia de suprimentos. Geralmente é realizada uma série de estudos para construir a modelagem e executar a simulação. Na Figura 10 é ilustrado um fluxograma que apresenta os estágios necessários para realizar uma simulação (MONTEVECHI *et al.*, 2013).

Figura 10 – Etapas de desenvolvimento de um estudo de simulação.



Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2013)

A partir dessas informações é possível obter inúmeros benefícios como:

- Possibilidade de modelagem e simulação em um cenário real;
- Uma ampla visão em relação à parte sistêmica das operações;
- Antecipação do comportamento do sistema, frente a situações de alto risco;
- Redução de custos operacionais, viabilizando o projeto.

### ***2.2.1 Simulação de sistemas a eventos discretos***

Segundo Chwif e Medina (2006), a classificação dos modelos de simulação é realizada de forma distinta, variando conforme suas particularidades e exigências específicas. Essa divisão categoriza a simulação em três tipos principais: Simulação de Monte Carlo, Simulação Contínua e Simulação de Eventos Discretos. Cada uma dessas ferramentas de emulação é descrita, apresentando suas respectivas aplicações, como mencionadas a seguir:

- Simulação de Monte Carlo: Este método de simulação tem como principal propósito a utilização de dados aleatórios gerados de acordo com cada uma das necessidades. Ao obter essas informações, o método visa atender as necessidades complexas envolvendo sistemas físicos ou matemáticos, sem considerar diretamente, ou de forma variável, a dimensão temporal.
- Simulação de Eventos Contínuos: Este método de simulação tem como finalidade a modelagem diretamente ligada à variação do tempo, e tem como característica as equações diferenciais, utilizando os cálculos derivados desse método matemático para o desenvolvimento das mudanças e das variáveis de estado ao longo do tempo.
- Simulação de Eventos Discretos: Este método leva em consideração o estado do sistema ao longo do tempo. Havendo, assim, a necessidade de uma modelagem estrutural diretamente vinculada a eventos temporais, com ocorrências dependentes de eventos específicos.
- Simulação Combinada ou Híbrida: Quando há situações que requerem o uso de métodos envolvendo tanto a simulação de eventos contínuos quanto a simulação de eventos discretos, utiliza-se a chamada simulação híbrida. Essa modelagem é desenvolvida para compreender aspectos de ambas abordagens, considerando que é necessária uma particularidade distinta para o propósito do estudo, o que torna esse método raro de ser utilizado.

Ainda de acordo com Chwif e Medina (2006), em relação aos métodos apresentados, será descrita de maneira mais aprofundada a simulação de eventos discretos (DES), pois possui muitas finalidades. Este método é amplamente utilizado em dois grandes setores: manufatura e

serviços. Suas aplicações abrangem diversas áreas como supermercados, bancos, aeroportos, hospitais e cadeias logísticas, todos dependentes da análise de estoques, dos sistemas de movimentação, da armazenagem e das linhas de montagem. Isso demonstra a importância dessa ferramenta na simulação.

Para utilizar o DES, é necessário entender a problemática a ser simulada. Com esse detalhamento será possível desenvolver uma alternativa que forneça resultados viáveis e que possa ser implementada de forma eficiente e segura. Vale ressaltar que a proposta de simulação precisa de algumas variáveis, como o tempo de simulação, que se refere ao período durante o qual o modelo será simulado; contadores, que indicam quantas vezes uma determinada ação deve ocorrer, dependendo das interações necessárias; e variáveis de estado, que são representadas pelas entradas e saídas dos processos, retornando informações a cada modificação do cenário (NASCIMENTO, 2019).

Em relação às vantagens do DES, em comparação a outros métodos de simulação, destacam-se a organização, o monitoramento e a capacidade de emular um sistema real de forma precisa, auxiliando no processo de tomada de decisões. Além disso, o DES não apresenta uma única solução otimista, o que é um detalhe importante. A cada resposta obtida, é possível formular novos cenários dependendo dos parâmetros de entrada, como a formulação de uma cadeia de abastecimento a partir de determinado insumo, com possibilidade de reabastecimento. Essas características podem ser decisivas em processos de gestão, permitindo adaptações conforme as necessidades específicas (MOURTZIS *et al.*, 2014).

Então, com a ferramenta de simulação DES, é possível modelar uma cadeia de suprimentos de hidrogênio verde e, a partir disso, gerar uma estimativa de custos para toda a cadeia produtiva. Isso depende de fatores como a quantidade de etapas e processos, demanda, tipos de matéria-prima, setores operacionais, armazenamento, distribuição e jornada de trabalho. Todos esses elementos podem influenciar diretamente no sistema produtivo, oferecendo inúmeras possibilidades a serem analisadas (MURESAN *et al.*, 2013).

### ***2.2.2 Simulação como ferramenta para tomada de decisões***

Segundo Mações (2017), o processo de tomada de decisões pode ser definido como um método cuja principal finalidade é propor uma ou mais soluções para diferentes contextos ou problemas, por meio da exploração de diversas possibilidades. Esse método pode ser utilizado em uma programação planejada ou não planejada, tanto de forma individual quanto em grupo,

dependendo das circunstâncias e do tempo disponível. A tomada de decisões pode ser dividida em três tipos, sendo:

- Tomada de decisões operacionais: é frequentemente utilizada a curto prazo, dependendo da necessidade imediata da organização;
- Tomada de decisões táticas ou administrativas: é empregada como recurso de gestão entre departamentos, concentrando-se nas unidades de uma empresa ou organização. Geralmente essas decisões têm uma perspectiva de curto prazo;
- Tomada de decisões estratégicas: é utilizada pela alta gestão, envolve as especificidades para desenvolver um determinado produto, ou qual nicho de mercado abordar, para alcançar uma perspectiva de maior lucro. Essas decisões têm características de longo prazo, tornando-se fundamentais para o sucesso e a sustentabilidade da empresa.

De acordo com Kunrath *et al.* (2023), a tomada de decisão pode ser aprimorada por meio de ferramentas de simulação, as quais são amplamente utilizadas em diversos modelos e projetos. Tais ferramentas têm como principal objetivo resolver problemas e buscar soluções para desafios em cadeias de suprimentos, por meio do desenvolvimento e da implementação de *software* específico para cada caso. Essa abordagem permite a obtenção de resultados viáveis para os desafios enfrentados nos sistemas produtivos, contribuindo significativamente para a melhoria dos processos de tomada de decisão.

A utilização da ferramenta de simulação para tomada de decisão tem um impacto significativo na resolução de cenários de alta complexidade, envolvendo características únicas no sistema produtivo, como paradas programadas ou não programadas no abastecimento na cadeia de suprimentos. Isso permite identificar possíveis vulnerabilidades na cadeia produtiva, o que interfere diretamente na produção (GHASEMI *et al.*, 2024).

A partir da análise das hipóteses derivadas dos dados obtidos em diversos processos produtivos, é possível desenvolver estratégias para otimizar os processos e minimizar os problemas no ciclo de fabricação de um produto específico. Essa abordagem resulta na redução de custos para o sistema produtivo. Assim, é viável selecionar o caminho mais adequado de acordo com as exigências de cada projeto distinto (MONTEVECHI *et al.*, 2013).

### **2.3 Logística e armazenamento**

De acordo com Chiavenato (2014), o termo logística desenvolveu-se devido à necessidade da indústria de estocar produtos para suprir uma demanda do mercado. A partir desse

conceito, é possível verificar a importância desse setor, uma vez que indústrias de todos os ramos necessitam estar em constante desenvolvimento em relação aos seus processos. Além disso a logística, assim como outros aspectos, desempenha e influencia diretamente sobre os custos e a produtividade nas indústrias. A preocupação com a redução dos custos visa explorar um sistema eficiente de manuseio do produto a baixo custo.

Segundo Barreto e Nascimento (2022), é possível dividir a logística de duas maneiras distintas: atividades primárias e atividades secundárias. As primárias influenciam diretamente na possibilidade de minimização dos custos e níveis de qualidade dos serviços, compreendem as solicitações das demandas dos clientes, a manutenção de estoques e o transporte. As secundárias, por sua vez, são definidas como operações de apoio, sistemas de informações, manuseio de materiais e armazenagem.

O armazenamento desempenha um papel essencial em qualquer cadeia logística, pois a partir dessa etapa do processo é possível realizar o gerenciamento e a distribuição da produção. Por meio de uma análise detalhada, torna-se possível desenvolver estratégias para a criação de um plano de comercialização. Uma estrutura de armazenamento bem formulada permite um gerenciamento fluido de todo o sistema, além de proporcionar ao produtor melhores condições de mercado, um planejamento mais eficiente e maior estabilidade em relação ao lucro. No entanto, para que o sistema funcione em sua totalidade, é necessário estabelecer uma conexão entre a infraestrutura de armazenamento e os modais de transporte (GUERRINI *et al.*, 2014).

É importante enfatizar que as características das formas de armazenamento podem estar diretamente ligadas ao tipo de insumo ou material que será estocado, influenciando todo o sistema produtivo. Existem particularidades dependendo do estado em que o produto é armazenado, podendo o armazenamento ser dividido em estados sólidos, gasosos e líquidos, cada um com suas distintas e peculiares características, como materiais corrosivos, com odor ou mesmo coloração (DIAS, 2019).

## **2.4 Cadeia de suprimentos**

De acordo com Guerrini *et al.* (2014), uma cadeia de suprimentos (*Supply Chain Management* - SCM) é definida como um conjunto de processos específicos que conectam os clientes aos fornecedores por meio de um sistema integrado, com o objetivo de fornecer produtos e serviços que atendam às necessidades dos clientes. Para alcançar esse objetivo, as organizações utilizam uma variedade de mecanismos para gerenciar todo o fluxo de informações

e, conseqüentemente, a demanda. São empregados sistemas de rastreamento e coordenação das atividades por meio de redes de comunicação para otimizar recursos, como o estoque.

Em relação ao desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos, esta pode ser dividida em três estágios distintos, denominados momentos *upstream*, *midstream* e *downstream*. O momento *upstream* representa o início do sistema produtivo, seguido pelo momento *midstream*, considerado o meio do processo de produção e, por fim, para concluir a cadeia de suprimentos, tem-se o momento *downstream*, que encerra o ciclo. Essa sequência é essencial para o desenvolvimento adequado de uma cadeia de suprimentos completa (KOTAGODAHETTI *et al.*, 2023).

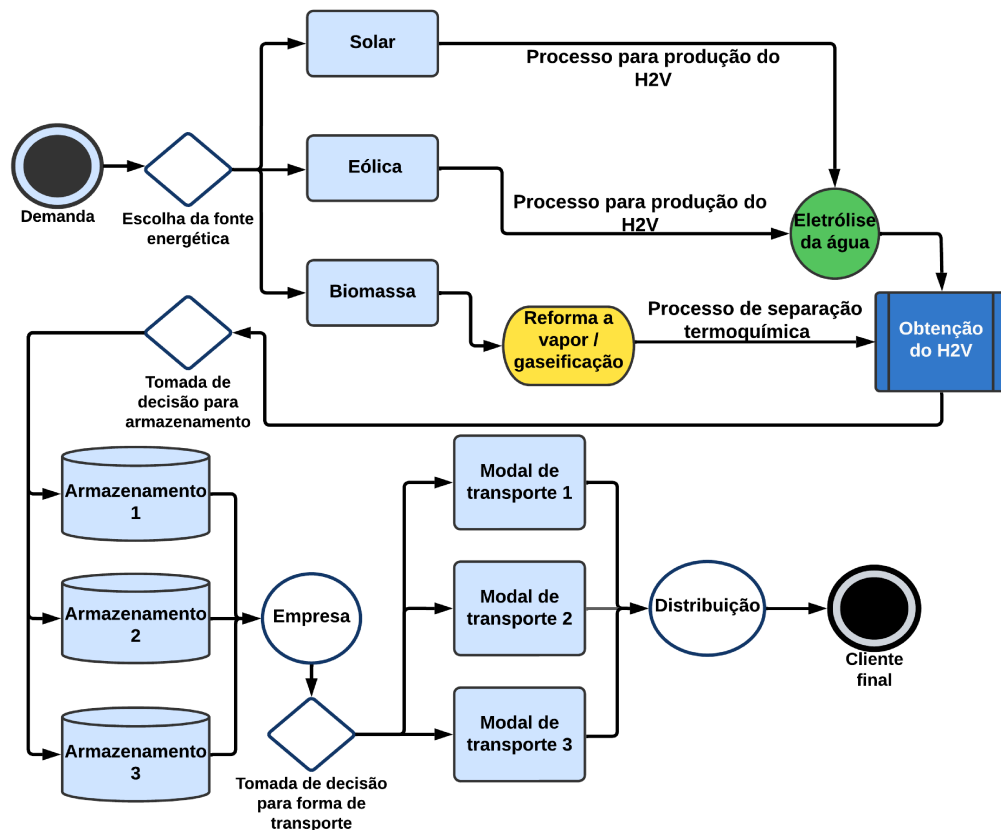
Para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos, é essencial observar cada etapa e suas características de acordo com a necessidade específica. No momento *upstream*, foca-se diretamente na primeira parte do sistema produtivo, associada aos maquinários e insumos necessários para o processo de manufatura. Em seguida, temos o momento *midstream*, que está conectado diretamente ao processo produtivo e refere-se à logística de armazenagem das mercadorias acabadas. Por fim, o momento *downstream* é direcionado à distribuição dos produtos acabados e ao suporte aos clientes (DONATO *et al.*, 2023).

## 2.5 Simulação de cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V

A cadeia de suprimentos desempenha um papel fundamental no processo logístico, pois permite determinar todos os componentes necessários para a criação, execução ou desenvolvimento de um projeto, tanto na construção civil quanto na indústria. A simulação é habitualmente utilizada como ferramenta para modelar inúmeros componentes em diferentes tipos de cadeias logísticas, possibilitando o desenvolvimento de processos que geralmente envolvem alta complexidade ou elevados custos operacionais, o que determina a implementação da modelagem desse determinado cenário (ŠEBALJ, 2022).

A partir dessas informações, é possível realizar diversas formas de simulação, incluindo a replicação de uma cadeia de suprimentos utilizando componentes provenientes de fontes renováveis de energia como solar, eólica e de biomassa. Na Figura 11 é apresentado o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, utilizando as fontes de energia citadas anteriormente e retratando toda a trajetória até o cliente final (FAZLI-KHALAF *et al.*, 2020).

Figura 11 – Fluxograma de uma cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V.



Fonte: Adaptado de Lima (2023)

As vantagens de utilizar a simulação são inúmeras, destacando-se, principalmente, os seguintes benefícios (GREGÓRIO; LOZADA, 2019).

- Possibilidade de simulação com diferentes tipos de insumos;
- Ampla visão em relação a todo o processo produtivo;
- Antecipação de falhas no processo de distribuição;
- Suporte na tomada de decisões através de análise do fluxo de processos.

Para que uma simulação de uma cadeia de suprimentos seja considerada satisfatória, é necessário considerar diversos pontos. Isso ocorre porque a abordagem deve ser adaptada de acordo com o tipo de cadeia, já que cada aspecto influencia diretamente no resultado. Alguns exemplos de variáveis que devem ser consideradas na construção dessa modelagem incluem a análise dos registros dos pontos de distribuição do produto manufaturado, as formas de distribuição e possíveis análises de custos. Esses aspectos possibilitam diferentes modalidades conforme a urgência do cliente, a capacidade de armazenamento dos volumes ou produtos, a estimativa da capacidade de distribuição dos produtos acabados, além do possível suporte ao

cliente (MOELLMANN, 2008).

### 2.5.1 Softwares de simulação

Segundo Oliveira (2019), há diversos tipos de *softwares* de modelagem disponíveis no mercado para a realização de simulações. Portanto, ao escolher um *software* para essa finalidade, é importante considerar as condições e características ideais dos processos em questão. Existem modelos mais práticos e adequados para atender diversas necessidades. Consequentemente, é essencial realizar um estudo de viabilidade da ferramenta de simulação, pois a partir dessas informações será possível atender melhor às exigências.

Na Tabela 3 são apresentados alguns modelos de *softwares* de simulação, bem como as empresas responsáveis por sua criação, desenvolvimento e implementação, de acordo com (GREGÓRIO; LOZADA, 2019).

Tabela 3 – Softwares de simulação.

<b>Software</b>	<b>Empresa</b>
Flexsim	Flexsim Software Products
Arena	Systems Modeling Corporation - Rockwell Software
Promodel	Promodel Corporation
Powersim	Powersim AS
Extend	Extend Software
Stella	High Performance System Incorporation

Fonte: GREGÓRIO e LOZADA (2019)

No presente momento as ferramentas de simulação desempenham um papel fundamental na viabilização de diversos tipos de projetos, possibilitando a criação, o desenvolvimento e melhorias em vários processos de diversas áreas como na indústria, na construção civil e em muitas outras. Incluindo desde o aperfeiçoamento até o desenvolvimento completo de uma cadeia de suprimentos, considerando diferentes métodos e variáveis, como custos e tempo, com o propósito de tornar os processos viáveis (MELO, 2022).

## 2.6 Demanda do hidrogênio

O hidrogênio é um elemento químico encontrado em grandes proporções, podendo ser obtido ou produzido de diversas formas, dependendo do método de aquisição. Essa abundância o transforma em protagonista na busca pela descarbonização e como vetor energético renovável. Isso o torna um elemento importante na pesquisa sobre energias renováveis

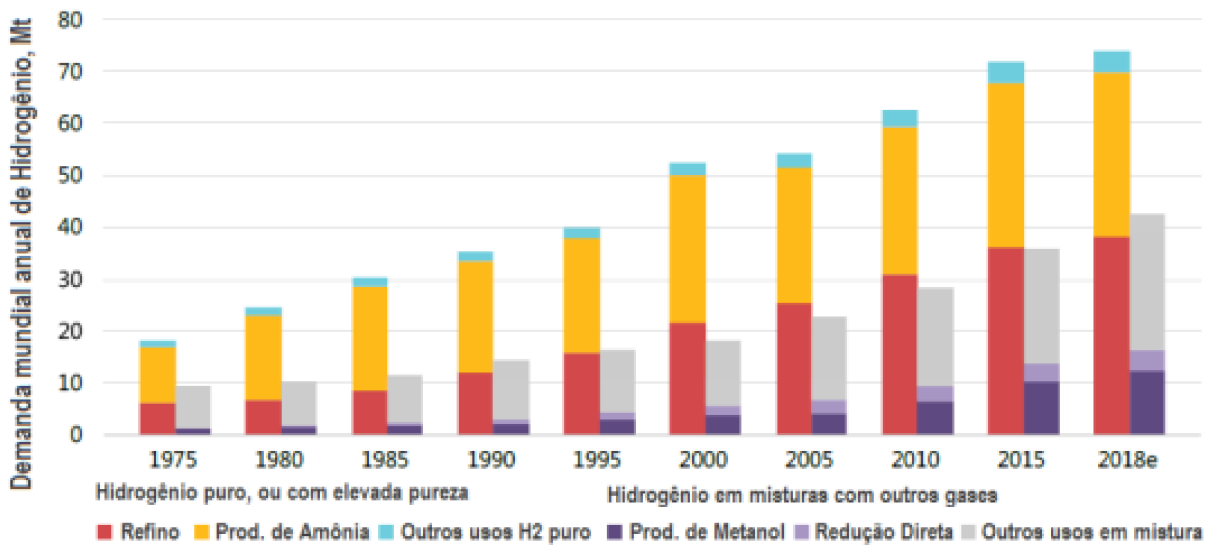


(TOSTADO-VÉLIZ *et al.*, 2022).

Como definido por Moradi e Groth (2019), o H<sub>2</sub> é considerado um possível substituto energético para as fontes fósseis. Com o aumento da demanda por energia em todo o mundo, há grandes expectativas em relação ao hidrogênio verde e aos seus processos de obtenção. Estudos e investimentos relacionados a esse componente estão em curso, e os resultados até o momento são promissores. Acredita-se que o hidrogênio possa se tornar um substituto do petróleo em cerca de 100 anos, dada sua capacidade de suprir as necessidades energéticas.

De acordo com Oliveira (2011), a procura global por hidrogênio é impulsionada pelo desejo de substituir os combustíveis fósseis por uma fonte de energia renovável. O hidrogênio encontra aplicação em diversas indústrias, incluindo a produção de fertilizantes. Na Figura 12 é apresentada a demanda global de hidrogênio ao longo das últimas décadas, podendo ser dividida em: forma pura, com elevada pureza ou misturada com outros gases.

Figura 12 – Crescimento da demanda do hidrogênio.



Fonte: IEA (2019)

A demanda por hidrogênio está em constante crescimento, principalmente devido à necessidade energética. Consequentemente, cresce o interesse das indústrias em investir na produção desse recurso, gerando a necessidade de maiores investimentos em infraestrutura, alinhando-se ao objetivo de favorecer a transição energética para uma economia mais sustentável. Espera-se que essa demanda continue a aumentar à medida que mais indústrias e setores busquem reduzir suas emissões de carbono e atender às metas governamentais de sustentabilidade (EPE, 2021b).

A expectativa de investimentos relacionados à produção de hidrogênio tem despertado um crescente interesse da comunidade, porém ainda há um longo caminho a percorrer para que esse recurso seja amplamente utilizado pela sociedade. Estima-se que a produção de hidrogênio verde alcance um valor de 115 milhões de toneladas até o ano de 2030. No entanto, as previsões para 2050 indicam que esse número pode chegar a 650 milhões de toneladas anuais, o que demandaria um investimento anual de mais de 170 milhões de dólares para alcançar essa meta (SIKIRU *et al.*, 2024).

## 2.7 Processos tecnológicos para produção do hidrogênio

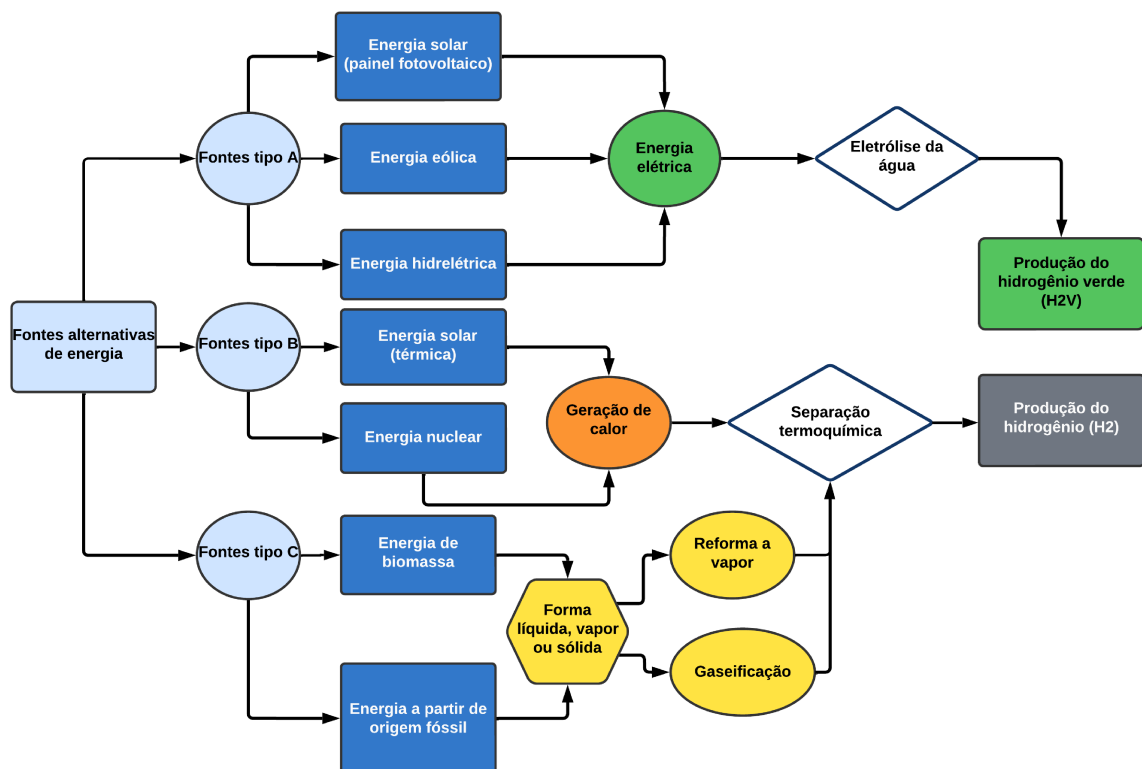
De acordo com Pereira (2022), o processo de obtenção do hidrogênio pode ocorrer de formas distintas, dependendo dos materiais e métodos utilizados na fabricação. Em geral, são realizados processos físico-químicos ou bioquímicos e, a partir de cada tipo de matéria-prima, obtém-se um tipo específico de hidrogênio, classificado em diferentes categorias de acordo com EPE (2021b).

- De cor preta: Nesse método o hidrogênio é gerado a partir do processo de gaseificação, utilizando o carvão mineral antracito como insumo;
- De cor cinza: Nesse método o hidrogênio é criado a partir da utilização do insumo gás natural;
- De cor marrom: Nesse método o hidrogênio de coloração marrom é gerado a partir do processamento do insumo de carvão mineral hulha;
- De cor azul: Nesse método o hidrogênio de coloração azul é gerado a partir do processamento do insumo de gás natural e, também, a partir da utilização dos combustíveis fósseis;
- De cor branca: Nesse método o hidrogênio em específico é produzido a partir do próprio insumo do hidrogênio natural;
- De cor turquesa: Nesse método o hidrogênio é produzido através da utilização do material de aquecimento do metano, não possuindo, portanto, geração de CO<sub>2</sub>;
- De cor musgo: Nesse método o hidrogênio é produzido através da utilização de insumos como biomassa ou biocombustíveis, sendo necessário alterações catalíticas, gaseificação ou biodigestão;
- De cor verde: Nesse método o hidrogênio verde em específico é produzido a partir da

utilização das fontes verdes como a energia solar, eólica e hidroelétricas, utilizando a técnica de eletrólise da água para obtenção do  $H_2V$ .

Na Figura 13 é apresentada uma ilustração da cadeia de produção de hidrogênio, variando de acordo com o tipo de insumo utilizado. Cada um dos processos demonstrados possui características próprias para a obtenção de hidrogênio. Dentre todos esses processos, a eletrólise da água despertou um maior interesse devido ao seu método limpo e renovável. No entanto, destacam-se as fontes primárias de energia solar, eólica de biomassa, devido à sua grande abundância e natureza renovável (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Figura 13 – Cadeia de produção de hidrogênio a partir de diversas fontes.



Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2021).

De acordo com Oliveira (2022), a produção de  $H_2V$  está diretamente associada ao processo químico conhecido como eletrólise da água. Esse método utiliza fontes renováveis como energia solar, eólica de biomassa. Consiste na utilização de um eletrolisador, que pode empregar tecnologias como eletrólise alcalina ou membrana de troca de prótons (PEM), demandando uma quantidade significativa de água e energia elétrica para o processo produtivo. É de grande relevância que a tecnologia seja economicamente viável para garantir uma maior produtividade e eficiência.

## 2.8 Armazenamento do hidrogênio

Uma das principais características relacionadas à utilização do H<sub>2</sub>V como fonte energética está diretamente ligada às grandes dificuldades em sua armazenagem. Existem, atualmente, diversos métodos de armazenamento para o H<sub>2</sub>V. No entanto, apesar das possíveis opções de estocagem disponíveis, ainda não foram identificadas maneiras viáveis de tornar seu armazenamento adequado, devido aos altos custos tecnológicos envolvidos e, também, aos desafios relacionados ao armazenamento em pequena, média ou larga escala (WON *et al.*, 2017).

De acordo com Moreno-Benito *et al.* (2017), ainda é necessário um alto investimento ao observarmos as questões do hidrogênio verde, pois mesmo com grandes expectativas relacionadas a esse meio energético promissor, muitos ainda são os desafios, principalmente quando pontuadas questões como infraestrutura que, conseqüentemente, requer um alto nível de investimento, pois para que aconteça uma estocagem de maneira eficiente e segura, é necessário que ocorram mudanças favoráveis na produção, na transformação do insumo e na distribuição. Um ponto importante nessa cadeia é a armazenagem, estágio indispensável para todo o sistema de produtivo do H<sub>2</sub>V.

Segundo Moradi e Groth (2019), os principais tipos de armazenamento para hidrogênio são:

- Armazenamento em tanques de alta pressão: este método de estocagem para o hidrogênio é realizado por meio da utilização de tanques pressurizados. Esses tanques são construídos com o objetivo de suportar altos níveis de pressão, o que constitui sua principal vantagem. No entanto, a aquisição de tanques de alta pressão implica em um elevado custo financeiro, o que pode inviabilizar o processo de aquisição, sendo essa sua principal desvantagem (KARAYEL *et al.*, 2023).
- Armazenamento em tanques criogênicos: este método de estocagem transforma o hidrogênio em forma líquida com o objetivo de ocupar um menor volume, sendo comumente utilizado quando há a necessidade de entregas em média ou alta escala. Como desvantagem destaca-se a necessidade de baixas temperaturas para o armazenamento, além de uma perda significativa do teor energético (RAMIREZ-VIDAL *et al.*, 2022).
- Armazenamento por meio de hidretos metálicos: este método de estocagem possui como principal vantagem a capacidade de absorção, que permite o armazenamento em condições de temperatura e pressão moderadas, tornando-a uma forma mais segura de armazena-

mento. Como principais desvantagens destacam-se o custo elevado para a aquisição dos componentes de fabricação, e da rápida degradação do material após poucas aplicações (MARCO, 2018).

- Armazenamento em compostos orgânicos líquidos: esta forma de armazenamento envolve a estocagem de compostos orgânicos em estado líquido. Seus benefícios incluem a capacidade de armazenamento a longo prazo e uma exposição reduzida ao risco, o que possibilita uma menor necessidade de espaço para armazenamento. A utilização de baixas pressões e o controle das variações de temperatura tornam este método potencialmente reversível. Sua principal desvantagem reside na necessidade de produção em grande escala para que o hidrogênio possa ser distribuído (HEUBLEIN *et al.*, 2020).
- Armazenamento do hidrogênio em forma de gás utilizando cavernas subterrâneas: este método de estocagem utiliza cavernas abandonadas e reservatórios de gás natural inutilizados ou desativados. Sua principal vantagem é o amplo espaço de armazenamento disponível para o hidrogênio. No entanto, a principal desvantagem é a necessidade de infraestrutura adequada para sua implementação, o que resulta em um custo elevado (JAHANBAKHSI *et al.*, 2024).
- Armazenamento do hidrogênio na forma de amônia verde: o armazenamento por meio do método da amônia verde consiste na utilização de reações químicas. Essa técnica de estocagem refere-se à aplicação do processo de Haber-Bosch, que emprega o uso de fertilizantes. Essa estratégia já é utilizada pela indústria química como forma de armazenamento para algumas variedades de combustível fóssil. A partir da necessidade de formas para o armazenamento do  $H_2V$ , desenvolveu-se o método de estocagem de amônia verde, utilizando fertilizantes com adição de  $H_2V$ , permitindo assim uma produção sustentável, com a principal vantagem de ser um armazenamento a longo prazo. Como desvantagem existe a necessidade de uma etapa adicional no processo de produção, que consiste em transformar e converter em amônia verde, o que pode acarretar em maiores custos no sistema produtivo, além de aumentar o tempo de produtividade (SMITH; TORRENTE-MURCIANO, 2024).

Segundo Pereira (2017), uma das principais dificuldades para a utilização do hidrogênio é a necessidade de tecnologia mais avançada, fundamental para a estocagem dessa forma energética. Além disso, é essencial avaliar os tipos de materiais que podem ser empregados nesses processos, bem como analisar os custos atuais e considerar todos os processos envolvidos que ainda estão em fase experimental. Diante desses desafios, a capacitação de mão de obra

e os investimentos financeiros em pesquisa tornam-se ainda mais importantes, uma vez que possibilitam a viabilização tecnológica desse meio energético.

## **2.9 Modalidades de transporte para o hidrogênio verde**

A busca por um vetor energético abundante e renovável é objeto de extensa pesquisa atualmente, pois requer investimentos e desenvolvimento de infraestruturas adequadas, que variam de acordo com o método de produção, tornando essencial a maneira como o H<sub>2</sub>V será distribuído. Isso está intrinsecamente ligado ao sistema produtivo, que abrange diversos modais como rodoviário, ferroviário, dutoviário, aeroviário e hidroviário, cada um com suas características únicas (AGNOLUCCI *et al.*, 2013).

Os desafios relacionados à infraestrutura estão consequentemente ligados aos diferentes modais de transporte, que são pontos-chave para alcançar a suficiência energética. Suprir essa demanda é uma das propostas do H<sub>2</sub>V que, a princípio, visa substituir parcialmente os combustíveis fósseis, com o objetivo de torná-lo uma fonte energética permanente e alcançar a emissão nula de CO<sub>2</sub>. O H<sub>2</sub>V pode ser utilizado em transportes terrestres como rodoviários, em veículos comuns ou pesados como carros, ônibus e caminhões, para o transporte de pequenas ou médias distâncias, dependendo da demanda (BETHOUX, 2020).

É importante enfatizar a relevância do modal rodoviário pois, a partir desse modelo de transporte terrestre, pode-se suprir demandas variadas de acordo com cada região, dependendo do sistema produtivo. Um fator essencial a ser considerado na cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V é a presença de postos de abastecimento. Como possíveis modais rodoviários para o transporte do hidrogênio verde, temos os veículos de carga, que incluem caminhões-cisterna e reboques tubulares. Esses podem ser integrados em uma infraestrutura satisfatória mediante investimentos logísticos adequados nessa área energética (KONDA *et al.*, 2011).

O transporte ferroviário é avaliado como um modal de locomoção promissor na literatura, devido a vários pontos favoráveis à sua utilização, como aspectos econômicos, ambientais e, o mais importante, o ponto de vista energético. Do ponto de vista econômico, o modal ferroviário é vantajoso, pois apresenta uma eficiência superior em comparação aos transportes convencionais e totalmente elétricos. Esse método de transporte também é favorável do ponto de vista ambiental, já que possui baixa emissão de CO<sub>2</sub>, contribuindo diretamente para a utilização desse meio como um transporte promissor para a distribuição do H<sub>2</sub>V (GENOVESE *et al.*, 2024).

O transporte dutoviário é realizado por meio de dutos. Existe uma considerável

expectativa em relação a esse meio de locomoção, pois ele possui a capacidade de transportar grandes quantidades, de forma similar ao gás natural, dependendo do porte da infraestrutura instalada. Isso pode ser vital para o sucesso desse meio energético. Além disso, os dutos são uma proposta tecnicamente viável para o transporte de amônia, insumo utilizado também na produção de amônia verde, conforme a necessidade do sistema produtivo empregado (PAPADIAS *et al.*, 2021).

O transporte aéreo é uma opção para a descarbonização do setor pois, utilizando hidrogênio como combustível, será possível reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub>. Isso é especialmente relevante para o setor comercial, que tem um grande mercado e, conseqüentemente, altas emissões de CO<sub>2</sub>. A implementação de tecnologia envolvendo sistemas de abastecimento é o principal foco dessa modalidade para que seu potencial seja plenamente utilizado. Embora ainda haja um caminho a percorrer para substituir o querosene sintético ou e-combustível, existe um potencial energético significativo na utilização do H<sub>2</sub>V para a aviação (HOELZEN *et al.*, 2022).

O transporte marítimo, ou deslocamento hidroviário, é considerado uma das grandes promessas em relação ao H<sub>2</sub>V. Isso se deve às grandes quantidades que podem ser transportadas por meio desse modal logístico, tornando-o potencialmente um dos protagonistas na busca por um meio energético sustentável. Considerando que grande parte das emissões de CO<sub>2</sub> é proveniente do tráfego existente, essa infraestrutura possivelmente será modificada para utilizar e transportar H<sub>2</sub>V a longas distâncias, tornando-se alvo de grandes investimentos para produções em larga escala desse insumo energético (TOMOS *et al.*, 2024).

A busca por formas de transportar H<sub>2</sub>V é um dos principais focos de estudo relacionados a esse meio energético. Este campo de pesquisa abrange diversos aspectos a serem investigados, incluindo os modelos de transporte. Há uma necessidade significativa de investimentos relacionados a esse meio energético, o qual está diretamente ligado a toda a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V e, conseqüentemente, ao cliente final. Este representa o ponto final do processo, no qual o transporte desempenha um papel essencial em suas diversas formas e, conseqüentemente, em seus custos. Estes custos podem ser reduzidos com o desenvolvimento de uma infraestrutura apropriada para cada uma das modalidades utilizadas (LAHNAOUI *et al.*, 2021).

## 2.10 Custos da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde

Segundo Ghafri *et al.* (2022), os custos associados à produção de H<sub>2</sub>V estão consequentemente conectados a toda a cadeia de suprimentos deste vetor energético. Ao abordar os investimentos nesta cadeia de suprimentos de H<sub>2</sub>V, surge a necessidade de desenvolvimento de um projeto. Portanto é necessário investir de diversas formas, começando pela concepção completa da planta de produção, onde todas as etapas serão delineadas. Em seguida a aquisição de tecnologia atenderá a todas as exigências do processo produtivo, conforme o método de produção escolhido, destacando o método de eletrólise da água, técnica que representa a produção renovável e consequentemente o H<sub>2</sub>V.

Em relação aos custos associados à cadeia produtiva do H<sub>2</sub>V, é de suma importância enfatizar os altos valores energéticos necessários, além de um elevado consumo de água para possibilitar a produção do hidrogênio verde. Isso impacta diretamente em todo o sistema produtivo, resultando também em um elevado custo total de produtividade. Investimentos em tecnologias são necessários para o desenvolvimento de novos equipamentos visando a redução desses gastos energéticos. O principal foco está no avanço tecnológico dos eletrolisadores pois, quanto maior for a eficiência, menor a variação do insumo, diminuindo os custos no final do sistema de produção (KENEZ; DINCER, 2024).

A implantação de um sistema produtivo eficiente na indústria para a produção de H<sub>2</sub>V está relacionada à necessidade de redução de custos, tanto na aquisição de matéria-prima quanto na construção de uma infraestrutura sólida. Esses aspectos estão intrinsecamente ligados a investimentos em tecnologia, pois a demanda por um vetor energético renovável está diretamente relacionada aos efeitos climáticos. Essa busca acelerada e contínua pelo H<sub>2</sub>V é motivada, em grande parte, pela preocupação com os efeitos climáticos (YANG *et al.*, 2024).

A necessidade de investimentos e, consequentemente, a superação dos gargalos são os principais desafios relacionados ao sistema produtivo do H<sub>2</sub>V. O principal propósito é a utilização desse vetor energético de forma abundante em nível global, incluindo a importação e exportação de energia proveniente de fontes verdes, com a proposta também de descarbonização de setores que enfrentam dificuldades em adotar meios alternativos renováveis, por exemplo, os setores portuários, que representando 70% do total de emissões de CO<sub>2</sub>, seguidos pelos setores de construção e indústria, estes conectados às atividades relacionadas ao porto (PIVETTA *et al.*, 2024).

A partir disso surge, também, a necessidade de priorizar uma abordagem mais



pronunciada por parte dos órgãos governamentais. Com essa perspectiva será possível direcionar investimentos mais significativos para subsidiar a transição energética, o que impulsionará o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas e, conseqüentemente, tornará o H<sub>2</sub>V mais competitivo. Esse avanço será especialmente relevante nos setores de transporte e indústria, contribuindo assim para tornar o mercado mais competitivo e, conseqüentemente, para a redução do efeito estufa (HASSAN *et al.*, 2024).

### 3 METODOLOGIA

Segundo Marconi e Lakatos (2010), a investigação do trabalho em questão define-se como uma pesquisa com finalidade exploratória experimental. Dessa forma, a pesquisa tem como propósito avaliar diferentes tipos de cenários a partir da construção de distintos modelos computacionais, buscando melhor compreensão e entendimento sobre o assunto. Além disso, visa possibilitar a aplicação dos resultados como um possível suporte para auxiliar na tomada de decisão.

O projeto será desenvolvido utilizando ferramentas computacionais, especificamente um *software* de simulação, para construir cenários adequados que representem todas as etapas da cadeia de produção do H<sub>2</sub>V com seus respectivos insumos. O desenvolvimento do projeto incluirá nove etapas para cada um dos cenários elaborados, todas inter-relacionadas para otimizar a aplicação da simulação (CHWIF; MEDINA, 2006; MONTEVECHI *et al.*, 2013; NASCIMENTO, 2019; MIGUEL *et al.*, 2010).

- Etapa 1 - Definição do problema: Essa etapa consiste na concepção e identificação do problema, sendo essencial definir com clareza o escopo do modelo e o nível de detalhamento necessário para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V;
- Etapa 2- Revisão de literatura: Esta etapa consiste no levantamento bibliográfico, um fator que impacta diretamente o estudo proposto. A partir dos documentos investigados, são identificadas as principais lacunas nos assuntos relacionados à cadeia do H<sub>2</sub>V, proporcionando um melhor direcionamento para a pesquisa;
- Etapa 3 - Aquisição do *software*: Esta etapa é caracterizada pela escolha da ferramenta de simulação mais adequada, que será utilizada ao longo de todo o projeto. A seleção do *software* apropriado é essencial, pois cada ferramenta possui suas próprias limitações, como restrições de caracteres e outras especificações que podem comprometer o desenvolvimento da cadeia de suprimentos. Portanto é fundamental escolher uma ferramenta computacional que seja adequado para a construção dos cenários em questão;
- Etapa 4 - Coleta e análise de dados: Nesta etapa define-se o método para a busca e coleta das informações necessárias para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos. Isso inclui a aquisição de dados sobre custos de insumos, demanda energética mundial, custos de tanques de armazenamento, custos de transporte e tempo de produção do hidrogênio verde. Esses parâmetros são essenciais para a modelagem de todo o processo produtivo. Após a

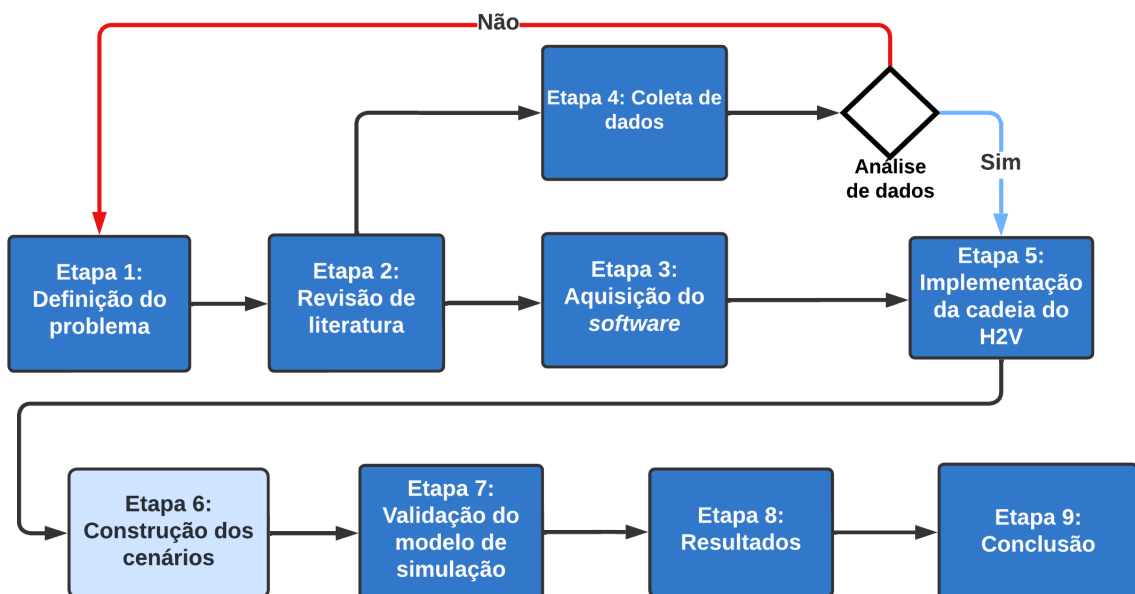
coleta, os dados são analisados para obter *insights* e fundamentar as etapas seguintes;

- Etapa 5 - Implementação do modelo da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V: Nesta etapa realiza-se a construção do modelo de simulação da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, sendo importante destacar que um único modelo pode não ser suficiente para atender todas as necessidades, pois a obtenção do hidrogênio verde pode ocorrer de várias formas. Assim, pode ser necessário fazer ajustes específicos para cada particularidade, sendo fundamental desenvolver cenários apropriados e realizar as adaptações necessárias no modelo para representar diferentes abordagens;
- Etapa 6 - Construção dos cenários otimista, pessimista e normal: O desenvolvimento de distintos cenários é uma etapa essencial, pois é construído com base na seleção de condições específicas. Esses cenários podem incluir situações otimistas, pessimistas e normais, onde os custos de produção do H<sub>2</sub>V podem ser influenciados pela variação dos custos dos insumos, mão de obra, entre outras possibilidades. Esta etapa tem uma influência significativa em todo o processo produtivo, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das possíveis variações, dependendo das variáveis envolvidas. A partir das variações nos custos, tipos de insumos e manutenção de equipamentos, é possível observar impactos nos indicadores de produção;
- Etapa 7 - Validação do modelo de simulação: Será realizado o desenvolvimento de diversos cenários, considerando várias condições específicas e utilizando parâmetros apropriados de entrada e saída. Com isso, é possível validar a simulação da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, levando em conta todas as necessidades dos processos e resultados envolvidos. É importante enfatizar que um ou mais modelos podem não conseguir representar satisfatoriamente a problemática, visando alcançar confiabilidade em relação ao sistema produtivo do H<sub>2</sub>V;
- Etapa 8 - Resultados: Com base nos resultados obtidos, torna-se possível utilizar e adaptar os modelos construídos para cada um dos processos, auxiliando na tomada de decisões ideal para os diferentes cenários desenvolvidos. Isso pode ter um impacto direto nas decisões dos gestores das indústrias que produzem H<sub>2</sub>V. Possíveis contribuições podem incluir, por exemplo, a identificação da fonte energética predominante no local de produção, análise de custos e diferentes métodos de armazenamento, seleção dos modais de transporte mais adequados e estabelecimento de meios oportunos de distribuição, entre outras informações relevantes para o processo decisório;

- Etapa 9 - Conclusão: Na fase de conclusão é possível analisar todos os passos do processo produtivo do H<sub>2</sub>V com base nos cenários construídos, cada um apresentando suas características distintas e únicas. Essa análise facilitará a tomada de decisões dos gestores, tanto para a produção atual quanto para o planejamento estratégico futuro da empresa, o que poderá resultar na melhoria dos indicadores de produtividade.

A implementação detalhada de todas as etapas acima é de suma importância, pois cada uma desempenha um papel específico e indispensável na construção da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V. Cada etapa é caracterizada para apresentar e retratar o cenário proposto, permitindo uma análise relevante e criteriosa de cada um dos pontos. Além disso, é fundamental ajustar, quando necessário, cada uma das etapas às especificidades e desafios de cada situação. Para uma representação mais clara do processo metodológico adotado, na Figura 14 é apresentado um fluxograma detalhado mostrando todas as etapas necessárias. Neste contexto destacam-se a flexibilidade e a customização como elementos-chave, pois cada cenário requer abordagens diferentes.

Figura 14 – Etapas do desenvolvimento da metodologia.



Fonte: Autor (2024)

### 3.1 Revisão de literatura

As plataformas de pesquisa utilizadas para o desenvolvimento desta literatura foram Google Acadêmico, *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*. Essas bases de dados foram empregadas para investigar assuntos relacionados ao hidrogênio verde, com ênfase nas seguintes temáticas: simulação, cadeia de suprimentos, logística e transporte. Essas palavras-chave foram amplamente utilizadas, destacando as dificuldades relacionadas ao H<sub>2</sub>V e demonstrando a importância do tema.

### 3.2 Software de Simulação

O *software* utilizado para a modelagem e desenvolvimento de toda a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, assim como a simulação dos processos, foi o *Arena Simulation*, pertencente à empresa *Rockwell*. Essa empresa é representada pela Paragon no Brasil, a qual é a distribuidora oficial da ferramenta. Mais informações sobre a ferramenta podem ser encontradas diretamente no endereço <https://paragon.com.br/>.

O *Arena* é um *software* que oferece recursos práticos para a construção de simulações, utilizando um formato denominado de blocos ou módulos. Isso permite representar as características do modelo de acordo com as necessidades específicas, levando em consideração suas limitações. A linguagem de programação utilizada é a SIMAN, o que facilita sua utilização, uma vez que cada um dos blocos já está pré-definido, não sendo necessário modificar seus componentes (GREGÓRIO; LOZADA, 2019).

É indispensável realizar análises estatísticas ao longo de toda a modelagem, identificando aspectos técnicos que terão impacto direto na construção e implementação do modelo. Isso foi demonstrado por Muresan *et al.* (2013), que utilizaram o *software Arena* para analisar a cadeia de abastecimento e produção de hidrogênio a partir do método de gaseificação utilizando dois tipos de insumos: carvão e biomassa.

Durante as análises e construções das simulações da presente investigação, devem ser avaliados o processo de produção do H<sub>2</sub>V, as fontes energéticas utilizadas, as formas de armazenamento, as possíveis alternativas de transporte e os métodos de distribuição. É essencial realizar a análise de toda a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V ao longo de todo o processo de desenvolvimento, pois a partir desses resultados será possível traçar rotas para a tomada de decisão ao longo do processo produtivo.

### **3.3 Coleta e análise dos dados**

Neste tópico serão delineados os critérios empregados na coleta de dados. Para esta investigação serão exploradas plataformas de pesquisa a fim de obter informações sobre temas pertinentes ao projeto como simulação, fontes alternativas de energia renovável, cadeia de suprimentos, processo de tomada de decisão, formas de armazenamento e custos. Os dados serão estimados com o objetivo de adquirir detalhes relevantes, tais como tempo de produção, quantidade de processos e operações, entre outros aspectos, pois a partir dessas informações será possível atualizar o desenvolvimento do projeto proposto.

A partir dos dados coletados, conforme especificados no tópico anterior, foram estabelecidos critérios de filtragem que possibilitaram a pesquisa do projeto em questão. O levantamento de dados para a presente investigação abrangeu publicações dos últimos 20 anos, devendo-se ao fato de que o tema do hidrogênio tem sido objeto de estudos mas, apenas nos últimos anos, tornou-se foco da comunidade acadêmica devido à necessidade de encontrar um substituto energético.

### **3.4 Concepção e implementação do modelo da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V**

Este tópico trata da concepção e implementação dos modelos de simulação. Nesta fase inicial do estudo de simulação, envolve-se a criação de toda a cadeia de suprimentos do hidrogênio verde, abrangendo todas as informações necessárias, desde a produção de energia por fontes renováveis, passando pela produção e pelo armazenamento do hidrogênio verde, até o processo de distribuição do produto final por diversos modos de transporte. Isso requer a seleção de um método adequado de modelagem de simulação e a definição das informações pertinentes a serem incorporadas no modelo.

### **3.5 Construção dos cenários otimista, pessimista e normal**

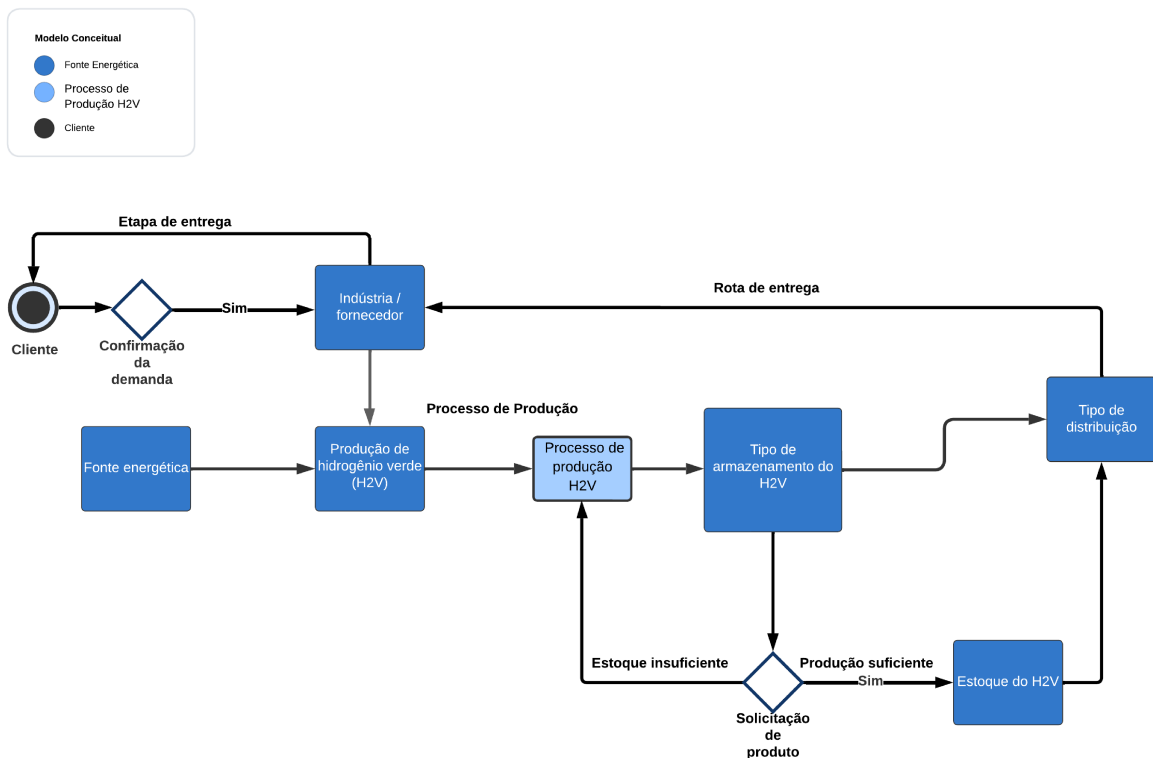
Essa etapa consiste em elaborar construções de cenários e conduzir simulações para o setor energético. Por meio do desenvolvimento desses cenários, é possível obter condições para que as empresas do setor energético possam se preparar antecipadamente para eventuais mudanças futuras, reduzindo suas incertezas organizacionais. A pesquisa será conduzida levando em consideração os cenários atuais relacionados à produção de H<sub>2</sub>V, com o objetivo de desenvolver uma cadeia de suprimentos com metas claras.

### 3.6 Modelo conceitual para a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V

Na Figura 15 são apresentadas todas as etapas, de forma simplificada, desde a solicitação do cliente até os fornecedores. É importante ressaltar que essas informações podem ser utilizadas para modificar os passos na construção da cadeia de suprimentos. Nesta seção também são definidos, de forma simplificada, os parâmetros para a construção da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde, sendo eles:

- Demanda do cliente;
- Produção a partir de que fonte: solar, eólica ou biomassa;
- Custos para produção;
- Eletrólise da água, gaseificação ou outro tipo;
- Tipo de armazenamento, volume de armazenamento e modais de transporte.

Figura 15 – Modelo conceitual.



Fonte: Autor (2024)

A partir dos parâmetros de entrada definidos, é possível desenvolver um modelo conceitual para simular a cadeia de suprimentos do hidrogênio verde. Com os dados obtidos por meio dessa simulação, torna-se viável identificar gargalos e áreas de melhoria na cadeia, além de auxiliar na tomada de decisões estratégicas de forma mais informada e precisa.

### 3.6.1 Construção dos cenários

Para a construção dos cenários de simulação foram estabelecidas quantidades hipotéticas, classificadas em escalas. Com base nisso, esses valores foram divididos em categorias que podem ser definidas como produção baixa, média e alta. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de produção para os distintos cenários.

Tabela 4 – Parâmetros da escala de produção.

<i>Escala de Produção</i>	<i>Produção (Toneladas)</i>
<i>Baixa</i>	1 a 30 toneladas
<i>Média</i>	31 a 69 toneladas
<i>Alta</i>	70 a 120 toneladas

Fonte: Autor (2024)

Para o desenvolvimento dos cenários, será utilizada a energia solar, denominada como cenário A, a energia eólica, chamada de cenário B, e a energia proveniente de biomassa, que será denominada como cenário C. Essa nomenclatura visa identificar claramente cada uma das fontes de energia nos cenários propostos. É importante ressaltar que os insumos para a aquisição de energia elétrica devem ser renováveis, garantindo que o processo de eletrólise da água seja realizado para a obtenção do hidrogênio verde. Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros de entrada para o desenvolvimento da cadeia completa do H<sub>2</sub>V nos cenários propostos.



Tabela 5 – Processos e custos para produção do H<sub>2</sub>V

<b>Operações de produção</b>	<b>Processos e valores para tomada de decisão</b>		
	<b><i>Cenário A</i></b>	<b><i>Cenário B</i></b>	<b><i>Cenário C</i></b>
Demanda do H <sub>2</sub> V	100 Toneladas	50 Toneladas	20 Toneladas
Fonte energética utilizada	Energia solar	Energia eólica	Energia de biomassa
Custo para produção de 1kg H <sub>2</sub> V	5 a 7 US\$	5 a 7 US\$	5 a 7 US\$
Processo para produção do H <sub>2</sub> V	Eletrólise da água	Eletrólise da água	Eletrólise da água
Disponibilidade de água	9 litros por kg	9 litros por kg	9 litros por kg
Consumo energético para produção de 1kg de H <sub>2</sub> V	55 a 65 kWh	55 a 65 kWh	55 a 65 kWh
Capacidade máxima de armazenamento	120 Toneladas	55 Toneladas	20 Toneladas
Forma de armazenamento	Tanque de alta pressão	Tanque criogênico	Tanque de alta pressão
Modal de distribuição	Hidroviário	Ferrovário	Rodoviário

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

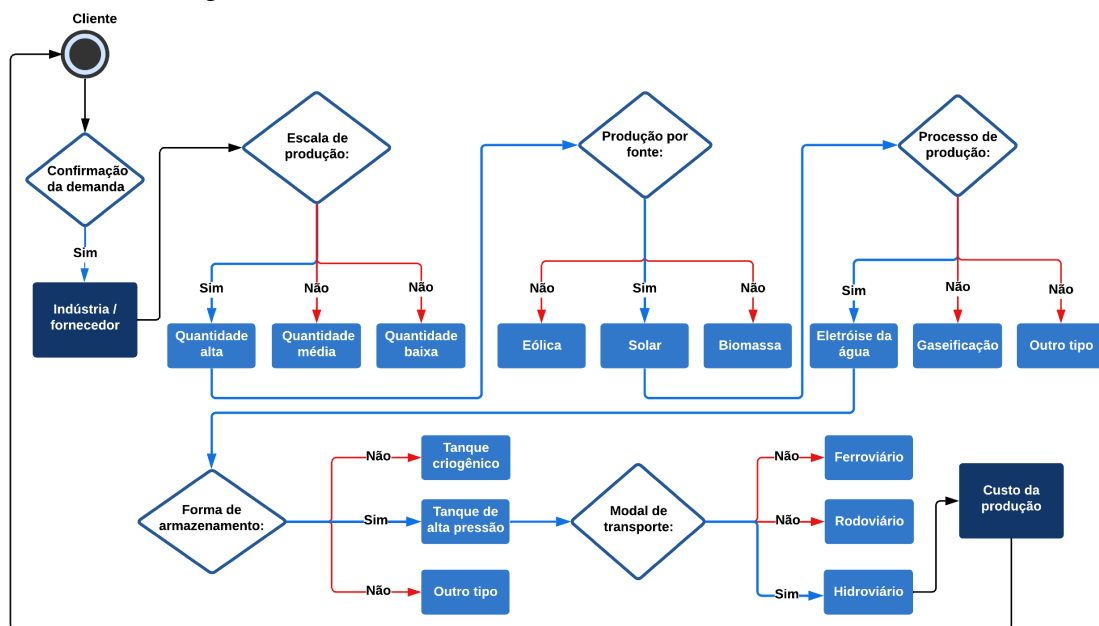
### 3.7 Verificação do modelo de simulação

A verificação está diretamente relacionada ao modelo simulado, pois é por meio da compreensão dessa ligação que será possível entender a conexão entre as necessidades do mundo real, o modelo conceitual criado e o modelo computacional desenvolvido, permitindo responder as questões propostas e possibilitando a validação do modelo simulado.

### 3.8 Implementação dos cenários A, B e C

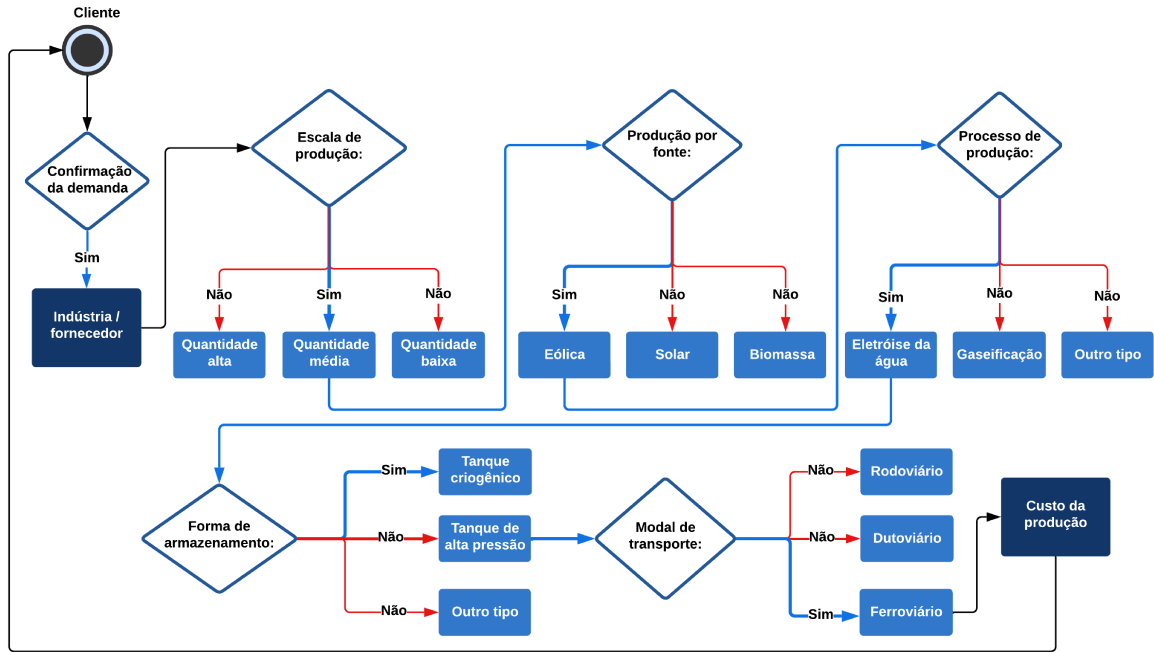
Na Figura 16 são apresentados o desenvolvimento e a implementação de um possível cenário para a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V a partir da fonte de energia solar. Em seguida, na Figura 17, é demonstrado o cenário a partir de energia eólica e suas distintas ações para o processo produtivo do hidrogênio verde. Para finalizar, as rotas para implantação da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, são ilustradas na Figura 18. Nestes cenários é possível identificar as diferentes rotas de decisão ao longo da cadeia de suprimentos em cada uma das fontes energéticas, onde a tomada de decisão desempenha um papel essencial para garantir a eficiência de cada um dos processos referentes à produção.

Figura 16 – Fluxograma da implementação da tomada de decisão para o cenário utilizando energia solar.



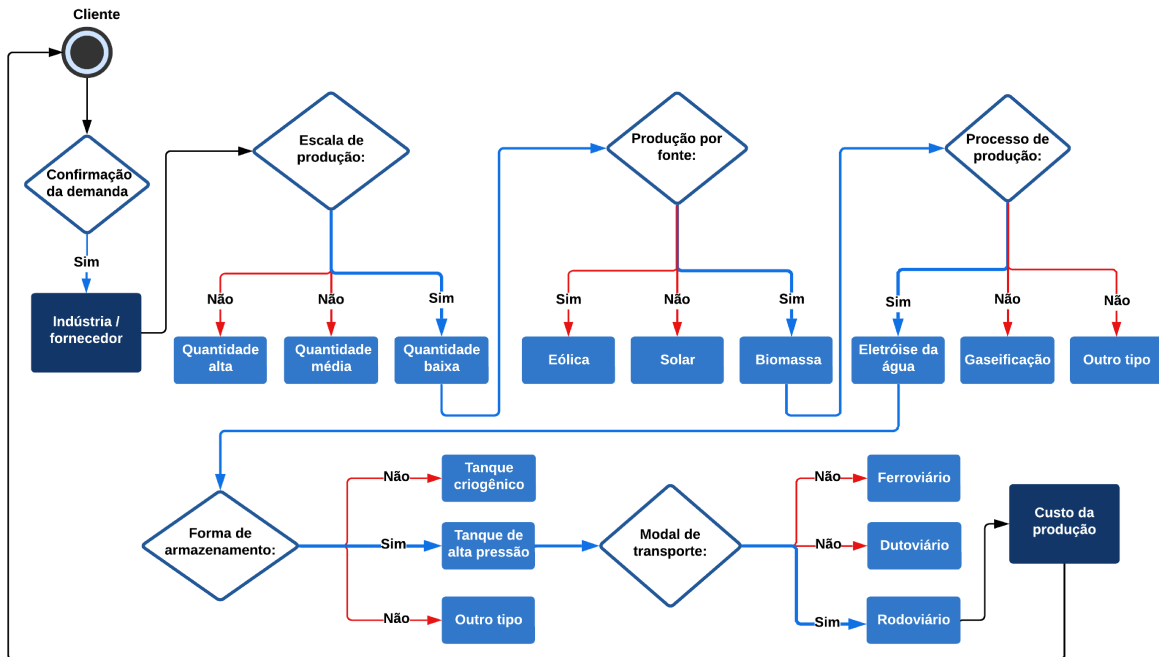
Fonte: Autor (2024)

Figura 17 – Fluxograma da implementação da tomada de decisão para o cenário utilizando energia eólica.



Fonte: Autor (2024)

Figura 18 – Fluxograma da implementação da tomada de decisão para o cenário utilizando energia de biomassa.



Fonte: Autor (2024)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

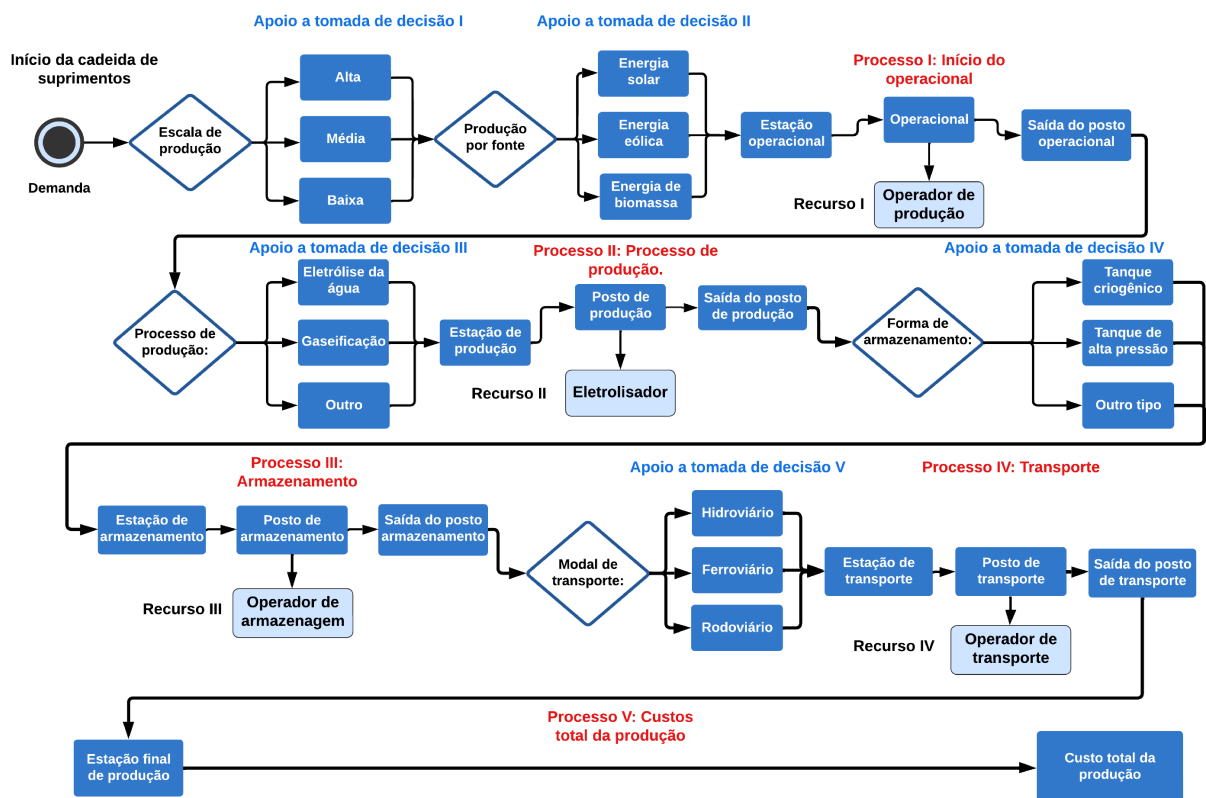
Neste capítulo os resultados dos experimentos de simulação são descritos em detalhes. É relevante salientar que esta cadeia logística é um modelo desenvolvido para o estado do Ceará, onde a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V ainda não está estabelecida.

### 4.1 Modelagem da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V utilizando o Arena Simulation

Na Figura 19 é apresentada a modelagem completa de toda a cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, demonstrando todas as etapas desenvolvidas, incluindo as possíveis tomadas de decisão, além do mapeamento e desenvolvimento de todas as atividades relacionadas aos processos produtivos, bem como o detalhamento de todos os recursos utilizados.

Este modelo foi baseado no contexto descrito por Šebalj (2022), que apresenta uma cadeia de suprimentos completa utilizando gás natural da Ucrânia. O autor emprega os métodos *As-Is* e *To-Be* de forma separada durante um período de 7 meses, demonstrando suas etapas distintas para a otimização de custos da linha produtiva em questão.

Figura 19 – Modelagem referente à simulação de uma cadeia de suprimentos completa do H<sub>2</sub>V.



Para o desenvolvimento da cadeia do H<sub>2</sub>V, foi necessário elaborar diversos cenários hipotéticos e considerar vários fatores relacionados ao ramo de fabricação. Um desses fatores é o funcionamento contínuo, uma vez que é comum a indústria operar durante um período de 24 horas ininterruptas, conforme mencionado por CORRÊA (2019). Isso será levado em conta na simulação, considerando suas especificidades distintas, nas quais a demanda será admitida. Para essa finalidade, também foram estabelecidos critérios para os seguintes parâmetros: tomada de decisão e processo de produção.

No contexto da primeira tomada de decisão na etapa de produção, é possível optar entre três caminhos distintos, de acordo com a demanda selecionada: escala de produção alta, variando entre 70 e 120 toneladas; escala de produção média, variando entre 31 e 69 toneladas; e escala de produção baixa, de 1 a 30 toneladas. A partir dessa escolha ocorre a segunda tomada de decisão, relacionada à fonte de produção que, na modelagem específica, está diretamente ligada à demanda e influenciará todo o processo produtivo. Essa decisão dependerá do volume total da produção, o qual está dividido em três possíveis fontes: energia solar, energia eólica e energia de biomassa.

Para a continuação da cadeia produtiva, após as tomadas de decisão para a produção do H<sub>2</sub>V, a demanda chega à estação operacional, onde é dividida em três partes. Neste ponto a demanda é encaminhada inicialmente para o setor operacional, onde está disponível o recurso denominado operador de produção. Esse operador é responsável pela recepção dos insumos para produção e pelo deslocamento para a próxima etapa, após a saída da estação operacional.

Na terceira tomada de decisão surge a necessidade de escolher o processo de produção, que pode ser dividido em eletrólise da água, gaseificação ou outro método, conforme o modelo produtivo escolhido. Essa escolha é essencial para a produção do H<sub>2</sub>V, sendo considerada a parte mais importante do processo produtivo, uma vez que essa etapa representa 80% do mesmo, estando presente em toda a produção.

Com base na escolha do processo produtivo do H<sub>2</sub>V, a operação é iniciada na estação de produção, onde são recebidos os insumos necessários. Em seguida são encaminhados para o posto de produção, um setor que possui um recurso chamado eletrolisador, responsável por produzir o hidrogênio verde. Posteriormente o H<sub>2</sub>V é deslocado para a saída do posto de produção.

A partir dessa etapa é necessária a quarta tomada de decisão, que consiste na escolha da forma de armazenamento, podendo ser dividida em tanque criogênico, tanque de alta pressão ou outra forma, de acordo com o modelo produtivo escolhido. Após a escolha da forma de armazenamento, o H<sub>2</sub>V segue para a estação de armazenamento, onde é enviada a informação para o setor de estocagem. Utilizando o recurso denominado operador de armazenagem, toda a produção de H<sub>2</sub>V é estocada, finalizando no posto de saída.

Com a penúltima etapa desse processo produtivo temos a quinta tomada de decisão, referente à escolha do modal de transporte, dividido em modal hidroviário, ferroviário e rodoviário. Com a seleção do modal de transporte mais viável, a informação é encaminhada para a estação de transporte, onde é direcionada para o setor de transporte. Nesse setor, é utilizado o recurso denominado operador de transporte, responsável pela logística de entrega do H<sub>2</sub>V, finalizando essa parte da cadeia de suprimentos com a saída do posto de transporte.

Por fim, na sexta e última etapa do processo produtivo, tem-se a estação final de produção, onde é possível a perspectiva dos custos totais de produção a partir de cada uma das modificações nos setores produtivos e em relação à quantidade que, por sua vez, depende diretamente da fonte energética utilizada na produção do H<sub>2</sub>V.

#### 4.2 Processos produtivos, recursos e prioridades relacionados aos custos na cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V.

Na Tabela 6 são apresentados os custos relacionados a cada etapa do processo produtivo, os quais serão utilizados como parâmetros para todos os cenários simulados, como para produção a partir de energia solar, eólica ou de biomassa. Isso se deve ao fato de que todos os cenários empregam a mesma técnica produtiva, mesma capacidade de produção e mesma utilização do método de eletrólise da água para esse modelo de simulação.

Tabela 6 – Setor produtivo, recursos, prioridades e custos em relação à implementação dos cenários simulados.

Setor produtivo	Recursos	Custos	Prioridades
Posto de produção	Eletrolisador	80%	1
Posto operacional	Operador de produção		4
Posto de armazenamento	Operador de armazenamento	20%	2
Posto de transporte	Operador de transporte		3

Fonte: Autor (2024)

Os custos energéticos que, de acordo com (FERNANDES *et al.*, 2023), representam 80% do percentual de produção do H<sub>2</sub>V, são de grande relevância em toda a cadeia de suprimentos. Para esses cenários hipotéticos os custos foram divididos, sendo o ponto de produção o responsável pelo maior gasto referente à cadeia de suprimentos, devido ao consumo energético necessário para o funcionamento do eletrolisador, considerado como recurso do processo. Portanto é determinado como prioridade 1, para este método produtivo, devido ao seu grau de importância.

Além disso, temos os gastos operacionais da cadeia logística, os quais, de acordo com Mio *et al.* (2024), podem ser divididos em custos fixos e variáveis, conforme adotado por este método produtivo. Esses custos variam com a alteração no volume de produção, visto que esta etapa representa 20% das demais despesas do processo de produção. Eles foram subdivididos entre operacionais. O processo de armazenamento é considerado o de maior complexidade, devido ao alto nível tecnológico necessário para sua execução e, conseqüentemente, com maior dificuldade de manuseio, devido à dificuldade de estocagem do H<sub>2</sub>V. Por outro lado, o processo de transporte é considerado intermediário, devido às possíveis dificuldades em movimentar o H<sub>2</sub>V.

Os processos mencionados anteriormente referem-se aos operadores de produção, de armazenamento e de transporte, respectivamente, e suas prioridades distintas estão divididas em 4, 2 e 3, de acordo com a descrição anterior. Isso proporciona uma percepção mais apurada do modelo de simulação e dos custos da produção de H<sub>2</sub>V. Esse modelo será utilizado como padrão em cada cenário, assim como demonstrado por Kiwan e Amer (2023) e Muresan *et al.* (2013), que utilizaram critérios semelhantes para as simulações de seus cenários.

Para que uma simulação de uma cadeia de suprimentos seja considerada satisfatória, alguns pontos devem ser levados em consideração. Isso ocorre porque, dependendo do tipo de cadeia, a abordagem deve ser modificada, já que cada ponto influencia diretamente no resultado. Alguns exemplos de variáveis que podem ser considerados para a construção dessa modelagem incluem análise dos registros dos pontos de distribuição do produto manufaturado, formas de distribuição e análises de custos possíveis, permitindo diferentes modalidades conforme a urgência do cliente, a capacidade de armazenamento dos volumes ou produtos, e a estimativa da capacidade de distribuição dos produtos acabados, com possível suporte ao cliente.

### 4.3 Cenário A - Comum - Energia Solar

É abordada, no primeiro cenário simulado, a utilização de energia solar, apresentando os indicadores de custos derivados de um estudo sobre uma planta hipotética com capacidade diária de produção de 3.000 quilogramas (kg) de hidrogênio em um período de 24 horas, o que representa 125 kg de H<sub>2</sub> por hora em escala de produção, utilizando o ciclo cobre-cloro (OZBILEN *et al.*, 2011).

Para a simulação dos presentes cenários, foi considerado um quantitativo de produção de 138,89 kg por hora e 3.333,4 kg por dia. Essa produtividade foi aplicada aos cenários A, B e C para a produção de hidrogênio verde, utilizando o método de eletrólise com a tecnologia do eletrolisador alcalino ou PEM, atualmente destacado como a técnica mais eficiente de produção de H<sub>2</sub>V, conforme ressaltado por Rezaei *et al.* (2024b), que realizam análise e replicação de diversos sistemas produtivos, como reforma a vapor, fermentação escura e pirólise.

Diante às informações de produção tem-se o primeiro cenário, que utilizará como fonte renovável a energia solar fotovoltaica. Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros de entrada para a presente simulação, incluindo custos de produção unitária em dólares, consumo médio de água em litros (L) e consumo de energia em quilowatt-hora (kWh), com base em estudos da literatura (SHI *et al.*, 2020; RASUL *et al.*, 2022).

Tabela 7 – Parâmetros de entrada para o cenário comum de energia solar.

Cenário Comum	Demanda do H <sub>2</sub> V	Custo de 1kg de H <sub>2</sub> V
Energia Solar	100 Toneladas	6 US\$ (Dólares)
Consumo de água por 1 kg de H <sub>2</sub> V	kWh para produção 1kg de H <sub>2</sub> V	Custo total de produção
9 Litros de água	60 kWh	600.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

Introduzindo o primeiro cenário será apresentada a Tabela 8, com as possíveis opções de tomada de decisão, divididas em cinco prováveis caminhos para a simulação, na seguinte sequência: escala de produção, escolha da fonte, processo de produção, forma de armazenamento e, por fim, seleção do modal de transporte.



Tabela 8 – Possíveis tomadas de decisões para todos os cenários, utilizando a energia solar.

Escala de produção	Decisão	Produção por fonte	Decisão	Process. produção	Decisão
Alta	X	Solar	X	Eletrólise da água	X
Média		Eólica		Gaseificação	
Baixa		Biomassa		Outro	
Armazenamento	Decisão	Modal de transporte	Decisão		
Tanque criogênico		Ferroviário			
Tan. de alta pressão	X	Rodoviário			
Outro		Hidroviário	X		

Fonte: Autor (2024)

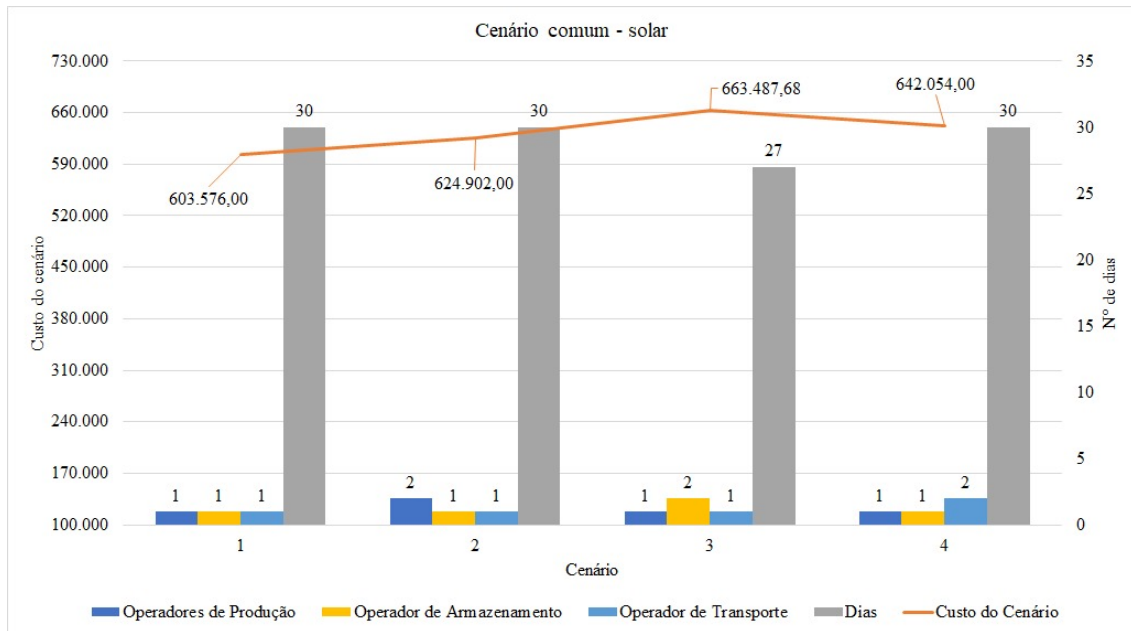
Para o desenvolvimento dos possíveis cenários, assim como feito por Kim *et al.* (2024), onde são apresentados diferentes situações com possíveis rotas, considerando as variáveis e a demanda do hidrogênio, foram construídos contextos simulados contendo possíveis tomadas de decisão para cada um dos distintos caminhos. Inicialmente, para que fosse possível uma escala de produção alta, seria necessária uma demanda compreendendo os valores de 70 a 120 toneladas, o que exigiria uma tomada de decisão.

Nesse contexto, e com base na investigação de (MARZOUK, 2023), que destaca o Brasil como uma das onze principais potências ao redor do mundo em relação à produção do H<sub>2</sub>V, a energia solar fotovoltaica emerge como a principal fonte para suprir a demanda. Isso se deve ao potencial de irradiação solar de estados como o Ceará, que possuem um aspecto positivo em relação ao potencial de produção de hidrogênio verde a partir de energia solar fotovoltaica, com possíveis rotas de escolha para as formas de armazenamento e distribuição em nível global.

Na Figura 20 são demonstrados os custos de produção, compreendendo os encargos energéticos e operacionais, sendo divididos em custos de operação, custos de armazenamento, custos operacionais, custos de transporte e custos de produção. Para a elaboração dos custos deste cenário, foi utilizado como base o estudo de Prata *et al.* (2008), que empregou experimentos computacionais para propor um modelo que representasse a dinâmica operacional de movimentação de transporte, utilizando Redes Estocásticas.

Para o dimensionamento produtivo de cada um dos processos de manufatura, foi inicialmente utilizado o método de análise de custos reversos, conforme descrito por Xu *et al.* (2016), tratando-se de um método simples baseado na cadeia de suprimentos reversa, semelhante ao processo inverso da produção varejista. A partir do cenário proposto denominado como comum, foi requerida uma demanda de 100 toneladas de H<sub>2</sub>V, considerando uma capacidade máxima de armazenamento de 120 toneladas e custo médio de US\$ 6,00 por quilograma.

Figura 20 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia solar.



Fonte: Autor (2024)

Em posse desse valor, e considerando que o custo energético representa 80% do gasto total, tem-se um gasto energético de US\$ 480.000,00. Além disso, os gastos operacionais representam US\$ 120.000,00, sendo esses custos ainda subdivididos em prioridades conforme explicado na Tabela 6, onde cada um dos setores possui sua respectiva prioridade para essa modelagem. O propósito é simular a produção de 100 toneladas e detalhar os custos em cada setor do sistema produtivo, representando o custo reverso de produtividade neste cenário hipotético, com base no custo total de produção de US\$ 600.000,00 para essa demanda.

Então, a partir dos cenários simulados, observa-se que o cenário 1 representa a produção de 100 toneladas durante 30 dias com uma variação mínima. Já em relação aos cenários 2 e 4, percebe-se que, mesmo com a adição de operadores como recursos nos setores operacional e de transporte, não há aumento significativo na produtividade, apesar do aumento dos custos operacionais, fator este de grande relevância, tornando essas alternativas inviáveis para o processo produtivo.

Esses resultados servem como possível apoio à tomada de decisões, semelhante ao protótipo simulado de Tan *et al.* (2024), que tem como objetivo a otimização dos lucros através de uma melhor forma de armazenamento. Tais cenários simulados contribuem para um gerenciamento de suprimentos mais eficiente, auxiliando e, conseqüentemente, melhorando o seu modelo de gestão de estoque.

No entanto, em relação ao primeiro cenário e após uma análise minuciosa, observa-se que o cenário 3 apresenta uma perspectiva de produção onde é aplicável uma abordagem de *trade – off*, caracterizada pela finalidade de encontrar possíveis alternativas logísticas viáveis para satisfazer o cliente e aumentar a rentabilidade da empresa, método descrito por (AMARAL, 2012). Para esse cenário, foi possível adicionar um operador de armazenagem como recurso no setor de armazenamento, o que permitiu uma redução de 3 dias na cadeia produtiva do H<sub>2</sub>V. No entanto, como consequência, houve um aumento de 10,58% no custo final devido aos recursos adicionados à linha produtiva.

Nos cenários também são apresentados os custos individuais de cada uma das operações e seus respectivos recursos, em horas, com o objetivo de proporcionar uma maior precisão em relação a cada situação. Isso permite determinar o gasto produtivo de forma mais objetiva e detalhada, fornecendo um maior suporte e auxílio em possíveis tomadas de decisão para os gestores.

Para concluir o cenário em relação à infraestrutura da cadeia de suprimentos, com foco na capacidade de armazenamento para a simulação do cenário comum, observa-se que a capacidade de 120 toneladas é adequada para armazenar a demanda de H<sub>2</sub>V do ambiente simulado, com a possibilidade de manter um estoque mínimo para atender a uma demanda em menor escala de outro cliente em potencial, se necessário.

#### **4.4 Cenário A - Otimista - Energia Solar**

Um cenário otimista representa uma configuração favorável das variáveis relacionadas a um determinado modelo, caracterizando-se por suas melhores condições. As características desse cenário podem variar de acordo com o propósito específico de cada linha produtiva desenvolvida. Tais condições são influenciadas por diversos fatores, como as circunstâncias que envolvem a aquisição de insumos para o processo produtivo, conforme a oferta e demanda, em diferentes escalas - curta, média ou mesmo larga. Essa dinâmica tem um impacto direto em toda a infraestrutura envolvida, conforme mencionado por Silva *et al.* (2024).

Os custos associados à linha de produção, incluindo os gastos operacionais relacionados à disponibilidade de mão de obra, constituem uma parte significativa do processo de manufatura. Outro aspecto essencial da cadeia produtiva são os equipamentos adequados para a produção, que podem ser adequados ou inadequados para o desenvolvimento, o que está diretamente relacionado ao consumo energético. Este consumo energético é uma variável

crucial para qualquer cadeia de suprimentos e tem um impacto direto nos custos logísticos, como indicado por Godinho *et al.* (2023).

Para a presente cadeia de suprimentos em um cenário otimista, foram consideradas as seguintes condições: custo médio de US\$ 5,00 por quilograma, uma demanda de 100 toneladas, considerando uma capacidade máxima de armazenamento de 120 toneladas e um custo energético constante, representando 80%. Isso resulta em um custo energético para esse cenário de US\$ 400.000,00 e US\$ 100.000,00 em custos operacionais, fator presente na literatura, assim como no cenário otimista de Menin *et al.* (2020). Mesmo em uma cadeia de suprimentos utilizando o processo de biometanação, enfatiza-se os custos energéticos ocasionados pela utilização do método de eletrólise da água em sua cadeia produtiva.

Na Tabela 9 são demonstrados os parâmetros utilizados para o desenvolvimento da simulação da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, considerando um cenário otimista. Esses parâmetros incluem o melhor custo de produção unitária em dólares, consumo médio de água em litros e de energia em kWh, e considera os mesmos processos de tomada de decisões.

Tabela 9 – Parâmetros de entrada para o cenário otimista de energia solar.

Cenário Otimista	Demanda do H <sub>2</sub> V	Custo de 1kg de H <sub>2</sub> V
Energia Solar	100 Toneladas	5 US\$ (Dólares)
Consumo de água por 1 kg de H <sub>2</sub> V	kWh para produção 1kg de H <sub>2</sub> V	Custo total de produção
9 Litros de água	55 kWh	500.000,00

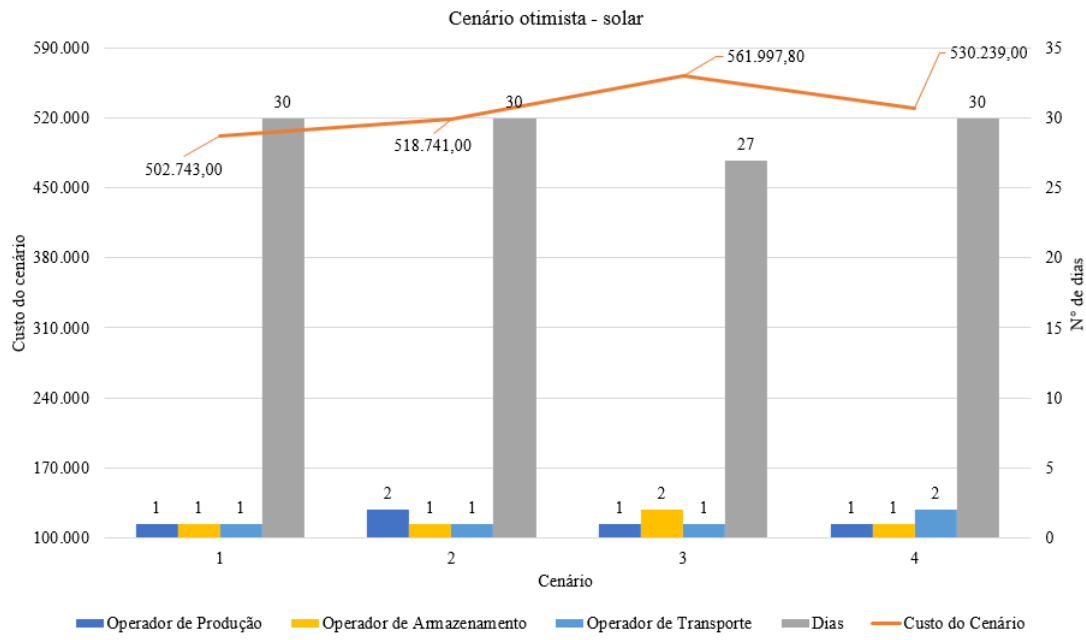
Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

É importante ressaltar que um cenário otimista leva em consideração a avaliação dos melhores valores anteriormente citados. A partir dessas considerações, foram desenvolvidas as simulações dos custos de produção e operacionais, levando em conta as prioridades da Tabela 6 e a tomada de decisão da Tabela 8.

Na Figura 21 são apresentados os custos de produção, onde são compreendidos os encargos energéticos e operacionais, os quais foram divididos em custos de operação, de armazenamento, operacionais de transporte e de produção.

Para a simulação atual da cadeia de suprimentos, utilizando energia solar e adotando uma perspectiva otimista, observa-se que o cenário 1 tem um valor de US\$ 502.743,00, enquanto o cenário 3 apresenta um custo de US\$ 561.997,00, representando um aumento de 12,40% em relação ao custo total de produção. Essa análise destaca a potencial utilização do *trade – off* e a possível redução de 3 dias no respectivo cenário.

Figura 21 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia solar.



Fonte: Autor (2024)

Para finalizar a avaliação da infraestrutura da cadeia de suprimentos, considerando o cenário otimista, destaca-se que uma capacidade de armazenamento de 120 toneladas é suficiente para atender à demanda de H<sub>2</sub>V no ambiente simulado. Contudo, é importante ressaltar a possibilidade de aumentar a produção em até 20 toneladas, o que representa uma opção de tomada de decisão para os gestores caso haja uma necessidade de demanda adicional no cenário em questão.

#### 4.5 Cenário A - Pessimista - Energia Solar

Para um cenário pessimista relacionado à energia solar, é possível atribuir alguns fatores como aspectos tecnológicos ligados ao tipo de eletrolisador, escassez de mão de obra operacional devido à novidade da cadeia de suprimentos, disponibilidade de água essencial no método de eletrólise e tarifas energéticas mais altas, impactando diretamente nos custos finais da produção do H<sub>2</sub>V e encarecendo o valor da cadeia de suprimentos.

A abordagem de um cenário solar é explorada no estudo de Rezaei *et al.* (2024a), que elabora cenários com perspectivas otimistas e pessimistas para examinar as incertezas nas projeções de custos de produção de uma cadeia de suprimentos de H<sub>2</sub>V localizada na Austrália.

Essas características que afetam os custos de produção são semelhantes ao caso descrito por Rodríguez-Gallegos *et al.* (2018), que trata do dimensionamento e da instalação

de energia fotovoltaica e baterias em sistemas operados por geradores a diesel. O estudo destaca o pior cenário possível para a planta com base nas condições meteorológicas e analisa detalhadamente os custos totais e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas a cada componente.

Para a presente cadeia de suprimentos em um cenário pessimista, foram consideradas as seguintes condições: custo médio de US\$ 7,00 por quilograma, uma demanda de 100 toneladas, considerando uma capacidade máxima de armazenamento de 120 toneladas e um custo energético constante que representando 80% do custo de produção. Isso resulta em um custo energético para esse cenário de US\$ 560.000,00 e US\$ 140.000,00 em custos operacionais.

Então, para iniciar o cenário pessimista, que será definido utilizando como fonte renovável a energia solar fotovoltaica, será apresentada a Tabela 10, que demonstra os parâmetros de entrada para a presente simulação, incluindo custos de produção unitária em dólares, consumo médio de água em litros e consumo de energia em kWh.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o cenário pessimista de energia solar.

<b>Cenário Pessimista</b>	<b>Demanda do H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo de 1kg de H<sub>2</sub>V</b>
Energia Solar	100 Toneladas	7 US\$ (Dólares)
<b>Consumo de água por 1 kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>kWh para produção 1kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo total de produção</b>
9 Litros de água	65 kWh	700.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

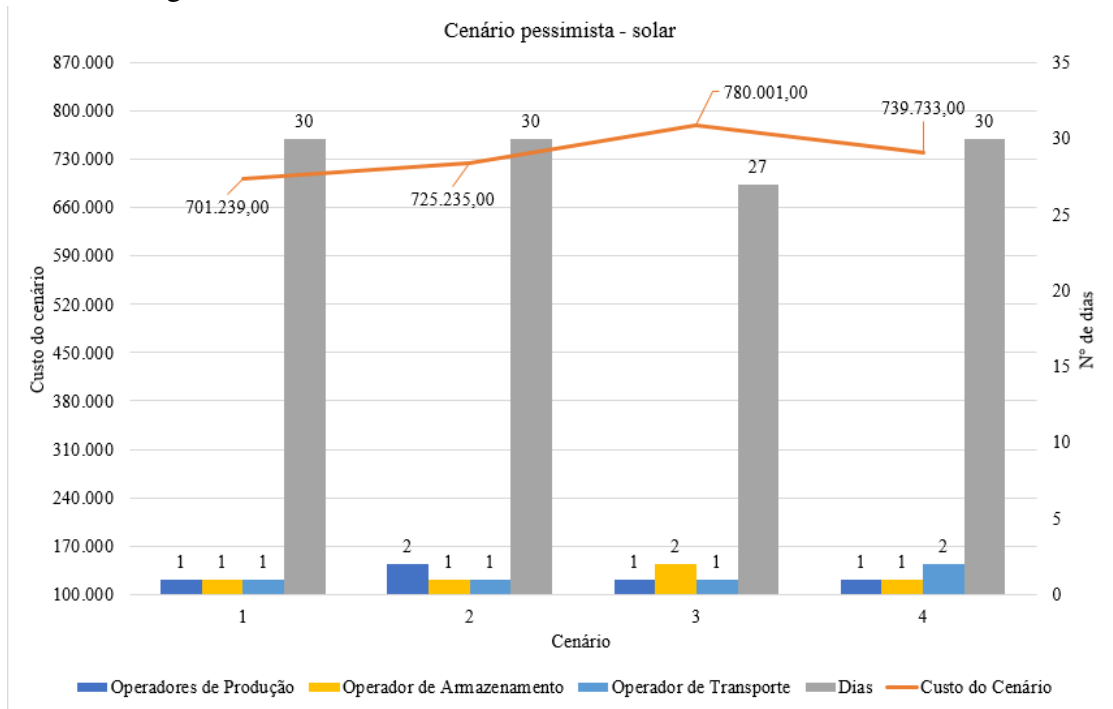
É importante destacar que um cenário pessimista leva em consideração a avaliação dos piores valores anteriormente citados. A partir dessas considerações, foram desenvolvidas as simulações dos custos de produção e operacionais, levando em conta as prioridades da Tabela 6 e a tomada de decisão da Tabela 8.

Para o presente cenário pessimista utilizando energia solar, o cenário 1 apresenta o valor de US\$ 701.239,00, enquanto o cenário 3 apresenta um custo de US\$ 780.001,00, o que significa um aumento de 11,43% em relação ao custo total de produção no pior cenário a partir de energia solar. Isso ressalta a possibilidade de utilização do *trade – off* e uma possível redução de 3 dias no respectivo cenário.

Para concluir o cenário em relação à infraestrutura da cadeia de suprimentos, com foco na capacidade de armazenamento para a simulação do cenário pessimista, observa-se que uma capacidade de 120 toneladas pode suprir a demanda de H<sub>2</sub>V no ambiente simulado.

Na Figura 22 são apresentados os custos de produção, abrangendo os encargos energéticos e operacionais, os quais foram divididos em custos de operação, de armazenamento, operacionais de transporte e de produção.

Figura 22 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia solar.



Fonte: Autor (2024)

É importante considerar que essa capacidade de armazenamento pode se tornar um possível gargalo em caso de não haver aumento na produção. A não utilização desse espaço de armazenamento resultaria em custos desnecessários para a empresa, pois seria equivalente a pagar por um espaço não utilizado. Isso pode levar os gestores a tomar decisões relacionadas à redução de custos, como a realocação ou redução do espaço de armazenamento, ou até mesmo a destinação do equipamento de estocagem para outras unidades de produção.

#### 4.6 Cenário B - Comum - Energia Eólica

Para o contexto do próximo cenário, a energia eólica é adotada como fonte renovável, possibilitando a produção de H<sub>2</sub>V por meio do método de eletrólise da água. Essa escolha proporciona flexibilidade na produção, como destacado por Kirchem e Schill (2023), que ressalta, em seus modelos de simulação, a importância das fontes renováveis para a descarbonização do setor energético.

Para o cenário comum referente à energia eólica foi considerado um período de 15 dias, visando atender a uma demanda de 50 toneladas de hidrogênio verde. Serão apresentados, na Tabela 11, os parâmetros de produção utilizados na cadeia produtiva em questão.

Tabela 11 – Parâmetros de entrada para o cenário comum de energia eólica.

<b>Cenário Comum</b>	<b>Demanda do H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo de 1kg de H<sub>2</sub>V</b>
Energia Eólica	50 Toneladas	6 US\$ (Dólares)
<b>Consumo de água por 1 kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>kWh para produção 1kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo total de produção</b>
9 Litros de água	60 kWh	300.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

Iniciando o processo de tomada de decisão para o presente contexto simulado são apresentadas, na Tabela 12, todas as etapas do processo decisório para toda a cadeia de suprimentos na produção de hidrogênio verde, considerando a demanda, a produção por fonte, o processo de produção, a forma de armazenamento e o modal de transporte utilizado a partir do cenário de energia eólica.

Tabela 12 – Possíveis tomadas de decisões para todos os cenários utilizando energia eólica.

<b>Escala de produção</b>	<b>Decisão</b>	<b>Produção por fonte</b>	<b>Decisão</b>	<b>Process. produção</b>	<b>Decisão</b>
Alta		Solar		Gaseificação	
Média	X	Eólica	X	Eletrólise da água	X
Baixa		Biomassa		Outro	
<b>Armazenamento</b>	<b>Decisão</b>	<b>Modal de transporte</b>	<b>Decisão</b>		
Tanque criogênico	X	Ferrovário	X		
Tan. de alta pressão		Rodoviário			
Outro		Hidroviário			

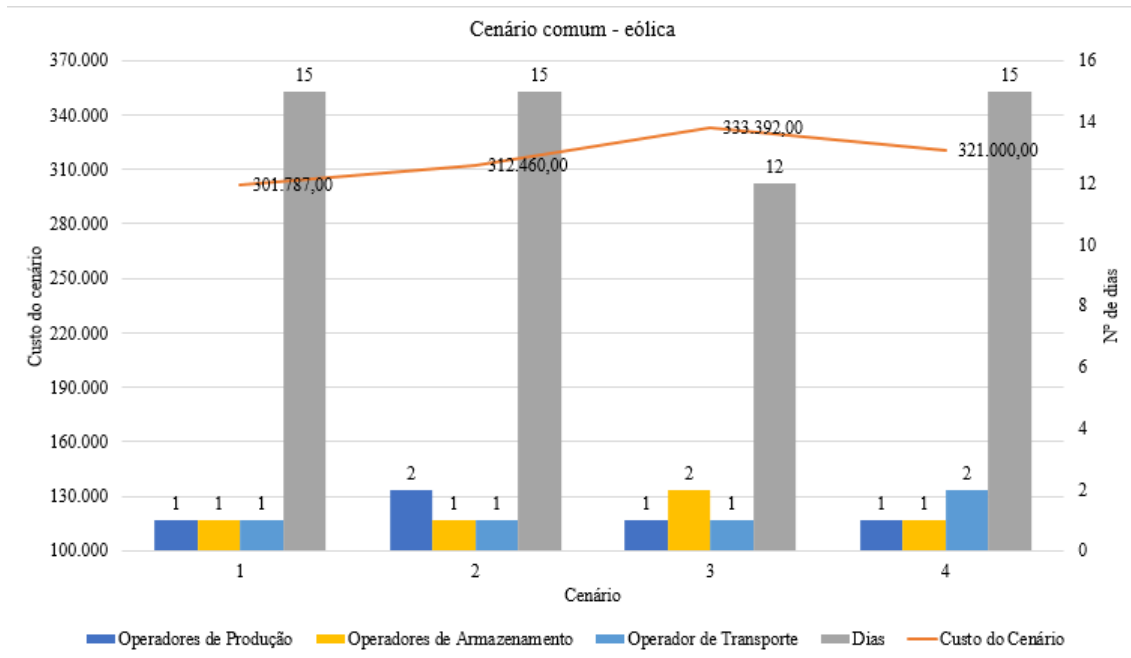
Fonte: Autor (2024)

Para a produção de H<sub>2</sub>V, derivada da fonte de energia eólica, foi utilizada uma demanda média para esse cenário, a qual varia de 31 a 69 toneladas, conforme a Tabela 4 demonstra, considerando uma perspectiva de produção média dos parques eólicos no Estado do Ceará para o cenário proposto na simulação. Para a programação da produção foi estipulada uma demanda de 50 toneladas de H<sub>2</sub>V com capacidade máxima de armazenamento de 55 toneladas, que também pode ser compreendida em uma das etapas da tomada de decisões na Tabela 12.

Para os custos de produção desse cenário comum de fonte eólica, foi estipulado o valor de US\$ 6,00 por quilograma de H<sub>2</sub>V, sendo este o preço médio para operação por quilograma. O custo total da linha produtiva é de US\$ 300.000,00, considerando que o custo energético de produção corresponde a 80% do custo de produção do H<sub>2</sub>V, totalizando US\$ 240.000,00, e 20% foram destinados às despesas operacionais, representando US\$ 60.000,00. Isso corresponde ao custo de toda a cadeia produtiva, conforme apresentado na Figura 23.



Figura 23 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia eólica.



Fonte: Autor (2024)

Os resultados finais de cada cenário simulado são observados. No cenário 3 é viável a aplicação do *trade – off*, permitindo a alocação de um operador no setor de armazenamento. Isso resulta em uma melhoria significativa no tempo de toda a cadeia produtiva, com uma redução de 3 dias no processo de produção. No entanto, isso acarreta em um aumento no custo final de 11,13%, repassado diretamente ao cliente conforme sua necessidade.

Para concluir sobre o cenário comum de energia eólica, surge a questão do armazenamento, que envolve a produção estipulada para um período máximo de 15 dias, com um limite máximo de 55 toneladas e uma margem mínima para estocagem, levando em conta potenciais adições operacionais à cadeia produtiva. No entanto é evidente a importância de uma análise produtiva, aspecto essencial para embasar as tomadas de decisão dos gestores.

#### 4.7 Cenário B - Otimista - Energia Eólica

Um cenário otimista em relação à energia eólica pode ser considerado levando em conta diversos fatores como critérios econômicos, nos quais um estudo financeiro é realizado para avaliar o retorno do investimento. Isso envolve desde a disponibilidade de mão de obra qualificada para possíveis manutenções preventivas nas torres eólicas, utilizando da menor forma possível a corretiva, com mínimos custos associados a esse fator, até aspectos ambientais, onde

se busca gerar o mínimo de prejuízo em relação ao meio ambiente local. O fator principal para essa respectiva simulação é determinado pela abundância do insumo necessário para a produção do H<sub>2</sub>V, características essas mencionadas por Kiwan e Amer (2023) em seu respectivo projeto.

Para uma perspectiva de cenário otimista referente à energia eólica, foi considerado um período de 15 dias para atender a uma demanda de 50 toneladas de hidrogênio verde e, serão apresentados na Tabela 13, os parâmetros de produção utilizados na cadeia produtiva em questão.

Tabela 13 – Parâmetros de entrada para o cenário otimista de energia eólica.

<b>Cenário Otimista</b>	<b>Demanda do H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo de 1kg de H<sub>2</sub>V</b>
Energia Eólica	50 Toneladas	5 US\$ (Dólares)
<b>Consumo de água por 1 kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>kWh para produção 1kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo total de produção</b>
9 Litros de Água	55 kWh	250.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

Em relação ao processo de tomada de decisão temos a Tabela 12, que determina a trajetória de ações para cada um dos processos produtivos, em cada momento respectivo da cadeia de produção do H<sub>2</sub>V, em relação aos cenários provenientes de energia eólica.

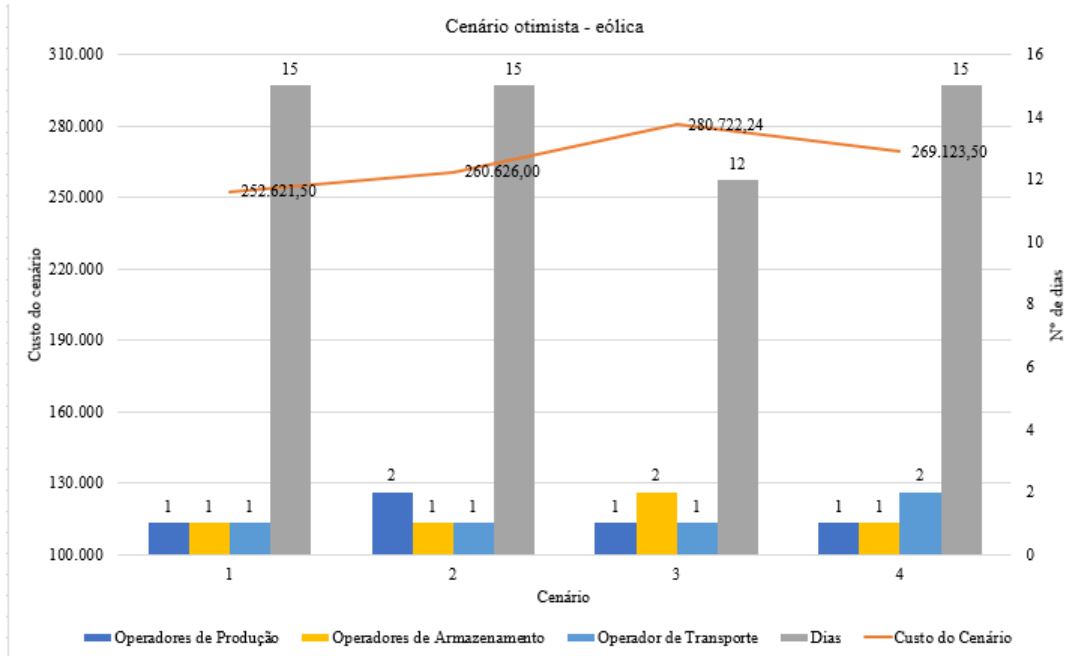
Para os custos de produção no cenário otimista baseado em energia eólica, o valor determinado é de US\$ 5,00 por quilograma, sendo o valor mínimo para a produção do H<sub>2</sub>V neste cenário. O custo total para a cadeia produtiva é de US\$ 250.000,00, considerando que o consumo energético representa 80% do custo de produção, equivalente a US\$ 200.000,00, e os demais encargos direcionados ao setor de produção representam 20%, equivalente a US\$ 50.000,00.

Para o cenário otimista, o cenário 1 é identificado como o de menor custo de produção, pois corresponde ao processo produtivo de maneira positiva e está próximo do valor inicial com o custo total de US\$ 252.621,50. No entanto, ainda há a possibilidade de considerar uma perspectiva alternativa e aplicar o *trade – off*, onde é possível reduzir a duração da produtividade em 3 dias, diminuindo o cenário para 12 dias, com um aumento de custos de 12,29% em relação ao valor inicial de produção.

Para concluir o cenário em relação à infraestrutura da cadeia de suprimentos, com foco na capacidade de armazenamento para a simulação do cenário otimista proveniente de energia eólica, observa-se que uma capacidade de 55 toneladas pode suprir a demanda de produção. No entanto, considerando o cenário 3 como uma possibilidade, seria viável produzir 5 toneladas adicionais de H<sub>2</sub>V, sem impactar a produção já desenvolvida e possibilitando atender a uma eventual emergência de produção. Isso poderia ser considerado como uma estratégia para otimizar custos e a produção, atendendo potenciais clientes.

A Figura 24 apresenta os valores referente a toda a cadeia produtiva do H<sub>2</sub>V para a presente simulação.

Figura 24 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia eólica.



Fonte: Autor (2024)

#### 4.8 Cenário B - Pessimista - Energia Eólica

Um cenário pessimista em relação à energia eólica pode ser descrito de maneira técnica, pois essa situação torna-se possível quando há aumentos significativos nos custos relacionados à energia elétrica, fator de impacto expressivo, considerando que a produção de hidrogênio verde requer uma grande quantidade de energia.

Um aspecto diretamente relacionado ao cenário pessimista e aos custos de produção é a manutenção das torres eólicas, especialmente quando os parques eólicos estão localizados em áreas distantes e remotas. Isso torna difícil a realização da manutenção e, conseqüentemente, a continuidade da cadeia produtiva. Esses são alguns pontos que podem caracterizar esse cenário, conforme mencionado por Yang *et al.* (2024), onde busca-se maximizar as atividades operacionais mesmo na pior situação.

Para o cenário pessimista referente à energia eólica, foi considerado um período de 15 dias para atender a uma demanda de 50 toneladas de H<sub>2</sub>V. Os resultados do sistema produtivo serão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros de entrada para o cenário pessimista de energia eólica.

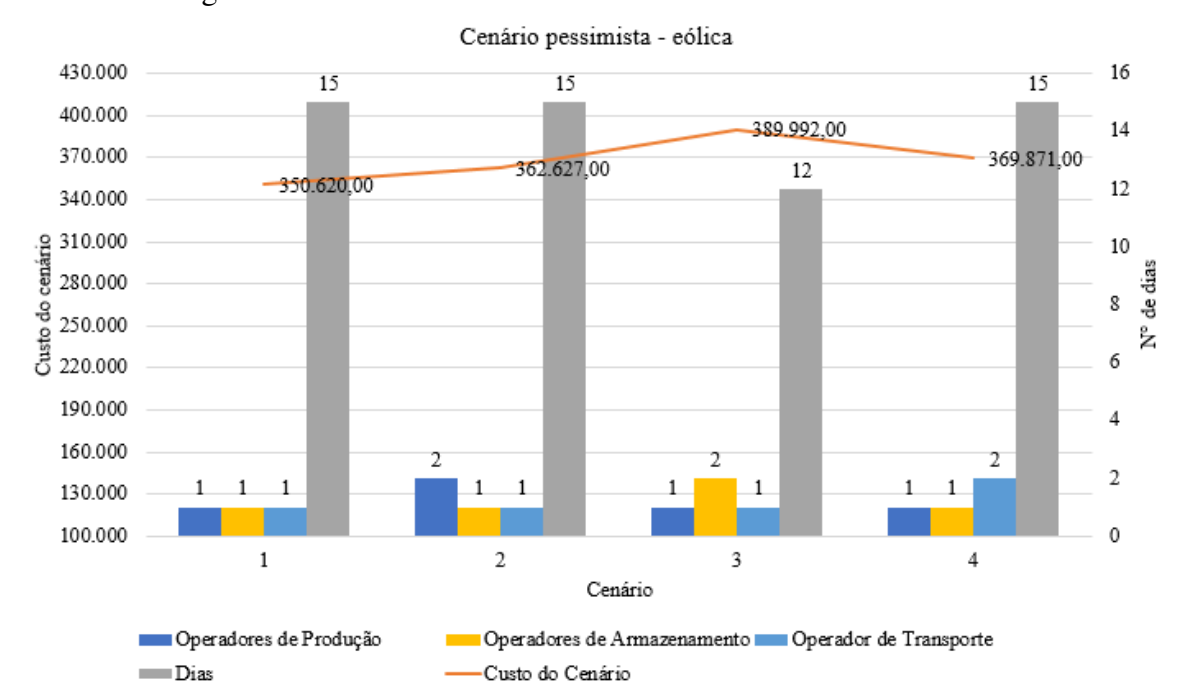
Cenário Pessimista	Demanda do H <sub>2</sub> V	Custo de 1kg de H <sub>2</sub> V
Energia Eólica	50 Toneladas	7 US\$ (Dólares)
Consumo de água por 1 kg de H <sub>2</sub> V	kWh para produção 1kg de H <sub>2</sub> V	Custo total de produção
9 Litros de água	65 kWh	350.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

Em relação ao processo de tomada de decisão, tem-se a Tabela 12, que determina a trajetória de ações para cada um dos processos produtivos em cada momento respectivo da cadeia produção do H<sub>2</sub>V em relação aos cenários provenientes de energia eólica.

Para os custos em um cenário pessimista, tem-se o valor médio por quilograma a um custo de US\$ 7,00, sendo este o mais elevado para a presente simulação. O custo total para a modelagem ficou dividido em US\$ 280.000,00 em gastos energéticos, representando 80% do custo total de produção, e US\$ 70.000,00 para custos operacionais, que representam os 20% conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia eólica.



Fonte: Autor (2024)

Em relação ao cenário pessimista, tem-se como alternativa para a produção o valor simulado de US\$ 350.620,00, resultante do cenário 1. No que diz respeito à aplicação do *trade-off* no cenário 3, observa-se um aumento de 8,28% nos custos de produtividade, porém com a possibilidade de atender à demanda em 12 dias.

Para concluir sobre a infraestrutura da cadeia de suprimentos no cenário pessimista, observa-se que uma capacidade de armazenamento de 55 toneladas pode atender uma possível demanda. No entanto, essa produção de média escala pode limitar a capacidade de atender determinados nichos de mercado. Isso pode ser considerado um gargalo pelos gestores, pois seria necessário um investimento adicional para expandir a capacidade de produção e explorar novos mercados.

#### 4.9 Cenário C - Comum - Energia de Biomassa

No último cenário é abordada a energia proveniente de biomassa, que será considerada como a fonte de menor quantidade de produção de hidrogênio verde. Neste cenário específico, a produção de H<sub>2</sub>V será realizada através da eletrólise da água, um método necessário para garantir que o produto final seja verdadeiramente renovável.

É importante salientar que a energia proveniente de biomassa pode variar em relação à escala de produção, podendo abranger grandes extensões de terras agrícolas ou mesmo pequenas produções rurais. No entanto, é válido ressaltar que ela enfrenta concorrência direta, o que pode ou não representar vantagens, dependendo do nível de produção. A concorrência direta geralmente ocorre com a indústria produtora de etanol, porém podem acontecer casos onde é influenciada a partir da demanda de pequenas localidades que utilizem esse insumo como forma de alimentação, conforme mencionado por Gondal *et al.* (2018) em um estudo de caso de produção de H<sub>2</sub>V no Paquistão.

No cenário atual, foi adotada uma produção considerada de pequena escala, uma vez que este contexto será levado em conta para possíveis tomadas de decisão para o Estado do Ceará. Com isso, tem-se uma demanda de 20 toneladas em um período de 6 dias. Na Tabela 15 são apresentados os parâmetros utilizados para a cadeia produtiva provenientes do insumo de biomassa.

Tabela 15 – Parâmetros de entrada para o cenário comum de energia de biomassa.

<b>Cenário Comum</b>	<b>Demanda do H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo de 1kg de H<sub>2</sub>V</b>
Energia de Biomassa	20 Toneladas	6 US\$ (Dólares)
<b>Consumo de água por 1 kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>kWh para produção 1kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo total de produção</b>
9 Litros de água	60 kWh	120.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

Com os parâmetros de produção apresentados, concebe-se o início dos processos de tomada de decisão, tais procedimentos são apresentados na Tabela 16. Esses procedimentos são utilizados ao longo de toda a simulação da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V. O processo de tomada de decisão é empregado em todo o período simulado, destacando todas as etapas dos processos produtivos do H<sub>2</sub>V, considerando a demanda, produção por fonte, forma de armazenamento e modal de transporte.

Tabela 16 – Possíveis tomadas de decisões para todos os cenários utilizando energia de biomassa.

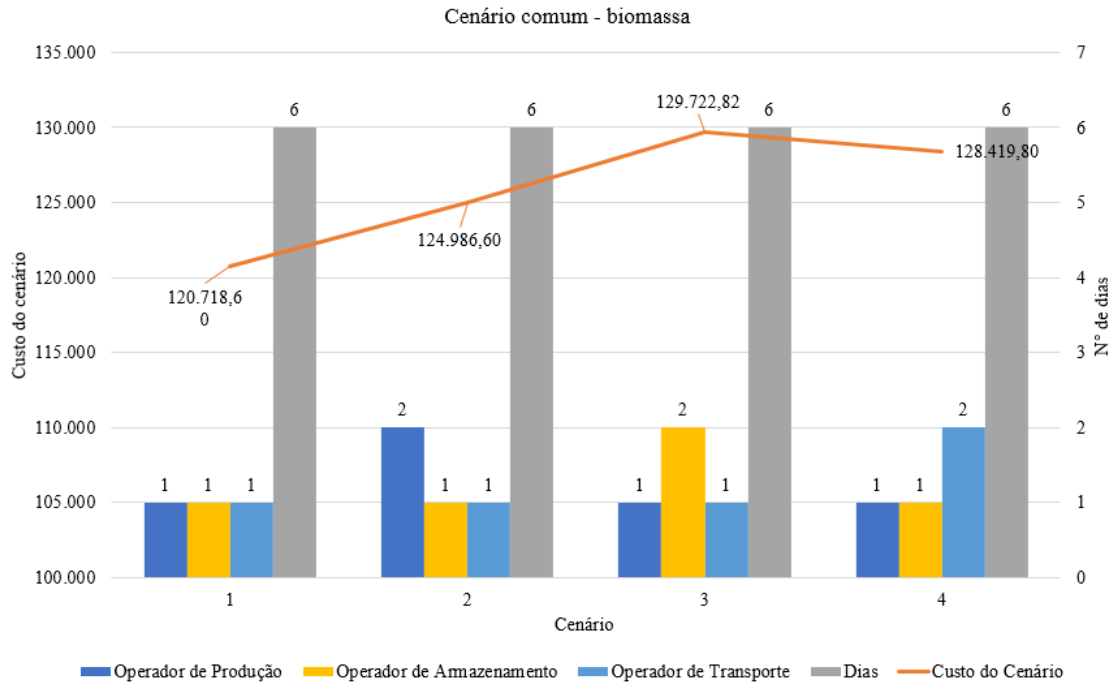
Escala de produção	Decisão	Produção por fonte	Decisão	Process. produção	Decisão
Alta		Solar		Gaseificação	
Média		Eólica		Outro	
Baixa	X	Biomassa	X	Eletrólise da água	X
Armazenamento	Decisão	Modal de transporte	Decisão		
Tanque criogênico		Ferroviário			
Tan. de alta pressão	X	Rodoviário	X		
Outro		Hidroviário			

Fonte: Autor (2024)

Para a simulação do respectivo cenário foi estipulada uma demanda de pequeno porte, variando de 1 a 30 toneladas, como apresentado na Tabela 4, considerando a perspectiva de produção em baixa escala proveniente de produtores locais ou mesmo empresas de pequeno porte do Estado do Ceará. Para o planejamento de produção, foi estabelecida uma demanda de 20 toneladas de H<sub>2</sub>V, com um armazenamento de mesma proporção, o que representa uma perspectiva importante, pois não será possível armazenar o excesso de produção do H<sub>2</sub>V.

O custo de produção para 1 quilograma de energia proveniente de insumo de biomassa é, em média, de US\$ 6,00, o que resulta em um custo total de US\$ 120.000,00, considerando a parcela constante utilizada no consumo energético, que representa 80% do custo de produção (US\$ 96.000,00) e 20% dos gastos operacionais (US\$ 24.000,00). Esses valores estão apresentados de forma mais clara na Figura 26.

Figura 26 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia a partir de biomassa.



Fonte: Autor (2024)

Com base na implementação dos valores na simulação, é possível realizar uma análise preliminar em que o cenário 1 corresponde ao melhor cenário simulado, com um custo total de US\$ 120.718,60. Isso demonstra que, mesmo com a adição de operadores em distintos setores de produtividade, não houve qualquer redução no tempo de operação dessa quantidade baixa de H<sub>2</sub>V. Observa-se que no cenário 3 não foi aplicável o *trade-off*, pois não apresentou qualquer mudança nesse contexto, o que sugere que são necessárias maiores quantidades de produção para que exista um gargalo na cadeia produtiva.

Em relação ao nível de produtividade, considerando uma escala de produção baixa e o nível máximo de armazenamento de 20 toneladas, surge uma complicação. Isso ocorre porque a presente cadeia produtiva não pode iniciar uma produção de H<sub>2</sub>V até que o estoque atual seja entregue ao cliente final. Assim, esta se torna uma possível solução a ser considerada para a tomada de decisões.

A sugestão para o presente cenário é utilizar um método de entrega pronto, no qual o cliente solicita a quantidade e a empresa produz exatamente a demanda referente a essa requisição, chamada de *just-in-time*, sendo uma ferramenta normalmente utilizada em gerenciamento de estoque. A definição de *just-in-time* ou (JIT) é caracterizada como uma forma de atender à demanda de maneira mais rápida, ou mesmo de forma imediata, visando

sempre a qualidade final do produto, a redução do desperdício e o estoque mínimo de insumos, conforme mencionado por (CHING, 2010).

#### 4.10 Cenário C - Otimista - Energia de Biomassa

Em um possível cenário otimista para a produção de H<sub>2</sub>V com a utilização de insumos a partir de biomassa, algumas possibilidades se destacam, como uma eventual alteração climática que poderá trazer uma perspectiva de aumento das chuvas para o Estado do Ceará. Isso pode ser comparado ao caso de estudo de Laganière *et al.* (2017), no qual é realizada a análise de um estudo de caso e é demonstrada a utilização de seus parâmetros, os quais estão ligados a alguns fatores, incluindo as mudanças climáticas. Isso poderá aumentar a produção dos pequenos produtores rurais e, conseqüentemente, trazer maiores quantidades de matéria-prima. Com base nessas condições e na possibilidade de tarifas energéticas com menor custo, é possível alcançar uma produção ótima para o cenário hipotético.

Então, considerando uma perspectiva para um cenário otimista utilizando matéria-prima proveniente de biomassa, tem-se uma demanda de 20 toneladas de hidrogênio verde em um período de 6 dias. Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros utilizados para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos.

Tabela 17 – Parâmetros de entrada para o cenário otimista de energia de biomassa.

<b>Cenário Otimista</b>	<b>Demanda do H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo de 1kg de H<sub>2</sub>V</b>
Energia Biomassa	20 Toneladas	5 US\$ (Dólares)
<b>Consumo de água por 1 kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>kWh para produção 1kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo total de produção</b>
9 Litros de água	55 kWh	100.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

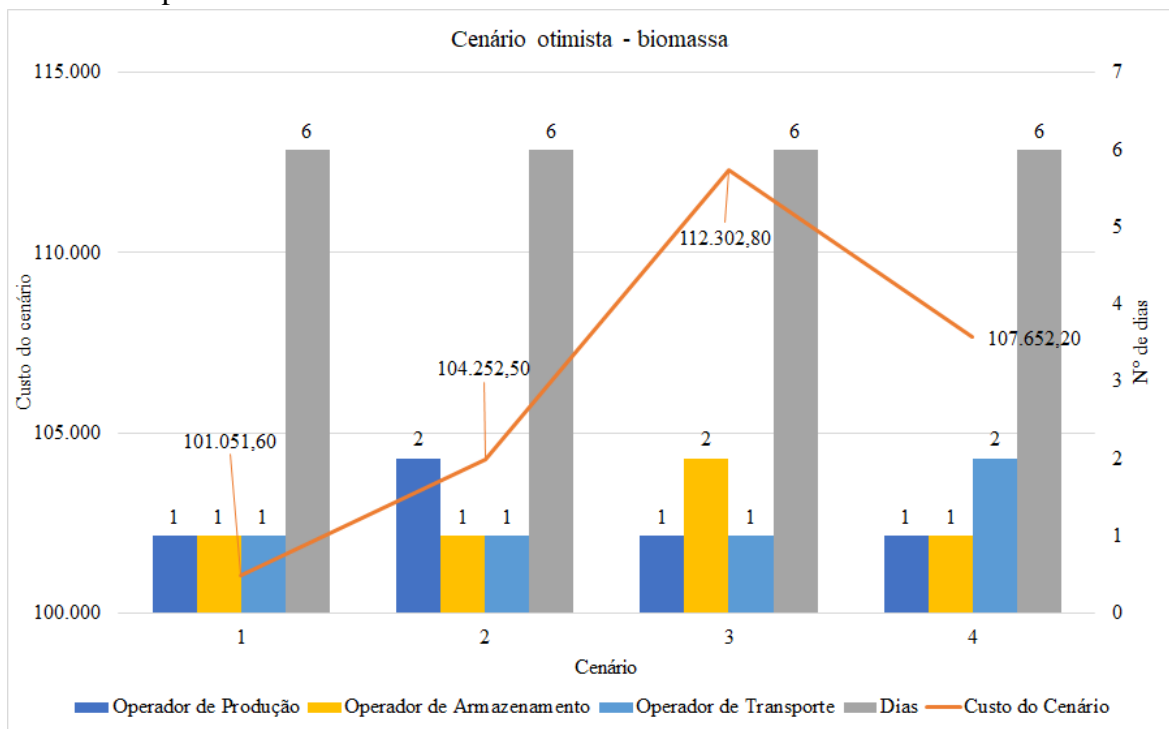
Para o processo de tomada de decisão, foi utilizada como base a Tabela 16, que considera e aborda cada etapa da rota em relação ao uso da energia proveniente de biomassa, levando em conta que o sistema produtivo utilizará essa energia elétrica vinda desse recurso para o processo de eletrólise da água em todos os cenários de produção.

Para o cenário otimista, utilizando energia proveniente de biomassa, foram considerados US\$ 5,00 por quilograma, sendo esse o valor mínimo para esse processo de produção, o custo total da cadeia produtiva em perspectiva do cenário favorável é de US\$ 100.000,00, considerando um custo energético de 80%, que representa US\$ 80.000,00, e demais encargos do setor produtivo, correspondendo a US\$ 20.000,00 do custo total da presente simulação.



Após o levantamento e a análise dos custos relativos ao cenário denominado como otimista, utilizando o insumo de biomassa, observa-se que o melhor custo para a simulação é o cenário 1, com um encargo total de US\$ 101.051,60. Por outro lado, o cenário 3 é identificado como o pior cenário possível, mesmo com o alojamento nos setores de produção, apresentando um custo de US\$ 112.302,80. Na Figura 27 são ilustrados, de forma clara, os custos totais da cadeia produtiva.

Figura 27 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia a partir de biomassa.



Fonte: Autor (2024)

Como possível tomada de decisão para esse cenário otimista, a sugestão é efetuar uma avaliação em relação ao nível de produção, com o propósito de analisar a quantidade demandada durante um período de 12 meses. Com essa perspectiva e de acordo com os resultados, é possível observar o nível máximo de produtividade e considerar um possível investimento em infraestrutura para possibilitar um maior volume de produção, e conseqüentemente uma maior capacidade de estocagem.

#### 4.11 Cenário C - Pessimista - Energia de Biomassa

Um cenário pessimista para uma eventual cadeia de suprimentos utilizando energia de biomassa está diretamente associado a algumas condições como, por exemplo, alterações

climáticas, condições do solo, tarifas energéticas e mão de obra operacional, fatores esses diretamente ligados à produtividade. A água é um elemento essencial para a produção do hidrogênio verde, onde características como, tarifas elevadas e escassez, são fatores consideradas desfavoráveis, conforme descrito e utilizado na perspectiva de Buchholz e Silva (2010), que utiliza a biomassa como fonte principal em seu sistema produtivo, competindo com outras formas energéticas no respectivo cenário.

Outras variáveis que podem influenciar diretamente no método produtivo estão relacionadas à demanda do insumo, já que é necessária uma quantidade substancial para gerar o H<sub>2</sub>V. Isso pode tornar a produção inviável, caso haja concorrência direta com o setor alimentício, considerando uma baixa produtividade para o presente cenário, o que pode afetar no sistema produtivo de pequenas empresas em localidades rurais do Estado do Ceará.

Para o desenvolvimento do cenário pessimista proveniente de energia de biomassa, foi considerada uma produção de 20 toneladas para um período de 6 dias. A Tabela 18 demonstra os parâmetros utilizados na linha de produção.

Tabela 18 – Parâmetros de entrada para o cenário pessimista de energia de biomassa.

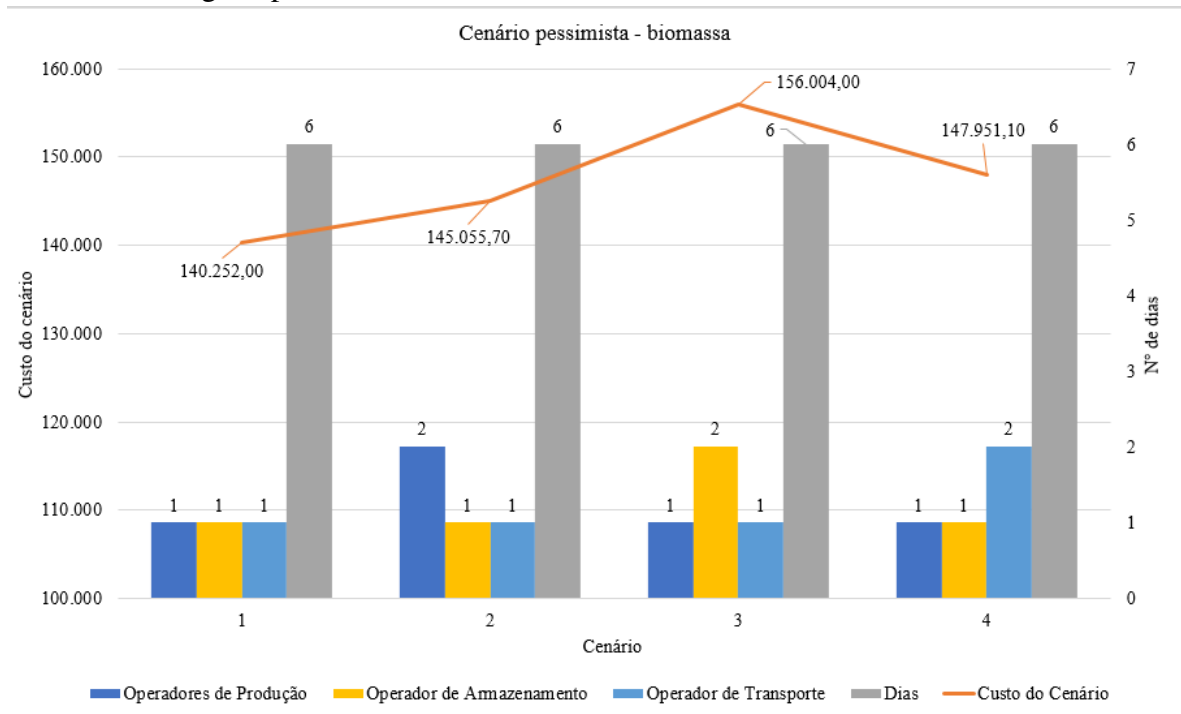
<b>Cenário Pessimista</b>	<b>Demanda do H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo de 1kg de H<sub>2</sub>V</b>
Energia Biomassa	20 Toneladas	7 US\$ (Dólares)
<b>Consumo de água por 1 kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>kWh para produção 1kg de H<sub>2</sub>V</b>	<b>Custo total de produção</b>
9 Litros de água	65 kWh	140.000,00

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2020); Rasul *et al.* (2022)

Em relação ao processo de tomada de decisão, foi adotada a mesma sequência de procedimentos apresentada na Tabela 16, onde são caracterizadas cada uma das etapas para a produção do H<sub>2</sub>V.

No que concerne aos custos associados à cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V, provenientes da utilização de energia a partir de biomassa, em um cenário pessimista, tem-se o valor de produção de US\$ 7,00, para 1 quilograma, sendo este encargo o pior possível para a respectiva modelagem, fator que influencia em toda a cadeia produtiva, uma vez que o custo total da cadeia de suprimentos é de US\$ 140.000,00, divididos em 80% de custos energéticos (US\$ 112.000,00) e 20% de gastos operacionais (US\$ 28.000,00). Na Figura 28 são apresentados os custos da cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V em um cenário pessimista.

Figura 28 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia a partir de biomassa.



Fonte: Autor (2024)

Para a presente simulação da cadeia de suprimentos a partir da utilização de biomassa, em uma perspectiva pessimista, o cenário 1 que apresenta o valor de US\$ 140.252,00, enquanto o cenário 3 aponta um custo de US\$ 156.004,00, significando um aumento de 11,43% em relação ao custo total de produção em um cenário desfavorável.

No presente cenário pessimista, a partir da energia de biomassa, uma possível decisão é realização de uma análise direta dos concorrentes, que utilizam o insumo proveniente do bagaço, como o setor alimentício ou a produção de etanol. Com isso em mente e de acordo com os resultados, é possível ter uma perspectiva em relação a investimentos futuros. Como esse insumo é utilizado por concorrentes diretos, talvez seja necessário manter a produtividade em um nível mínimo até que seja possível buscar alternativas de insumo para a produção de H<sub>2</sub>V, permitindo assim competir de forma mais eficaz nesse mercado.

## 5 CONCLUSÃO

A busca por fontes energéticas renováveis que substituam os meios fósseis previstos para esgotamento nas próximas décadas, como insumo para a produção de energia elétrica, representa um dos impasses da atualidade. Este desafio é impulsionado por diversos fatores e, notadamente, há necessidade premente de descarbonização em setores-chave em resposta às mudanças climáticas globais, impactando diretamente na saúde do planeta. Além disso, destaca-se a urgência em suprir a crescente demanda energética global de forma sustentável. Nesse cenário, surge o conceito de hidrogênio verde como um vetor energético promissor, capaz de oferecer uma alternativa viável para atender a essa necessidade em escala global.

O hidrogênio, disponível em abundância em todo o planeta, é derivado de diversas fontes. No entanto, para ser considerado hidrogênio verde, é necessário que sua produção provenha exclusivamente de fontes renováveis como energia solar, eólica e de biomassa. Essa distinção é essencial, pois confere ao hidrogênio um status de solução energética sustentável, capaz não apenas de atender à crescente demanda por energia mas, também, de mitigar os efeitos do aquecimento global ao evitar a emissão de CO<sub>2</sub>, associada à produção de outras fontes energéticas.

Com o surgimento do hidrogênio verde, emerge uma possível alternativa para atender essa crescente demanda por energia. No entanto, para que essa transição se concretize, é necessário enfrentar um longo percurso repleto de desafios, uma vez que esse vetor energético afronta possíveis obstáculos relacionados a diversos processos onde, o primeiro deles, está diretamente ligado ao custo energético, que pode representar até 80% dos custos totais de produção, tornando-se uma barreira significativa. Além disso, outro aspecto de suma importância é a demanda por uma quantidade substancial de água, dado que o método predominante para gerar o H<sub>2</sub>V é a eletrólise da água, um processo essencial durante a etapa produtiva.

Outro obstáculo relacionado à utilização do hidrogênio verde, é armazenamento, visto que, devido ao tamanho da molécula do hidrogênio, torna-se desafiador estocá-lo. Além disso, há a necessidade de encontrar formas de transporte adequadas, o que requer uma adaptação significativa dos modais existentes para garantir eficiência e segurança no transporte do hidrogênio. Essa demanda por infraestrutura especializada ressalta a necessidade de investimentos substanciais para o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos do H<sub>2</sub>V.

Com a crescente necessidade da utilização do hidrogênio verde, uma expectativa se forma em torno da adoção dessa fonte energética pelo mundo, o que naturalmente direciona o foco

para os países que possuem ou podem produzir esses insumos em abundância. Nesse contexto o Brasil desponta como um dos países, quiçá o principal, com maior potencial energético para a produção de  $H_2V$  a nível global. Isso se deve em grande parte aos altos índices de irradiação solar que o Brasil recebe ao longo de todo o ano, o que impulsiona e potencializa significativamente a utilização da energia solar como fonte primária para a produção de hidrogênio verde.

Em relação a energia eólica, tem-se bons indicadores e uma das melhores capacidades de produção energética por meio desse vetor. Isso representa bons indicativos, principalmente quando considerada a região Nordeste do Brasil, que destaca-se entre as maiores potências referente a produção energética derivada dos parques eólicos.

Tratando-se da energia oriunda da utilização de biomassa, o Brasil apresenta cenários altamente favoráveis. Como um dos maiores produtores de grãos do mundo, o país está constantemente entre os principais competidores, rivalizando diretamente com potências como China e Estados Unidos. Essa posição de destaque reflete indicadores robustos de produção, que indicam um grande potencial para a utilização da biomassa, especialmente o bagaço, como fonte energética.

A partir do contexto apresentado foram desenvolvidas modelagens e simulações, atividades logísticas essenciais para avaliar a cadeia de suprimentos do  $H_2V$ , utilizando três tipos de fontes de energia renovável: solar, eólica e de biomassa. Essa abordagem abrange o objetivo principal da presente investigação. Foram conduzidas análises de cenários em diferentes contextos, divididos em cenários comuns, otimistas e pessimistas.

A construção desta simulação teve como propósito principal mapear todas as atividades logísticas de uma cadeia de suprimentos de hidrogênio verde, além de determinar os custos de produção, os quais foram subdivididos em custos energéticos e operacionais. Esses aspectos foram diretamente alinhados aos objetivos específicos deste trabalho. Além disso, o projeto teve como meta desenvolver uma base de dados que pudesse servir de apoio para possíveis ações, na tomada de decisão dos gestores, em relação à cadeia de suprimentos do  $H_2V$  para o Estado do Ceará, onde é inexistente. Com isso, conclui-se a presente dissertação.

Quanto as limitações da presente investigação, é importante mencionar os impedimentos atribuídos à versão estudantil utilizada, que compreende apenas 150 módulos para a construção de toda a cadeia de suprimentos. Essa restrição acabou por limitar a simulação e a modelagem de uma cadeia logística ampliada, visto que o processo produtivo pode tornar-se muito maior, dependendo da demanda.

Outra dificuldade encontrada é à escassez de estudos e trabalhos referentes a temas como a simulação voltada para a cadeia do hidrogênio verde. Este é um assunto alvo de pesquisas e investigações recentes, mas que ainda carece de avanços significativos em termos de pesquisa, investimento e desenvolvimento de mercado para possibilitar sua real utilização como meio energético predominante.

Para futuros trabalhos, considerando a demanda contínuo por fontes alternativas de energia para suprir as necessidades globais, é essencial realizar investimentos mais robustos em pesquisa, tecnologia e qualificação de mão de obra. Esses investimentos sugerem um aumento significativo nos recursos destinados a esse tema. Como resultado torna-se imperativo buscar formas de reduzir o custo de produção do hidrogênio verde para viabilizar seu sistema produtivo em maior escala. Esse esforço poderia incluir o desenvolvimento de novas tecnologias, a otimização de processos e a implementação de políticas governamentais que incentivem a adoção e a produção em larga escala do H<sub>2</sub>V.

Para essa simulação foram adotados valores de custo variando entre US\$ 5,00 e US\$ 7,00, devido ao elevado gasto energético envolvido na produção do hidrogênio verde. Essa variação de custos foi aplicada a cada cenário de produção, seja ele comum, otimista ou pessimista. No entanto, para que o H<sub>2</sub>V possa ser competitivo no mercado, é essencial alcançar uma significativa redução de custos. Isso pode ser exemplificado pelos custos associados ao hidrogênio cinza, os quais podem ser até 80% menores do que os custos do hidrogênio verde. Essa comparação destaca a necessidade urgente de encontrar soluções para reduzir os encargos de produção do H<sub>2</sub>V e torná-lo economicamente viável.

Para que o hidrogênio verde possa ser estabelecido como a principal fonte energética em escala global, é essencial que o custo desse vetor energético seja reduzido para um intervalo entre US\$ 1,00 e US\$ 1,20 dólares. Esse patamar de custo possibilitará uma maior competitividade no mercado energético. Portanto, sugere-se o desenvolvimento de novos cenários que incorporem esses custos revisados, permitindo a implementação de um novo modelo de análise. Isso criará novos parâmetros para possíveis tomadas de decisão e auxiliará os gestores para uma administração eficaz da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde em cenários futuros.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, V. H. S. d.; CORALLI, A.; PROENÇA, L. F. C.; SANTOS, A. S. An overview of life cycle assessment of renewable hydrogen. Grupo de Pesquisa Virtuhab/UFSC, 2023.
- AGNOLUCCI, P.; AKGUL, O.; MCDOWALL, W.; PAPAGEORGIOU, L. G. The importance of economies of scale, transport costs and demand patterns in optimising hydrogen fuelling infrastructure: An exploration with shipmod (spatial hydrogen infrastructure planning model). **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 38, n. 26, p. 11189–11201, 2013.
- ALVES, J. L.; CHAGAS, M. J. R.; FARIA, E. d. O.; CALDEIRA-PIRES, A. d. A. Economia circular e energias renováveis: uma análise bibliométrica da literatura internacional. **Interações (Campo Grande)**, SciELO Brasil, v. 23, p. 267–283, 2022.
- AMARAL, J. V. **Trade-offs de custos logísticos**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: uma ferramenta r para análise abrangente de mapeamento científico. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- ARSAD, A. Z.; HANNAN, M.; AL-SHETWI, A. Q.; HOSSAIN, M.; BEGUM, R.; KER, P. J.; SALEHI, F.; MUTTAQI, K. Hydrogen electrolyser for sustainable energy production: A bibliometric analysis and future directions. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 48, n. 13, p. 4960–4983, 2023.
- BARRETO, M. de S.; NASCIMENTO, F. **Administração—novas perspectivas: adquirir competências para uma alta performance**. [S.l.]: Alta Books, 2022.
- BETHOUX, O. Hydrogen fuel cell road vehicles and their infrastructure: An option towards an environmentally friendly energy transition. **Energies**, MDPI, v. 13, n. 22, p. 6132, 2020.
- BEZERRA, D. A.; ANDRADE, C. F. de; ALMEIDA, A. F. L.; BUENO, A. V.; LOBO, F. L. Análise bibliométrica das publicações relacionadas à produção de hidrogênio e fonte solar fotovoltaica. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–9.
- BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. Banco do Nordeste do Brasil, 2021.
- BUCHHOLZ, T.; SILVA, I. D. Potential of distributed wood-based biopower systems serving basic electricity needs in rural uganda. **Energy for Sustainable Development**, Elsevier, v. 14, n. 1, p. 56–61, 2010.
- CARDOSO, A. F. S. **Projeto de Sistema de Produção Municipal de Hidrogênio Verde**. Tese (Doutorado), 2022.
- CASTRO, L. F.; CARVALHO, P.; SARAIVA, J.; FIDALGO, J. N. Photovoltaic projects for multidimensional poverty alleviation: bibliometric analysis and state of the art. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 14, n. 2, p. 507–522, 2024.
- CHIAVENATO, I. Gestão da produção: uma abordagem introdutória. **Barueri, São Paulo**, p. 11, 2014.
- CHING, H. Gestão estratégica de estoques na cadeia de logística integrada. **São Paulo**, 2010.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. [S.l.]: Autores, 2006.

CORRÊA, H. L. Administração de cadeias de suprimentos e logística-integração na era da indústria 4.0. **Porto Alegre: Grupo GEN**, 2019.

DIAS, M. A. P. **Administração de Materiais - Uma Abordagem Logística**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788597022100. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597022100/>>.

DONATO, V.; VIEIRA, C. S.; ANDRADE, M. S.; ALBUQUERQUE, R. V.; SANTOS, C. C. R. Resiliência da cadeia de suprimentos do hidrogênio verde. **Revista Foco**, v. 16, n. 1, p. e821–e821, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas)**. 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

EPE. **Balanco Energético Nacional [Brazilian Energy Balance]**. 2021.

EPE. Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio. **Nota Técnica No EPE-DEA-NT-003/2021**. Brasília: EPE, 2021.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021: Revisão Pós-consulta Pública - Revisão Final**. 2022. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-637/PDE%202031\\_RevisaoPosCP\\_rvFinal\\_v2.pdf#search=de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20renov%C3%A1vel%20em%20todo%20o%20mundo%20at%C3%A9%20o%20ano](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-637/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf#search=de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20renov%C3%A1vel%20em%20todo%20o%20mundo%20at%C3%A9%20o%20ano)>.

FAGUNDES, M. V. C. *et al.* Modelagem da gestão de riscos da cadeia de suprimentos na indústria de petróleo e gás. Universidade Federal da Bahia, 2021.

FARO, M. L.; CANTANE, D.; NARO, F. In the path for creating research-to-business new opportunities on green hydrogen between italy and brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, 2022.

FAZLI-KHALAF, M.; NADERI, B.; MOHAMMADI, M.; PISHVAEE, M. S. Design of a sustainable and reliable hydrogen supply chain network under mixed uncertainties: A case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 45, n. 59, p. 34503–34531, 2020.

FERNANDES, C. H. d. A. **Proposição de um modelo multicritério para suporte ao gerenciamento de sistemas de coleta de resíduos eletroeletrônicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

FERNANDES, G.; AZEVEDO, J. H. d.; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no brasil. FGV ENERGIA, 2023.

GENOVESE, M.; PIRAINO, F.; FRAGIACOMO, P. 3e analysis of a virtual hydrogen valley supported by railway-based h2 delivery for multi-transportation service. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 191, p. 114070, 2024.



- GHAFFRI, S. Z. A.; REVELL, C.; LORENZO, M. D.; XIAO, G.; BUCKLEY, C. E.; MAY, E. F.; JOHNS, M. Techno-economic and environmental assessment of lng export for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, 2022.
- GHASEMI, A.; FARAJZADEH, F.; HEAVEY, C.; FOWLER, J.; PAPADOPOULOS, C. T. Simulation optimization applied to production scheduling in the era of industry 4.0: A review and future roadmap. **Journal of Industrial Information Integration**, Elsevier, p. 100599, 2024.
- GODINHO, J.; HOEFNAGELS, R.; BRAZ, C. G.; SOUSA, A. M.; GRANJO, J. F. An economic and greenhouse gas footprint assessment of international maritime transportation of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers. **Energy**, Elsevier, v. 278, p. 127673, 2023.
- GONDAL, I. A.; MASOOD, S. A.; KHAN, R. Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in pakistan. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 43, n. 12, p. 6011–6039, 2018.
- GREGÓRIO, G. F. P.; LOZADA, G. Simulação de sistemas produtivos. **Revisão Técnica de Henrique Martins Rocha. Porto Alegre: SAGAH**, 2019.
- GUEDES, K. S. Aplicação de algoritmos de otimização metaheurísticos na estimativa dos parâmetros ótimos de diferentes distribuições de velocidade do vento em duas cidades do nordeste brasileiro. 2020.
- GUERRINI, F. M.; BELHOT, R. V.; JUNIOR, W. A. Planejamento e controle da produção. **Projeto e operação de sistemas. 1ª Ed. Editora Elsevier. Rio de Janeiro**, 2014.
- HANNAN, M.; ABU, S. M.; AL-SHETWI, A. Q.; MANSOR, M.; ANSARI, M.; MUTTAQI, K. M.; DONG, Z. Hydrogen energy storage integrated battery and supercapacitor based hybrid power system: A statistical analysis towards future research directions. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 47, n. 93, p. 39523–39548, 2022.
- HASSAN, Q.; ALGBURI, S.; SAMEEN, A. Z.; JASZCZUR, M.; SALMAN, H. M.; MAHMOUD, H. A.; AWWAD, E. M. Saudi arabia energy transition: Assessing the future of green hydrogen in climate change mitigation. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 55, p. 124–140, 2024.
- HEUBLEIN, N.; STELZNER, M.; SATTELMAYER, T. Hydrogen storage using liquid organic carriers: Equilibrium simulation and dehydrogenation reactor design. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 45, n. 46, p. 24902–24916, 2020.
- HOELZEN, J.; FLOHR, M.; SILBERHORN, D.; MANGOLD, J.; BENSMANN, A.; HANKE-RAUSCHENBACH, R. H<sub>2</sub>-powered aviation at airports—design and economics of lh<sub>2</sub> refueling systems. **Energy Conversion and Management: X**, Elsevier, v. 14, p. 100206, 2022.
- JAHANBAKHSI, A.; POTAPOV-CRIGHTON, A. L.; MOSALLANEZHAD, A.; KALOORAZI, N. T.; MAROTO-VALER, M. M. Underground hydrogen storage: A uk perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 189, p. 114001, 2024.
- KARAYEL, G. K.; JAVANI, N.; DINCER, I. A comprehensive assessment of energy storage options for green hydrogen. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 291, p. 117311, 2023.

- KENEZ, M. C.; DINCER, I. Development and assessment of an offshore-based integrated hydrogen production and liquefaction system. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 236, p. 121574, 2024.
- KIM, S.; PARK, J.; CHUNG, W.; ADAMS, D.; LEE, J. H. Techno-economic analysis for design and management of international green hydrogen supply chain under uncertainty: An integrated temporal planning approach. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 301, p. 118010, 2024.
- KIRCHEM, D.; SCHILL, W.-P. Power sector effects of green hydrogen production in germany. **Energy Policy**, Elsevier, v. 182, p. 113738, 2023.
- KIWAN, S.; AMER, M. A. Renewable energy scenarios for water desalination and conveyance: Case of red sea-dead sea project. **Renewable Energy Focus**, Elsevier, v. 46, p. 281–302, 2023.
- KONDA, N. M.; SHAH, N.; BRANDON, N. P. Optimal transition towards a large-scale hydrogen infrastructure for the transport sector: The case for the netherlands. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 36, n. 8, p. 4619–4635, 2011.
- KOTAGODAHETTI, R.; HEWAGE, K.; PERERA, P.; SADIQ, R. Technology and policy options for decarbonizing the natural gas industry: A critical review. **Gas Science and Engineering**, Elsevier, p. 204981, 2023.
- KUNRATH, T. L.; DRESCH, A.; VEIT, D. R. Supply chain management and industry 4.0: a theoretical approach. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 20, n. 1, p. 1263–1263, 2023.
- LAGANIÈRE, J.; PARÉ, D.; THIFFAULT, E.; BERNIER, P. Y. Range and uncertainties in estimating delays in greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy sourced from canadian forests. **Gcb Bioenergy**, Wiley Online Library, v. 9, n. 2, p. 358–369, 2017.
- LAHNAOUI, A.; WULF, C.; DALMAZZONE, D. Optimization of hydrogen cost and transport technology in france and germany for various production and demand scenarios. **Energies**, MDPI, v. 14, n. 3, p. 744, 2021.
- LEÃO, R. A agenda 2030 das nações unidas e as energias renováveis no brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2019.
- LIAO, X.; HALL, J. W.; EYRE, N. Water use in china's thermoelectric power sector. **Global Environmental Change**, Elsevier, v. 41, p. 142–152, 2016.
- LIMA, V. O. Hidrogênio verde como fonte de energia: visão geral sobre iniciativas regulatórias no brasil. Universidade Federal do Pampa, 2023.
- MAÇÃES, M. A. R. **Planeamento, Estratégia e Tomada de Decisão-Vol IV**. [S.l.]: Leya, 2017. v. 4.
- MARCO, M. O. de. **Armazenagem de hidrogênio no estado sólido: uma avaliação multicritério e experimental de hidretos metálicos**. Tese (Doutorado) — [sn], 2018.
- MARCONI, M. d. A.; LAKATOS, E. Fundamentos da metodologia científica. 7ª edição-são paulo: Atlas. 2010.

MARZOUK, O. A. 2030 ambitions for hydrogen, clean hydrogen, and green hydrogen. **Engineering Proceedings**, MDPI, v. 56, n. 1, p. 14, 2023.

MATOS, N. S. C.; SILVA, J. V. de M.; SANTOS, P. F. T.; ROCHA, Í. N.; NETO, J. A. C. Análise bibliométrica da produção científica sobre turbinas eólicas de eixo vertical. In: **VII ENPI-Encontro Nacional de Propriedade Intelectual**. [S.l.: s.n.], 2021.

MEHR, A. S.; PHILLIPS, A. D.; BRANDON, M. P.; PRYCE, M. T.; CARTON, J. G. Recent challenges and development of technical and techno-economic aspects for hydrogen storage, insights at different scales; a state of art review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 70, p. 786–815, 2024.

MELO, G. de A. **Simulação Estocástica Conjunta de Energias Renováveis**. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2022.

MENIN, L.; BENEDETTI, V.; PATUZZI, F.; BARATIERI, M. Techno-economic modeling of an integrated biomethane-biomethanol production process via biomass gasification, electrolysis, biomethanation, and catalytic methanol synthesis. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Springer, p. 1–22, 2020.

MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; TURRIONI, J.; HO, L. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. **Rio de Janeiro: Elzevir**, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

MIO, A.; BARBERA, E.; PAVAN, A. M.; BERTUCCO, A.; FERMEGLIA, M. Sustainability analysis of hydrogen production processes. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 54, p. 540–553, 2024.

MOELLMANN, A. H. Aplicação da teoria das restrições no gerenciamento da cadeia de suprimentos. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2008.

MONTEVECHI, B.; BOWDEN, R. O.; GOGG, T. J.; HARRELL, C. R. **Simulação De Sistemas: Aprimorando Processos de Logística, Serviços e Manufatura**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2013. v. 1.

MORADI, R.; GROTH, K. M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 44, n. 23, p. 12254–12269, 2019.

MORENO-BENITO, M.; AGNOLUCCI, P.; PAPAGEORGIOU, L. G. Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 102, p. 110–127, 2017.

MOURTZIS, D.; DOUKAS, M.; BERNIDAKI, D. Simulation in manufacturing: Review and challenges. **Procedia Cirp**, Elsevier, v. 25, p. 213–229, 2014.

MURESAN, M.; CORMOS, C.-C.; AGACHI, P.-S. Techno-economical assessment of coal and biomass gasification-based hydrogen production supply chain system. **Chemical Engineering Research and Design**, Elsevier, v. 91, n. 8, p. 1527–1541, 2013.

NASCIMENTO, L. M. d. **Modelagem e análise de um sistema de armazenagem de produtos perecíveis utilizando simulação de eventos discretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

OLIVEIRA, A. C. R.; FERNADES, N.; MOREIRA, M.; SILVA, R. O uso do hidrogênio como fonte energética. **XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial**. Belo Horizonte-MG, Brasil, 2011.

OLIVEIRA, A. C. R. de. O uso do hidrogenio como fonte energÉtica. In: **Xxxi Encontro Nacional de Engenharia de Producao**. [S.l.: s.n.], 2011.

OLIVEIRA, J. B. d. Gestão de riscos logísticos em cadeias de suprimentos: Otimização via metamodelo de simulação. 2019.

OLIVEIRA, R. C. d. Panorama do hidrogênio no brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022.

OZBILEN, A.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. A comparative life cycle analysis of hydrogen production via thermochemical water splitting using a cu-cl cycle. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 36, n. 17, p. 11321–11327, 2011.

PAPADIAS, D. D.; PENG, J.-K.; AHLUWALIA, R. K. Hydrogen carriers: Production, transmission, decomposition, and storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 46, n. 47, p. 24169–24189, 2021.

PARENTE, P. A. Análise do cenário global político-econômico do setor de energias renováveis com foco nas fontes solar fotovoltaica e eólica (2010-2016). 2018.

PEREIRA, H. A. Proposta de aplicação do hidrogênio verde via energia eólica no transporte coletivo urbano de fortaleza. 2022.

PEREIRA, L. A. Viabilidade na produção de hidrogênio através da reação entre o alumínio e a água em meio alcalino. 2017.

PIVETTA, D.; DALL'ARMI, C.; SANDRIN, P.; BOGAR, M.; TACCANI, R. The role of hydrogen as enabler of industrial port area decarbonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 189, p. 113912, 2024.

PRATA, B. d. A.; JÚNIOR, E. F. N.; BARROSO, G. C. A stochastic colored petri net model to allocate equipments for earth moving operations. *Journal of Information Technology in Construction*, 2008.

RAMIREZ-VIDAL, P.; SDANGHI, G.; CELZARD, A.; FIERRO, V. High hydrogen release by cryo-adsorption and compression on porous materials. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 47, n. 14, p. 8892–8915, 2022.

RASUL, M.; HAZRAT, M.; SATTAR, M.; JAHIRUL, M.; SHEARER, M. The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 272, p. 116326, 2022.

REZAEI, M.; AKIMOV, A.; GRAY, E. M. Economics of renewable hydrogen production using wind and solar energy: A case study for queensland, australia. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 435, p. 140476, 2024.

REZAEI, M.; SAMETI, M.; NASIRI, F. Design optimization of an integrated tri-generation of heat, electricity, and hydrogen powered by biomass for cold climates. **International Journal of Thermofluids**, Elsevier, p. 100618, 2024.

RODRÍGUEZ-GALLEGOS, C. D.; YANG, D.; GANDHI, O.; BIERI, M.; REINDL, T.; PANDA, S. A multi-objective and robust optimization approach for sizing and placement of pv and batteries in off-grid systems fully operated by diesel generators: An Indonesian case study. **Energy**, Elsevier, v. 160, p. 410–429, 2018.

ROSADO, C. A. G. Análise bibliométrica sobre o uso de jogos na área de engenharia de produção. UFVJM, 2018.

SANTOS, V. N. Modelagem matemática e otimização de vaso de pressão para armazenamento de hidrogênio verde. 2022.

SANTOS, V. O. Efeito do viés geográfico em uma rede neural profunda através da transferência de aprendizado entre as estações de hanford (eua) e petrolina (brasil). 2022.

ŠEBALJ, D. Simulation model of natural gas supply chain in a function of costs optimization: the case of Croatia. **SN Applied Sciences**, Springer, v. 4, n. 1, p. 1–12, 2022.

SHI, X.; LIAO, X.; LI, Y. Quantification of fresh water consumption and scarcity footprints of hydrogen from water electrolysis: A methodology framework. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 154, p. 786–796, 2020.

SIKIRU, S.; OLADOSU, T. L.; AMOSA, T. I.; OLUTOKI, J. O.; ANSARI, M.; ABIOYE, K. J.; REHMAN, Z. U.; SOLEIMANI, H. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 56, p. 1152–1182, 2024.

SILVA, G. N. da; LANTZ, F.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. Developing and applying the hydrogen economics and infrastructure optimization model (hera). **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 61, p. 1170–1186, 2024.

SMITH, C.; TORRENTE-MURCIANO, L. The importance of dynamic operation and renewable energy source on the economic feasibility of green ammonia. **Joule**, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 157–174, 2024.

TAN, N. D.; KIM, H.-S.; LONG, L. N. B.; NGUYEN, D. A.; YOU, S.-S. Optimization and inventory management under stochastic demand using metaheuristic algorithm. **Plos one**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 19, n. 1, p. e0286433, 2024.

TOMOS, B. A. D.; STAMFORD, L.; WELFLE, A.; LARKIN, A. Decarbonising international shipping—a life cycle perspective on alternative fuel options. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 299, p. 117848, 2024.

TOSTADO-VÉLIZ, M.; KAMEL, S.; HASANIEN, H. M.; TURKY, R. A.; JURADO, F. A mixed-integer-linear-logical programming interval-based model for optimal scheduling of isolated microgrids with green hydrogen-based storage considering demand response. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 48, p. 104028, 2022.

VELANDIA, W. F. O. Dimensionamento e instalação de um sistema solar fotovoltaico em um veículo aéreo não tripulado (vant) do tipo multirotor alimentado somente por energia fotovoltaica. 2018.

WON, W.; KWON, H.; HAN, J.-H.; KIM, J. Design and operation of renewable energy sources based hydrogen supply system: Technology integration and optimization. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 103, p. 226–238, 2017.

XU, X.; LIU, J.; LI, Y.; ZHOU, X. Pricing strategy of closed-loop supply chain under disruptions. **Filomat**, JSTOR, v. 30, n. 15, p. 4059–4072, 2016.

YANG, J.; LAI, X.; WEN, F.; DONG, Z. Y. Green hydrogen credit subsidized renewable energy-hydrogen business models for achieving the carbon neutral future. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 60, p. 189–193, 2024.

YANG, X.; LONG, L. Renewable energy transition and its implication on natural resource management for green and sustainable economic recovery. **Resources Policy**, Elsevier, v. 89, p. 104624, 2024.

YANG, Z.; LI, K.; CHEN, J. Robust scheduling of virtual power plant with power-to-hydrogen considering a flexible carbon emission mechanism. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 226, p. 109868, 2024.

**APÊNDICE A -**

Detalhamento dos custos - Cenário A - Comum - Energia Solar

Tabela 19 – Custos totais da simulação do cenário comum resultantes da fonte de energia solar.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	21.329,00	1	63.754,00	1	38.493,00	480.000,00	603.576,00	30
2	2	42.658,00	1	63.750,00	1	38.494,00	480.000,00	624.902,00	30
3	1	21.328,00	2	127.510,00	1	38.497,00	480.000,00	663.487,68	27
4	1	21.329,00	1	63.751,00	2	76.974,00	480.000,00	642.054,00	30

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do Operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 20 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.



Tabela 20 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia solar em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	29,62	1	88,56	1	53,46	666,67	838,31	30
2	2	59,24	1	88,54	1	53,47	666,67	868,92	30
3	1	32,91	2	196,77	1	53,48	666,67	949,83	27
4	1	29,62	1	88,54	2	106,90	666,67	891,73	30

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

**APÊNDICE B –**

Detalhamento dos custos - Cenário A - Otimista - Energia Solar

Tabela 21 – Custos totais da simulação do cenário otimista resultantes da fonte de energia solar.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	15.997,00	1	59.251,00	1	27.495,00	400.000,00	502.743,00	30
2	2	31.994,00	1	59.250,00	1	27.497,00	400.000,00	518.741,00	30
3	1	15.996,00	2	118.503,80	1	27.498,00	400.000,00	561.997,80	27
4	1	15.997,00	1	59.251,00	2	54.991,00	400.000,00	530.239,00	30

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 22 apresentado o valores de todas as operações e variáveis R\$/h para o mesmo cenário.

Tabela 22 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia solar em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$/h)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	22,21	1	82,29	1	38,19	555,55	698,24	30
2	2	44,43	1	82,29	1	38,20	555,55	720,47	30
3	1	24,68	2	182,87	1	42,43	555,55	805,53	27
4	1	21,22	1	82,29	2	76,38	555,55	735,44	30

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

**APÊNDICE C -**

- Detalhamento dos custos - Cenário A - Pessimista - Energia Solar

Tabela 23 – Custos totais da simulação do cenário pessimista resultantes da fonte de energia solar.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	23.995,00	1	78.751,00	1	38.493,00	560.000,00	701.239,00	30
2	2	47.991,00	1	78.750,00	1	38.494,00	560.000,00	725.235,00	30
3	1	23.994,00	2	157.510,00	1	38.497,00	560.000,00	780.001,00	27
4	1	23.996,00	1	78.753,00	2	76.987,00	560.000,00	739.733,00	30

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 24 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.

Tabela 24 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia solar em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$/h)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	33,32	1	109,38	1	53,46	777,78	973,94	30
2	2	66,65	1	109,37	1	53,47	777,78	1.007,27	30
3	1	37,31	2	243,07	1	59,41	777,78	1.117,57	27
4	1	33,33	1	109,39	2	106,93	777,78	1.027,43	30

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

**APÊNDICE D -**

- Detalhamento dos custos - Cenário B - Comum - Energia Eólica.



Tabela 25 – Custos totais da simulação do cenário comum resultantes da fonte de energia eólica.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo Energético	Custo do Cenário	Dias
1	1	10.664,00	1	31.874,00	1	19.249,00	240.000,00	301.787,00	15
2	2	21.334,00	1	31.875,00	1	19.251,00	240.000,00	312.460,00	15
3	1	10.667,00	2	63.475,00	1	19.250,00	240.000,00	333.392,00	12
4	1	10.665,00	1	31.875,00	2	38.499,00	240.000,00	321.000,00	15

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 30 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.

Tabela 26 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia eólica em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	29,62	1	89,53	1	53,46	666,67	839,29	15
2	2	59,24	1	88,54	1	53,47	666,67	867,95	15
3	1	32,91	2	196,77	1	53,48	666,67	949,83	12
4	1	29,63	1	88,54	2	106,94	666,67	888,78	15

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

**APÊNDICE E -**

- Detalhamento dos Custos - Cenário B - Otimista - Energia Eólica.

Tabela 27 – Custos totais da simulação do cenário otimista resultantes da fonte de energia eólica.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	7.998,50	1	28.124,00	1	16.499,00	200.000,00	252.621,50	15
2	2	16.000,00	1	28.125,00	1	16.501,00	200.000,00	260.626,00	15
3	1	7.998,20	2	56.246,00	1	16.480,00	200.000,00	280.742,42	12
4	1	7.998,50	1	28.126,00	2	32.999,00	200.000,00	269.123,50	15

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 28 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.

Tabela 28 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia eólica em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	22,21	1	78,12	1	45,83	555,56	701,72	15
2	2	44,45	1	78,13	1	53,47	555,56	723,98	15
3	1	27,77	2	195,29	1	53,48	555,56	838,78	12
4	1	22,21	1	78,14	2	91,66	555,56	747,57	15

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

**APÊNDICE F -**

- Detalhamento dos custos - Cenário B - Pessimista - Energia Eólica.

Tabela 29 – Custos totais da simulação do cenário pessimista resultantes da fonte de energia eólica.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	11.997,00	1	39.374,00	1	19.249,00	280.000,00	350.620,00	15
2	2	24.001,00	1	39.375,00	1	19.251,00	280.000,00	362.627,00	15
3	1	11.998,00	2	78.744,00	1	19.250,00	280.000,00	378.992,80	12
4	1	11.996,00	1	39.376,00	2	38.499,00	280.000,00	369.871,00	15

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 30 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.

Tabela 30 – Custos totais da implementação do cenário pessimista provenientes da fonte de energia eólica em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	29,62	1	89,53	1	53,46	666,67	839,29	15
2	2	59,24	1	88,54	1	53,47	666,67	867,95	15
3	1	32,91	2	196,77	1	53,48	666,67	949,83	12
4	1	29,63	1	88,54	2	106,94	666,67	888,78	15

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.



**APÊNDICE G -**

- Detalhamento dos Custos - Cenário C - Comum - Energia a partir de Biomassa.

Tabela 31 – Custos totais da simulação do cenário comum resultantes da fonte de energia de biomassa.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	4.266,90	1	12.751,00	1	7.700,70	96.000,00	120.718,60	6
2	2	8.536,50	1	12.750,00	1	7.700,10	96.000,00	124.986,60	6
3	1	4.266,60	2	25.502,00	1	7.701,20	96.000,00	129.722,82	6
4	1	4.266,80	1	12.752,00	2	15.401,00	96.000,00	128.419,80	6

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 30 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.

Tabela 32 – Custos totais da implementação do cenário comum provenientes da fonte de energia de biomassa em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	29,64	1	88,55	1	53,46	666,67	838,37	6
2	2	59,28	1	88,57	1	53,47	666,67	867,96	6
3	1	29,63	2	177,10	1	53,48	666,67	926,88	6
4	1	29,65	1	88,56	2	106,94	666,67	891,81	6

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

**APÊNDICE H -**

- Detalhamento dos custos - Cenário C - Otimista - Energia a Partir de Biomassa.

Tabela 33 – Custos totais da simulação do cenário otimista resultantes da fonte de energia de biomassa.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	3.200,00	1	11.251,00	1	6.600,60	80.000,00	101.051,60	6
2	2	6.402,40	1	11.250,00	1	6.600,10	80.000,00	104.252,50	6
3	1	3.199,90	2	22.502,00	1	6.600,90	80.000,00	112.302,80	6
4	1	3.200,20	1	11.251,00	2	13.201,00	80.000,00	107.652,20	6

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 36 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.

Tabela 34 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia de biomassa em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	22,22	1	78,13	1	45,84	555,55	701,74	6
2	2	44,46	1	78,12	1	45,83	555,55	723,96	6
3	1	22,21	2	156,26	1	45,84	555,55	779,86	6
4	1	22,23	1	78,13	2	91,67	555,55	747,57	6

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

**APÊNDICE I –**

- Detalhamento dos Custos - Cenário C - Pessimista - Energia a partir de Biomassa.

Tabela 35 – Custos totais da simulação do cenário pessimista resultantes da fonte de energia de biomassa.

Cenário	OP1	Custos de OP1	OP2	Custos de OP2	OP3	Custos de OP3	Custo energético	Custo do cenário	Dias
1	1	4.800,30	1	15.751,00	1	7.700,70	112.000,00	140.252,00	6
2	2	9.603,60	1	15.752,00	1	7.700,10	112.000,00	145.055,70	6
3	1	4.799,90	2	31.503,00	1	7.701,10	112.000,00	156.004,00	6
4	1	3.200,20	1	11.251,00	2	13.201,00	112.000,00	147.951,10	6

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.

E para uma melhor visualização na Tabela 36 apresentado o valores de todas as operações e variáveis US\$/h para o mesmo cenário.



Tabela 36 – Custos totais da implementação do cenário otimista provenientes da fonte de energia de biomassa em horas.

<b>Cenário (US\$/h)</b>	<b>OP1</b>	<b>Custos de OP1 (US\$/h)</b>	<b>OP2</b>	<b>Custos de OP2 (US\$/h)</b>	<b>OP3</b>	<b>Custos de OP 3 (US\$/h)</b>	<b>Custo energético (US\$)</b>	<b>Custo do cenário (US\$/h)</b>	<b>Dias</b>
1	1	33,33	1	109,38	1	53,48	777,77	973,96	6
2	2	66,69	1	109,39	1	53,47	777,77	1.007,32	6
3	1	33,32	2	218,77	1	53,49	777,77	1.083,34	6
4	1	33,33	1	109,37	2	106,95	777,77	1.027,42	6

Fonte: Autor (2024)

legenda: OP1 - Operador de produção, Custos de OP1 - Custos do operador de produção, OP2 - Operador de armazenamento, Custos de OP2 - Custos do operador de armazenamento, OP3 - Operador de transporte, Custos de OP3 - Custos de operador de transporte.