

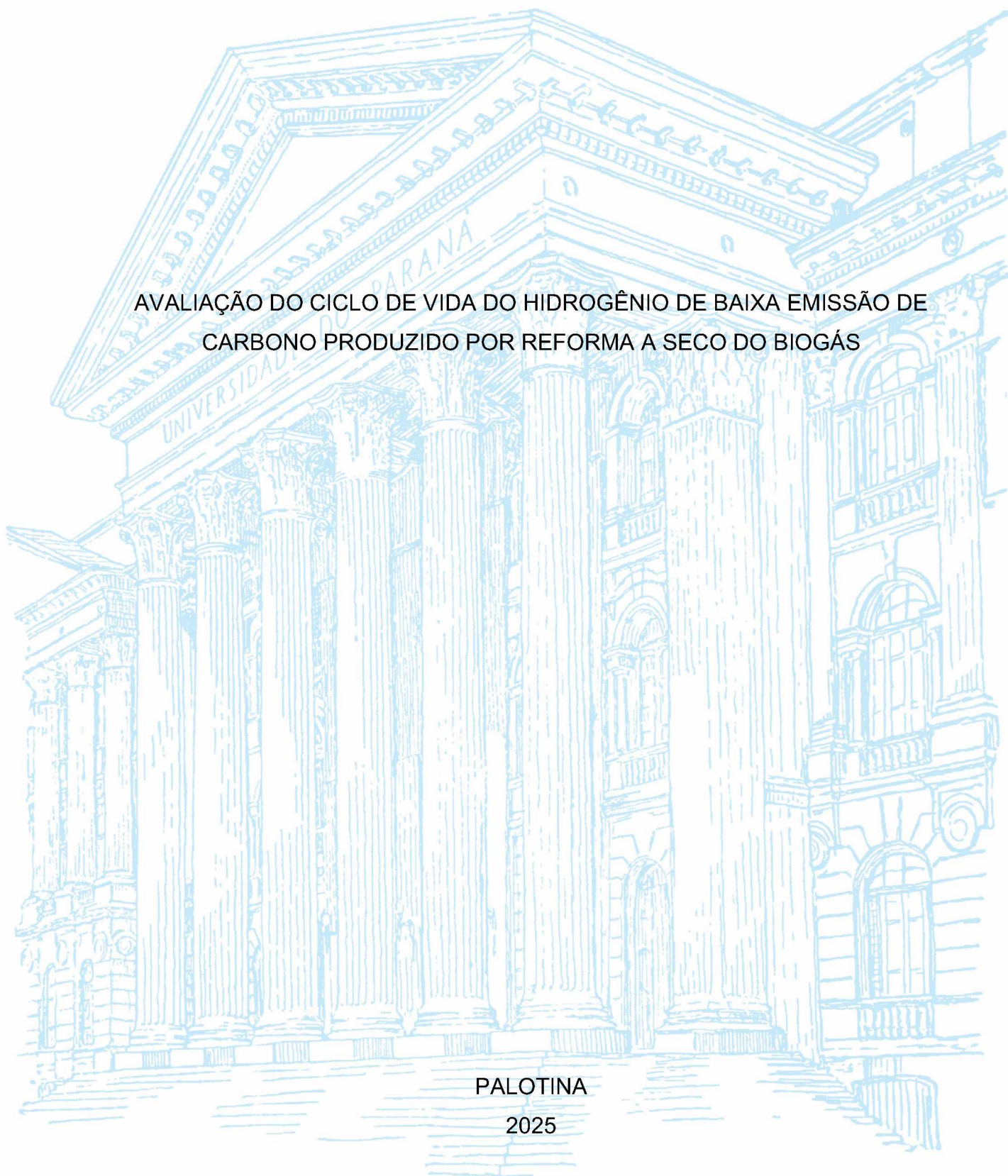
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA BÁRBARA ZANELLA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE
CARBONO PRODUZIDO POR REFORMA A SECO DO BIOGÁS

PALOTINA

2025



ANA BÁRBARA ZANELLA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE
CARBONO PRODUZIDO POR REFORMA A SECO DO BIOGÁS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Helton José Alves

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Rubens Soares

PALOTINA

2025

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

Z28 Zanella, Ana Bárbara
 Avaliação do ciclo de vida do hidrogênio de baixa
 emissão de carbono produzido por reforma a seco do biogás
 / Ana Bárbara Zanella. – Palotina, PR, 2025.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
 Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 e Tecnologia Ambiental.
 Orientador: Prof. Dr. Helton José Alves.
 Coorientador: Prof. Dr. Fábio Rubens Soares.

 1. Biogás. 2. Biomassa. 3. Reforma a Seco. I. Alves, Helton José.
 II. Soares, Fábio Rubens. III. Universidade Federal do Paraná.
 IV. Título.

CDU 60



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de ANA BÁRBARA ZANELLA, intitulada: **Avaliação do ciclo de vida do hidrogênio de baixa emissão de carbono produzido por reforma a seco do biogás**, sob orientação do Prof. Dr. HELTON JOSE ALVES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 09 de Maio de 2025.

Assinatura Eletrônica
09/05/2025 18:51:54.0
HELTON JOSE ALVES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
17/05/2025 14:41:40.0
PAULO EMÍLIO VALADÃO DE MIRANDA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica
20/05/2025 14:13:01.0
MAURICIO ROMANI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
14/05/2025 00:22:43.0
GABRIEL LASSERY ROCHA DA SILVA
Avaliador Externo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO)

Assinatura Eletrônica
16/05/2025 15:19:50.0
FABIO RUBENS SOARES
Coordenador(a) (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer à orientação e coorientação que me foram oferecidas ao longo da realização deste trabalho. Aos professores orientadores Hélon José Alves e Fábio Rubens Soares, meu muito obrigada pela dedicação, paciência e comprometimento durante todo o processo de construção desta pesquisa. Agradeço também à Universidade Federal do Paraná e ao Laboratório de Materiais e Energias Renováveis pela oportunidade e pelo acolhimento e apoio técnico durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao longo desta trajetória, tive a felicidade de contar com o apoio de pessoas e espaços que contribuíram significativamente para tornar esse caminho mais leve e possível. Nesse sentido, agradeço ao Laboratório de Gestão de Resíduos e Tecnologias Sustentáveis da UFPR e ao Professor Giancarlo Canchumani pelas valiosas trocas e colaborações, que foram fundamentais para a realização e o amadurecimento deste trabalho. Agradeço também à colega Thamires Prados, que me acolheu com grande gentileza e disponibilidade nas etapas iniciais da pesquisa.

Não poderia deixar de agradecer, ainda, ao Laboratório de Catálise e Termodinâmica Aplicada da UFPR e à colega Nádia Ramos, cujo apoio generoso e competente foi decisivo para a consolidação deste trabalho.

Agradeço também aos meus pais Silvana e Wolmir que nunca deixaram de me apoiar em todas as decisões, e estiveram sempre apostos para me orientar com seu amor e carinho ao longo de toda essa caminhada, desde sempre. Ao meu irmão André, que sempre teve papel importante na minha vida acadêmica e na Pós-graduação não poderia ter sido diferente.

Aos meus amigos, que de uma forma ou outra sempre se fizeram presentes nessa jornada, seja para uma palavra de conforto, de apoio ou de um ensinamento.

E, por fim, mas não menos importante, ao meu companheiro, Juliano, que esteve presente constantemente nessa jornada, que sempre me ofereceu seu apoio, compreensão e esteve ao meu lado nos momentos mais desafiadores — obrigada por caminhar comigo com tanto carinho e generosidade.

A todas esses e a quem de alguma forma contribuiu nessa jornada, meu profundo agradecimento. Este trabalho é também fruto de cada encontro, apoio e incentivo ao longo do caminho.

RESUMO

O combate às mudanças climáticas e a busca por alternativas energéticas sustentáveis têm se tornado prioridades globais, especialmente após o Acordo de Paris, que estabeleceu compromissos para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis, como o biogás oriundo da biomassa, surge como uma opção promissora para a transição energética e a descarbonização das economias. No Brasil, a ampla disponibilidade de biomassa, somada à já consolidada diversidade da matriz energética, oferece condições favoráveis para o avanço de rotas tecnológicas sustentáveis, como a produção de hidrogênio a partir da biomassa. Entre as rotas tecnológicas possíveis, a reforma a seco do biogás se destaca por empregar dois gases de efeito estufa (CH_4 e CO_2) como reagentes, além de dispensar o uso de água, o que representa uma vantagem significativa em contextos de restrição hídrica. Associada a tecnologias de captura e armazenamento de carbono, essa rota apresenta ainda o potencial de alcançar emissões líquidas negativas, reforçando seu valor estratégico como alternativa sustentável e ambientalmente promissora para a produção de hidrogênio no contexto brasileiro. O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho ambiental da produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono a partir da reforma a seco do biogás, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. A modelagem foi realizada utilizando o software SimaPro, considerando uma unidade funcional de 1 kg de Hidrogênio. Foram construídos os inventários de ciclo de vida do processo e estimados os impactos ambientais, com ênfase nas emissões de CO_2 equivalente. A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, conduzida com base nos métodos ReCiPe, Midpoint (H) e CML 2001, indicou emissões de gases de efeito estufa de 2,2 e 2,1 kg $\text{CO}_2\text{eq/kg H}_2$, respectivamente, evidenciando um desempenho ambiental competitivo em comparação a outras tecnologias do setor. A análise também aponta para o potencial da rota em alcançar emissões líquidas negativas em determinados cenários, o que reforça sua relevância como alternativa sustentável para a produção de hidrogênio no contexto brasileiro.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Reforma a Seco, Biomassa, Biogás, Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono.

ABSTRACT

Combating climate change and seeking sustainable energy alternatives have become global priorities, especially after the Paris Agreement, which established commitments to reduce greenhouse gas emissions. In this context, hydrogen produced from renewable sources, such as biogas derived from biomass, emerges as a promising option for energy transition and economic decarbonization. In Brazil, the abundant availability of biomass, combined with the already consolidated diversity of the energy matrix, provides favorable conditions for the advancement of sustainable technological pathways, such as hydrogen production from biomass. Among the possible technological routes, dry reforming of biogas stands out for employing two greenhouse gases (CH_4 and CO_2) as reactants and for not requiring water use, which represents a significant advantage in contexts of water scarcity. When associated with carbon capture and storage technologies, this route also holds the potential to achieve net-negative emissions, reinforcing its strategic value as a sustainable and environmentally promising alternative for hydrogen production in the Brazilian context. This study aimed to assess the environmental performance of low-carbon hydrogen production via dry reforming of biogas, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The modeling was carried out using the SimaPro software, considering a functional unit of 1 kg of hydrogen. Life cycle inventories of the process were constructed and environmental impacts were estimated, with an emphasis on CO_2 equivalent emissions. The Life Cycle Impact Assessment, conducted using the ReCiPe Midpoint (H) and CML 2001 methods, indicated greenhouse gas emissions of 2.2 and 2.1 kg $\text{CO}_2\text{eq/kg H}_2$, respectively, highlighting a competitive environmental performance when compared to other technologies in the sector. The analysis also points to the potential of this route to achieve net-negative emissions in certain scenarios, reinforcing its relevance as a sustainable alternative for hydrogen production in the Brazilian context.

Keywords: Life Cycle Assessment, Dry Reforming, Biomass, Biogas, Low-Carbon Hydrogen.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONVERSÃO BIOLÓGICA EM SISTEMAS ANAERÓBICOS E AERÓBICOS	4
FIGURA 2 - DIAGRAMA DAS ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA A PRODUÇÃO DO BIOGÁS.....	23
FIGURA 3 - CRESCIMENTO DO NÚMERO DE PLANTAS DE BIOGÁS NA ÚLTIMA DÉCADA.....	24
FIGURA 4 - POTENCIAL TOTAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS DE CURTO PRAZO NO BRASIL POR REGIÃO.....	25
FIGURA 5 - ETAPAS DE UMA ACV.....	42
FIGURA 6 - CATEGORIAS DE IMPACTO, CLASSIFICAÇÃO DE CARACTERIZAÇÃO	45
FIGURA 7 - ETAPAS DA METODOLOGIA	57
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DA PLANTA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	60
FIGURA 9 - ESQUEMA DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO DO CENÁRIO ANALISADO	62
FIGURA 10 - FRONTEIRAS DO SISTEMA PARA O CENÁRIO ANALISADO	64
FIGURA 11 - FLUXOS DOS PROCESSOS DA ACV.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COMPARAÇÃO DAS INTENSIDADES MÉDIAS DE CAPTAÇÃO E CONSUMO DE ÁGUA POR TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	37
GRÁFICO 2 - COMPARAÇÃO DA INTENSIDADE DE EMISSÕES DE DIFERENTES ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	54
GRÁFICO 3 - RESULTADOS NORMALIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H ₂ DE ACORDO COM O MÉTODO RECIPE (H)	73
GRÁFICO 4 - RESULTADOS NORMALIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H ₂ DE ACORDO COM O MÉTODO CML	73
GRÁFICO 5 - RESULTADOS CARACTERIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H ₂ DE ACORDO COM O MÉTODO RECIPE	75
GRÁFICO 6 - RESULTADOS CARACTERIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H ₂ DE ACORDO COM O MÉTODO CML	75
GRÁFICO 7 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE MARINHA ..	77
GRÁFICO 8 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE	77
GRÁFICO 9 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE TOXICIDADE HUMANA	77
GRÁFICO 10 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE AQUECIMENTO GLOBAL.....	77
GRÁFICO 11 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE MARINHA (AS1)	81
GRÁFICO 12 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE (AS1).....	81
GRÁFICO 13 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE TOXICIDADE HUMANA (AS1)	81
GRÁFICO 14 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE AQUECIMENTO GLOBAL (AS1)	81
GRÁFICO 15 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE MARINHA (AS2)	82
GRÁFICO 16 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE (AS2).....	82
GRÁFICO 17 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE TOXICIDADE HUMANA (AS2)	83

GRÁFICO 18 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE AQUECIMENTO GLOBAL (AS2)	83
GRÁFICO 19 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE EMISSÃO DE CO ₂ eq CONSIDERANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	86

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - MÉTODOS DE AICV	46
QUADRO 2 - ESTUDOS DE ACV E PRODUÇÃO DE H ₂	52
QUADRO 4 - MÉTODOS DE AICV E CATEGORIAS DE IMPACTO	68
QUADRO 5 - CATEGORIAS DE IMPACTO PARA INTERPRETAÇÃO.....	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA AVICULTURA NA REGIÃO SUL DO BRASIL.....	27
TABELA 2 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA SUINOCULTURA NA REGIÃO SUL DO BRASIL	27
TABELA 3 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA BOVINOCULTURA NA REGIÃO SUL DO BRASIL	28
TABELA 4 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA REGIÃO SUL DO BRASIL.....	29
TABELA 5 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DO SETOR DE LATICÍNIOS NA REGIÃO SUL DO BRASIL	30
TABELA 6 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DAS ATIVIDADES DE ABATEDOUROS NA REGIÃO SUL DO BRASIL ..	30
TABELA 7 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA INDÚSTRIA E PROCESSAMENTO DA MANDIOCA NA REGIÃO SUL DO BRASIL	31
TABELA 8 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE CERVEJARIAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL	31
TABELA 9 - PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS	34
TABELA 10 - REAÇÕES QUÍMICAS ENVOLVIDAS NOS PROCESSOS DE REFORMA DO METANO	35
TABELA 11 - DADOS DO INVENTÁRIO DO FLUXO DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS	66
TABELA 12 - DADOS DO INVENTÁRIO DO FLUXO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO	67
TABELA 13 – PARÂMETROS ESTUDADOS PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	72

LISTA DE ABREVIATURAS

ABH2	- Associação Brasileira de Hidrogênio
ABIOGÁS	- Associação Brasileira do Biogás e do Biometano
ABREMA	- Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente.
AICV	- Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANP	- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
CIBIOGÁS	- Centro Internacional de Energias Renováveis Biogás
CLDRM	- Reforma a seco do metano em looping químico
CUAC	- Captura, utilização e armazenamento de carbono
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
FAO	- Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
GEE	- Gás de Efeito Estufa
H ₂	- Hidrogênio
IEA	- Agência Internacional de Energia (IEA),
ICV	- Inventário de ciclo de vida
IPCC	- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LABGERTS	- Laboratório de Gestão de Resíduos e Tecnologias Sustentáveis
LABMATER	- Laboratório de Materiais e Energias Renováveis
LACTA	- Laboratório de Catálise e Termodinâmica Aplicada
ODS	- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SBCH2	- Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio
NDC	- Contribuição Nacionalmente Determinada
UNIDO	- Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
PEM	- Eletrolisador de membrana de troca de prótons (Proton Exchange Membrane Electrolyzer)
ALEL	- Eletrolisador alcalino (Alkaline Electrolyzer)
SOEL	- Eletrolisador de óxido sólido (Solid Oxide Electrolyzer)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.1.1 Objetivo geral.....	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS	20
2.2 BIOMASSA	21
2.3 BIOGÁS	22
2.3.1 Panorama de produção de biogás no Brasil.....	24
2.3.2 Panorama de produção de biogás no sul do Brasil	26
2.3.2.1 Agropecuária.....	26
2.3.2.2 Indústria	28
2.3.2.3 Saneamento	32
2.4 GÁS DE SÍNTESE	33
2.5 HIDROGÊNIO.....	33
2.6 ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	34
2.6.1 Reforma a vapor	35
2.6.2 Reforma a seco.....	36
2.6.3 Oxidação Parcial e Reforma Autotérmica.....	38
2.6.4 Gaseificação	39
2.6.5 Eletrólise	39
2.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	40
2.7.1 Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida.....	42
2.7.1.1 Definição de objetivos e escopo	42
2.7.1.2 Inventário do Ciclo de Vida	43
2.7.1.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	44
2.7.1.4 Interpretação	48
2.8 ACV E A PRODUÇÃO DE H ₂	49
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	56
3.1 CENÁRIO ANALISADO	59
3.1.1 Processo de Produção de Biogás.....	59
3.1.2 Processo de Produção do Gás Hidrogênio.....	61

3.2 METODOLOGIA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	63
3.2.1 Definição de objetivos e escopo	63
3.2.2 Inventário do Ciclo de Vida	64
3.2.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida	67
3.2.4 Interpretação	69
3.2.4.1 Categorias de Impacto	69
3.2.4.2 Análise de Sensibilidade	70
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	72
4.1 RESULTADOS NORMALIZADOS	72
4.2 INTERPRETAÇÃO	74
4.2.1 Ecotoxicidade Marinha, de Água Doce, e Toxicidade Humana	78
4.2.2 Aquecimento Global.....	79
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	80
4.4 REFORMA A SECO DO BIOGÁS VS ELETRÓLISE	84
5 CONCLUSÕES.....	87
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

A partir de 2015, com o estabelecimento do Acordo de Paris, mais de 150 países se comprometeram a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE). O objetivo do acordo é fortalecer a resposta global à ameaça da mudança climática, estabelecendo metas individuais de redução de GEE, alinhadas ao desenvolvimento sustentável. Simultaneamente à assinatura do acordo, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, foram criados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma agenda com o propósito de estabelecer metas, prazos e compromissos para o enfrentamento dos principais problemas globais.

O Brasil, como um signatário do Acordo de Paris e país-membro da ONU, estipulou metas internas para sua contribuição na contenção da temperatura global e atingimento dos ODS. Dentre essas metas destaca-se aqui os esforços para o cumprimento do ODS 7 - Uso de Energia Limpa e Acessível, e do ODS 13 - Ação Contra Mudança Global do Clima. Na atualização de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), apresentada em 2024, o Brasil estabelece a meta de reduzir entre 59% e 67% as suas emissões líquidas de gases de efeito estufa até 2035, em relação aos níveis de 2005 (BRASIL, 2024). A nova NDC também reforça o compromisso do país com a transição energética, priorizando ações como a ampliação da eficiência energética, o desenvolvimento de mercados para hidrogênio de baixa emissão de carbono como alternativa aos combustíveis fósseis e a viabilização de tecnologias avançadas para remoção de CO₂ da atmosfera. Entre as ações previstas, destaca-se a aprovação do marco legal e da regulamentação específica para a produção de hidrogênio de baixa emissão, evidenciando o papel estratégico desse vetor energético no cumprimento das metas climáticas brasileiras.

Dessa forma, a busca por energias renováveis e combustíveis limpos se torna uma prioridade na agenda de desenvolvimento sustentável do país. Nesse contexto, o hidrogênio surge como uma alternativa promissora, capaz de desempenhar um papel crucial na transição para um futuro energético mais limpo e sustentável. Em muitos países, o hidrogênio é visto como uma das principais tecnologias-chave para economias comprometidas com as metas de descarbonização, graças à sua capacidade de armazenar e fornecer grandes quantidades de energia sem gerar emissões de dióxido de carbono (CO₂) (IPEA, 2022). Além disso, o hidrogênio possui

a singularidade de atuar tanto como vetor energético, semelhante à eletricidade, quanto como combustível primário. Por poder ser produzido também a partir da biomassa como matéria-prima, ele se tornou central nas discussões sobre estratégias de redução de gases de efeito estufa (GEE) e em economias focadas na sustentabilidade (GIZ, 2021).

No Brasil, as discussões pertinentes na temática de Energia do Hidrogênio têm evoluído constantemente, desde a década de 90. Em 1998, houve a implementação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), e, em 2003, o País tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE). Ao longo dos próximos anos, foram sendo elaborados documentos direcionadores na temática, tendo em vista à economia e as oportunidades para o país no setor. Em 2017, foi criada a Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2), e, em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) apontou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética (MME, 2021).

Nos últimos anos foram publicados também pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e pelo Governo Federal novos materiais relacionados à estratégia brasileira do hidrogênio e o mapeamento do setor no Brasil. Em 2022, a Resolução nº 6, de 23 de junho, instituiu o Programa Nacional do Hidrogênio. Em novembro de 2023, foi aprovada pela Câmara dos Deputados o projeto de lei 2.308/2023, resultando na Lei 14.948/2024, que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, e dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono. A Lei também instituiu o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2), e, portanto, apresenta e diretrizes e definições a fim de orientar o processo de certificação de produção de hidrogênio no Brasil. De acordo com a lei, a certificação do hidrogênio adotará a intensidade de emissões de GEE relacionada ao hidrogênio produzido no território nacional como atributo, com base na metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Além disso, a Lei define que será considerado hidrogênio de baixa emissão de carbono aquele que, ao aplicar a metodologia de ACV, resulte em valor inicial menor ou igual a 7 quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido (7 kgCO₂eq/kgH₂).

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia sistemática que examina os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo de todas as fases de vida de

um produto. Regulada por normas internacionais, como a ISO 14.040/2009 e a ISO 14.044/2009, a ACV permite identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos produtos em diversas etapas de seu ciclo de vida e apoia a tomada de decisões na indústria, ajudando a identificar processos mais sustentáveis e a minimizar impactos ambientais (ABNT NBR ISO 14.040/2009). A Avaliação de Ciclo de Vida é fundamental nesse processo, pois permite identificar e quantificar as emissões de poluentes associadas aos diferentes estágios da produção, desde a matéria-prima até o armazenamento e distribuição (CHELVAM *et al.*, 2024).

No contexto dos estudos sobre ACV e produção de hidrogênio, existem trabalhos que se destacam por seus resultados relevantes e expressivos quanto aos impactos ambientais associados à rota de produção de H₂ a partir de biomassa. Alguns estudos comparam a produção de hidrogênio a partir de carvão e biomassa, e os resultados indicam que a rota baseada em biomassa pode reduzir as emissões em até 89,6% quando comparada à rota de produção via carvão (Li *et al.*, 2020a). Da mesma forma, Koroneos *et al.* (2004) relataram uma redução aproximada de 75% ao comparar a produção de hidrogênio a partir de biomassa com a do carvão. Atualmente, o gás natural e o carvão são as principais fontes de hidrogênio produzido globalmente. Nos Estados Unidos, cerca de 95% do hidrogênio é produzido por reforma catalítica a vapor do metano, utilizando grandes centrais alimentadas pela infraestrutura de gás natural existente. No Brasil, a maior parte do hidrogênio é gerada pela reforma a vapor do gás natural, sendo consumido principalmente em refinarias e fábricas de fertilizantes (87%), com produção e uso locais (EPE, 2022). Dessa forma, a biomassa, por ser um recurso renovável, diferente do gás natural e do carvão, surge como uma rota promissora para a produção de hidrogênio no Brasil, graças à sua ampla disponibilidade e ao seu significativo potencial como fonte sustentável.

A geração de biogás a partir da biomassa pode ocorrer em diferentes setores, aproveitando resíduos hoje muitas vezes subutilizados. Com uma agricultura e pecuária robustas, o país produz expressivos volumes de resíduos agropecuários e florestais, como co-produtos de lavouras de soja, milho e cana-de-açúcar, além de dejetos da criação de aves e suínos — todos com alto potencial para a produção de biogás e biometano. Além disso, cerca de 54% dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil, o equivalente a aproximadamente 41 milhões de toneladas por ano, são resíduos orgânicos (ABREMA, 2024), os quais também representam uma fonte relevante para a geração de biogás. As estações de tratamento de esgoto também

surtem como uma fonte adicional, com potencial de contribuição significativa nesse contexto.

Embora o biogás represente atualmente uma pequena parcela da matriz energética, seu potencial de expansão, aliado à transformação em hidrogênio, posiciona a biomassa como uma alternativa promissora de baixo carbono para o país, sendo corroborado por estudos que ressaltam o Brasil como possuidor do maior potencial para a produção de biogás no mundo (BNDES, 2021; Lemos *et al.*, 2024; CIBIOGÁS, 2020). Ainda que o hidrogênio e a biomassa se apresentem como uma alternativa interessante e relevante para o Brasil, é essencial avaliar seus impactos ambientais de forma abrangente.

Diante desse contexto, este trabalho propõe investigar aspectos ainda pouco explorados na produção de hidrogênio a partir de biomassa, por meio da reforma a seco do biogás, com ênfase no cenário brasileiro. A escolha da reforma a seco do biogás como foco deste estudo se justifica pelas vantagens que essa tecnologia oferece em comparação a outras rotas de produção de hidrogênio. A reforma a seco apresenta-se como uma alternativa promissora por agregar valor ao biogás, ao transformar os gases poluentes metano e dióxido de carbono em insumos de interesse industrial, como hidrogênio e monóxido de carbono. Esses produtos podem ser utilizados na produção de biocombustíveis e em processos industriais como a carbonização. Ainda, essa rota se destaca por dispensar o uso de insumos adicionais, como água, exigidos em outros processos, o que resulta em menor consumo de recursos e maior eficiência ambiental (AGUIAR, 2017).

O estudo busca oferecer uma análise detalhada das emissões associadas a essa rota, que reaproveita dois gases de efeito estufa (dióxido de carbono e metano) para produzir gás de síntese, uma mistura rica em hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO), amplamente utilizada como insumo energético, intermediário em processos industriais e matéria-prima para a produção de diversos combustíveis. O objetivo é contribuir para os estudos sobre o tema e fornecer informações que possam apoiar direta ou indiretamente o processo de certificação de hidrogênio de baixa emissão de carbono, conforme os critérios da Lei 14.948/2024. Além de contribuir para a compreensão da viabilidade ambiental dessa tecnologia, o trabalho pretende também orientar e apoiar futuros estudos na área, oferecendo uma base sólida para o avanço da pesquisa em um campo emergente e de crescente relevância no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O trabalho proposto tem como objetivo principal avaliar o desempenho ambiental da produção do hidrogênio de baixo carbono produzido a partir da reforma a seco do biogás, obtido da decomposição anaeróbia da biomassa residual, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

1.1.2 Objetivos específicos

- Construir um inventário com relação aos aspectos ambientais e energéticos da rota em estudo;
- Avaliar potenciais impactos ambientais associados às contribuições e emissões identificadas, em termos de emissões de CO₂ equivalente;
- Identificar pontos críticos do ciclo de vida da rota analisada, a fim de minimizar os impactos gerados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Atualmente, as energias renováveis são frequentemente definidas por sua variabilidade e intermitência. Entretanto, é crucial vê-las como uma oportunidade para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e grandes usinas hidrelétricas, descentralizar o setor de energia elétrica, aproveitar o vasto potencial de energia solar, eólica e biomassa disponível no país, e criar uma indústria que respeite o meio ambiente (BONDARIK, PILATTI e HORST, 2018).

Uma transição energética global é urgentemente necessária para alcançar a meta de limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2°C. As implicações do Acordo de Paris para o setor de energia serão profundas e ainda não completamente refletidas nos cenários energéticos atuais (IRENA, 2017). A transição dos combustíveis fósseis para soluções de baixo carbono será crucial, pois as emissões de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas à energia representam dois terços

de todos os gases de efeito estufa (GHG), e esta transição energética será viabilizada pela inovação tecnológica (GIELEN *et al.*, 2019).

A ANP (2018) define biocombustíveis como aqueles derivados de biomassa renovável, como o etanol e o biodiesel, que podem substituir parcial ou totalmente os combustíveis fósseis na geração de energia. Nesse contexto, o Brasil se destaca pela sua vasta diversidade de recursos naturais renováveis, resultando em uma matriz energética composta por 45% de energia renovável, em comparação com cerca de 14% em outros países (DOS SANTOS *et al.*, 2012). Esse potencial permite ao país buscar o desenvolvimento contínuo de fontes alternativas para biocombustíveis, incluindo a biomassa utilizada na produção de biogás, álcool e biodiesel (DA SILVA *et al.*, 2016).

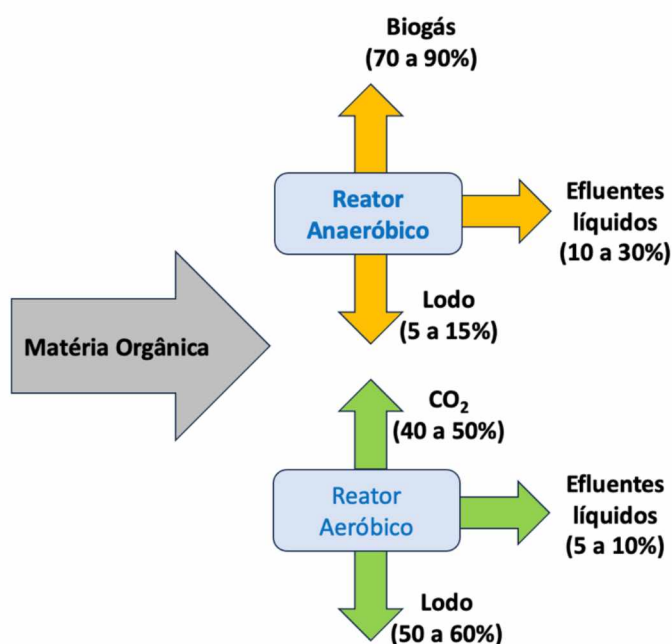
2.2 BIOMASSA

Biomassa é qualquer recurso renovável derivado de material orgânico de origem animal ou vegetal, existente na natureza ou gerado pelo homem e/ou animais. Ela engloba todos os seres vivos e também o conjunto dos produtos orgânicos gerados por estes seres vivos, como resíduos de atividades agrícolas e industriais e resíduos urbanos. Essa biomassa contém energia química, que pode ser aproveitada como insumo energético. A biomassa como insumo energético tem uma particularidade em relação a outras fontes: o resultado do processo de conversão pode gerar combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, sendo considerada uma vantagem em relação a outras fontes de energia, pois confere certa flexibilidade de adaptação tecnológica de acordo com a necessidade (MIZIARA, 2013; Ferreira *et al.*, 2018).

Considerada por muitos anos como um subproduto do agronegócio e de indústrias processadoras de alimentos e bebidas, incluindo centrais de abastecimento e distribuição de alimentos, a biomassa é usualmente descartada em estações de tratamentos de efluentes, de esgoto e aterros sanitários (CIBILOGÁS, sd). A disposição inadequada da biomassa residual pode causar contaminação do solo, comprometer a qualidade dos recursos hídricos e causar distúrbios ambientais entre as espécies. Portanto, a biomassa residual, antes de sua disposição final, precisa passar por um processo de tratamento adequado, com o objetivo de reduzir seu potencial poluidor. O uso de processos biológicos proporciona a maior redução da carga orgânica com

potencial poluidor presente na biomassa. Esses processos biológicos são classificados como processos aeróbicos e anaeróbicos, conforme apresentado na Figura 1.

FIGURA 1 - CONVERSÃO BIOLÓGICA EM SISTEMAS ANAERÓBICOS E AERÓBICOS



FONTE: Adaptado de Ferreira *et al.* (2018).

Em sistemas anaeróbicos, aproximadamente 70-90% do material orgânico é biodegradável e convertido em biogás. A formação do biogás acontece durante a decomposição da matéria orgânica, através de microrganismos, o que ocorre em ambientes sem oxigênio, sendo necessária a instalação de um biodigestor, que vai propiciar o ambiente adequado (CIBIOGÁS, sd; Ferreira *et al.*, 2018)

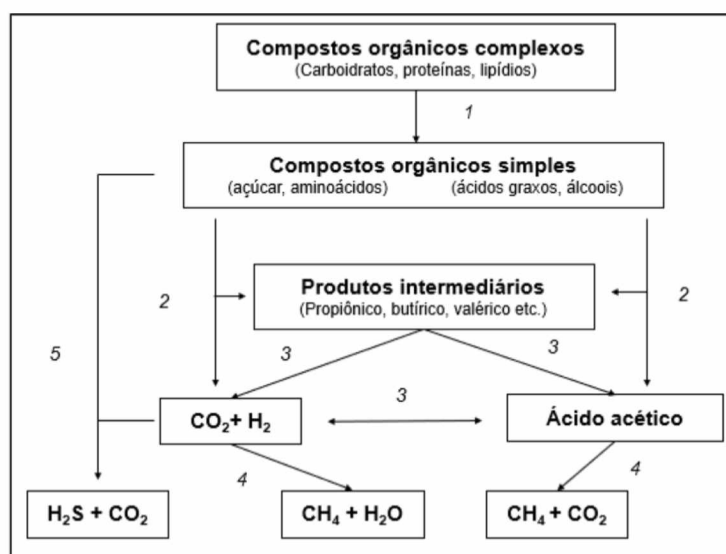
2.3 BIOGÁS

O biogás é o produto de um processo mediado biologicamente, conhecido como digestão anaeróbica. O biogás consiste principalmente de metano (CH_4) em uma faixa de 50-70% e dióxido de carbono (CO_2) em uma concentração de 30-50%. Trata-se de um produto composto principalmente de metano e dióxido de carbono, associado a traços de outros gases, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3),

hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O). O conteúdo relativo de CH_4 e CO_2 no biogás depende principalmente da natureza do substrato e do pH do reator (ANGELIDAKI *et al.*, 2018). Sua matéria prima de produção são as biomassas (resíduos orgânicos), notadamente os resíduos sólidos urbanos e da produção agropecuária, como a vinhaça, palha e bagaço da cana, caroço de algodão e dejetos de animais (bovinos, suínos, aves, etc). As características do biogás dependem da temperatura, pressão, concentração de metano e outros gases inertes e/ou ácidos. O potencial energético do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano existente na mistura gasosa (BNDES, 2021).

O processo de digestão anaeróbica, ocorre por quatro etapas: a hidrólise (1), acidogênese (2), acetogênese (3) e metanogênese (4). Também pode ocorrer a sulfetogênese, etapa alternativa (5) (SUARÉZ, 2014; OLIVEIRA, 2021). A Figura 2 mostra de forma resumida a produção do biogás através destas etapas.

FIGURA 2 - DIAGRAMA DAS ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA A PRODUÇÃO DO BIOGÁS



FONTE: OLIVEIRA, 2021.

O biogás tem um grande potencial de atender às necessidades globais de energia e proporcionar vários benefícios ambientais. Além disso, do ponto de vista socioeconômico, o biogás não apenas reduz significativamente os custos de tratamento de resíduos, mas também tem um custo de matéria-prima relativamente

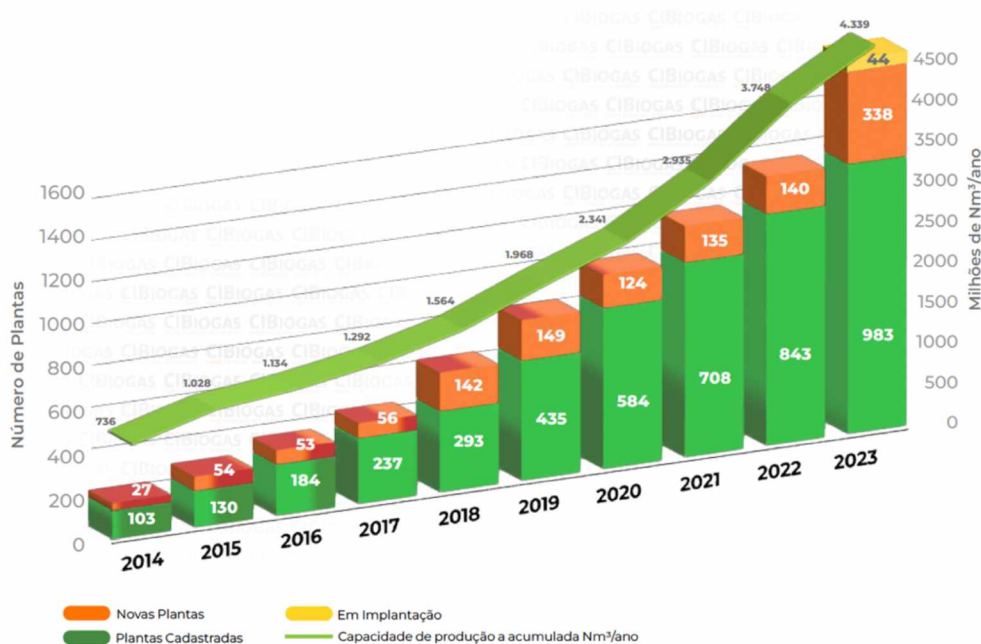
baixo, tornando-se assim um meio viável para fornecer geração contínua de energia (MAO *et al.*, 2015).

2.3.1 Panorama de produção de biogás no Brasil

Conforme citado anteriormente, para a produção de biogás, a biomassa deve existir como matéria prima. Dentre as fontes de substrato disponíveis, existem 3 classes, segundo o Cibiogás (2024): o setor agropecuário, a indústria e o saneamento, este último englobando a gestão de resíduos sólidos urbanos e as estações de tratamento de esgoto. Em 2021, o setor agropecuário foi responsável por 80% das plantas de biogás em operação no país. Enquanto o setor industrial e o setor de saneamento contribuíram em 11% e 9%, respectivamente, no número de plantas. Quanto ao volume de biogás, o setor de saneamento foi responsável por 74% do volume total produzido, seguido pelos setores industrial (16%) e agropecuário (10%).

Segundo ainda o Cibiogás (2024), o número de plantas de biogás e biometano passou de 983, em 2022, para 1.321 em 2023. Em relação ao volume de biogás produzido em 2023, houve um aumento de 21% com relação ao ano anterior, chegando a 728 milhões de Nm³. A FIGURA 3 traz o crescimento dos números de plantas de biogás na última década.

FIGURA 3 - CRESCIMENTO DO NÚMERO DE PLANTAS DE BIOGÁS NA ÚLTIMA DÉCADA.

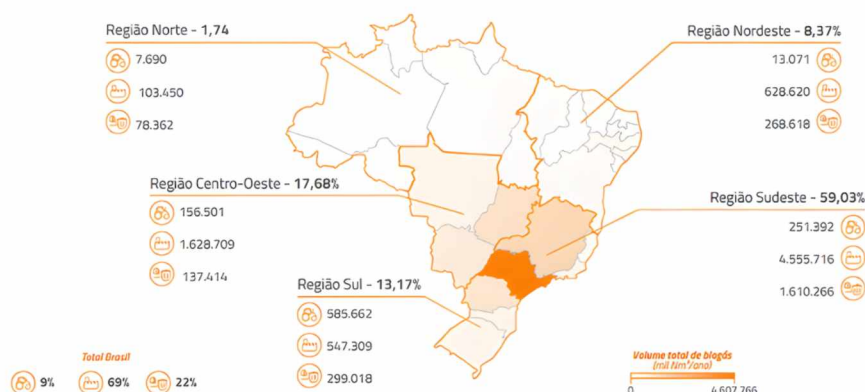


FONTE: CIBIOGÁS (2024).

O potencial teórico de produção de biogás brasileiro é estimado em 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano, o que seria suficiente para suprir 40% da demanda interna de energia elétrica e 70% do consumo de diesel. Considerando o cenário de 2,3 bilhões de metros cúbicos de biogás gerados em 2021 pelas 755 plantas em operação, o Brasil explora apenas 3% desse potencial. Além disso, é estimado que o potencial de geração de biogás de curto prazo é de 10,8 bilhões de metro cúbicos (CIBIOGÁS, 2024). Essa estimativa, de curto prazo, está exemplificada na FIGURA 4, a seguir, de acordo com cada região do país.

FIGURA 4 - POTENCIAL TOTAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS DE CURTO PRAZO NO BRASIL POR REGIÃO

Região do Brasil	Potencial de biogás (mil Nm³/ano)			Quantidade potencial de plantas de biogás		
Centro-Oeste	1.922.624	–	17,68%	5.776	–	18,75%
Nordeste	910.309	–	8,37%	1.494	–	4,85%
Norte	189.502	–	1,74%	456	–	1,48%
Sudeste	6.417.374	–	59,03%	9.648	–	31,32%
Sul	1.431.989	–	13,17%	13.428	–	43,59%
Total	10.871.798	–	100%	30.802	–	100%



FONTE: INSTITUTO 17 (2021).

A fim de trazer um panorama de geração de biogás com foco no sul do Brasil, a seguir serão trazidos dados e estimativas do potencial de geração de biogás por setor, nessa região. Para este trabalho, as fontes de biomassa foram divididas em 3 grandes setores, que concentram a produção de biogás no país: agropecuária, indústria e saneamento.

2.3.2 Panorama de produção de biogás no sul do Brasil

2.3.2.1 Agropecuária

No setor agropecuário, as atividades que são passíveis de geração do biogás, segundo o Cibiogás (2022), são as atividades que envolvem a criação de animais (aves, bovinos, caprinos, suínos, entre outros). Sendo assim, serão consideradas, nesse item, os substratos provenientes destas atividades, como esterco animal, efluente proveniente do manejo dos dejetos (urina, fezes, água de lavagem etc), restos de ração, carcaça de animais mortos não abatidos, entre outros, conforme definição da Cibiogás (2022).

Por possuir uma pecuária bastante expressiva, o Brasil apresenta também uma grande geração de resíduos provenientes dessa atividade. De acordo com IBGE (2022), em 2021, foram contabilizados nesse setor a criação de cerca de 1,5 bilhão de aves, 42,5 milhões de suínos, 224,6 milhões de bovinos.

- Avicultura

Conforme dados disponibilizados pela EMBRAPA (2023), o Brasil possui grande destaque no setor de avicultura. Ele ocupa a segunda posição de maior produtor de carne de frango do mundo e a primeira colocação em exportação mundial do setor. O Brasil possui um potencial de geração de biogás na avicultura de 930 milhões Nm^3/ano , segundo UNIDO (2022a).

A avicultura no sul do Brasil dispõe de uma criação com cerca de 675 milhões de aves, o que corresponde a um potencial de geração de biogás de 331 milhões de $\text{Nm}^3\text{biogás}/\text{ano}$. Em relação ao cenário nacional, o sul do Brasil dispõe de 46% da avicultura (50% das aves de corte e 23% das aves de postura do Brasil). 51% das aves da região sul do Brasil, estão localizadas no Estado do Paraná, segundo UNIDO (2022a). Os números de aves por estado da região sul, bem como seus potenciais de geração de biogás por ano, estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA AVICULTURA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Nº de animais	Potencial de geração de biogás (mi Nm ³ /ano)
Santa Catarina	168.812.000	82
Rio Grande do Sul	159.329.000	88
Paraná	347.737.000	161
Total	674.000.000	331

FONTE: Adaptado de Unido (2022a).

- Suinocultura

Em relação à suinocultura, o Brasil também se destaca mundialmente na exportação e produção de carne de porco. O país ocupa o quarto lugar mundial, tanto em relação à produção quanto à exportação (EMBRAPA, 2023). A suinocultura, assim como outras atividades agropecuárias apresenta grande geração de resíduos com significativo potencial poluidor. Nessa atividade, a geração de dejetos corresponde a quatro vezes o equivalente populacional humano. Os dejetos suínos possuem altas concentrações de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, além de substâncias patogênicas, cor e odor, que, se não forem corretamente manipulados, podem causar desequilíbrios ambientais, proliferação de vetores e, consequentemente, aumento de doenças vinculadas à água e ao solo (SCHULTZ, 2007).

Segundo UNIDO (2022a), a Região Sul do Brasil é responsável por um rebanho total de 19.003.113 cabeças de suínos, representando 64% do rebanho nacional. Estima-se que a suinocultura, nessa região, gere anualmente cerca de 23,9 mi m³/ano de efluentes, e que esses dejetos, quando tratados adequadamente podem ser convertidos em 911,8 milhões Nm³/ano de biogás. Na Tabela 2 são detalhados os dados de potencial de geração de biogás provenientes da suinocultura, no sul do país.

TABELA 2 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA SUINOCULTURA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Nº de animais	Potencial de geração de biogás (mi Nm ³ /ano)
Santa Catarina	8.070.236	394
Rio Grande do Sul	5.544.497	262,5
Paraná	5.388.380	255,4
Total	19.003.113	911,8

FONTE: Adaptado de UNIDO (2022a).

- Bovinocultura

A bovinocultura brasileira é uma atividade de bastante destaque na economia do país. Em 2020, o Brasil foi o maior exportador de carnes do mundo, com 2,2 milhões de toneladas, correspondendo a 14,4% do mercado internacional (EMBRAPA, 2021).

Segundo UNIDO (2022a), o sul do Brasil possui um rebanho de bovinos de 12,5 milhões de cabeças, sendo cerca de 2,5 milhões bovinos de leite e 10 milhões bovinos de corte. Esse valor corresponde a 19% do rebanho nacional, com potencial para gerar cerca de 1,6 bi Nm³/ano de biogás.

No cenário nacional, o potencial de geração de biogás proveniente da bovinocultura pode chegar a 8,9 bilhões de Nm³/ano. Os valores de geração por estado da Região Sul estão apresentados na Tabela 3:

TABELA 3 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA BOVINOCULTURA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Nº de animais	Potencial de geração de biogás (mi Nm³/ano)
Paraná	4,1 milhões	546
Santa Catarina	2,8 milhões	370
Rio Grande do Sul	5,5 milhões	771
Total	12,4 milhões	1.687

FONTE: Adaptado de UNIDO (2022a).

2.3.2.2 Indústria

As atividades da indústria com potencial de geração de biogás, segundo o Cibiogás (2022), contemplam abatedouros, frigoríficos, usinas de açúcar e etanol, fecularias e amidonarias, cervejarias, indústria de óleo vegetal, gelatina, entre outras. Sendo assim, os substratos com potencial de geração de biogás são os efluentes industriais, provenientes das atividades citadas, e demais resíduos orgânicos provenientes de processos industriais.

Nesta fundamentação teórica são considerados cinco setores da indústria com geração de resíduos que possuem potencial de geração de biogás, conforme a disponibilidade de dados já existentes. São eles:

1. Setor sucroenergético
2. Laticínios
3. Abatedouros
4. Indústria e processamento da Mandioca

5. Cervejaria

- Setor Sucroenergético

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo responsável por cerca 45% da exportação mundial de açúcar (ABIOGÁS, 2020). A vinhaça e a torta de filtro são resíduos do processo de produção de etanol e açúcar que podem ser transformados em biogás. A vinhaça é a matéria mais abundante na composição do efluente proveniente dessa atividade (INSTITUTO 17, 2021).

A principal fonte de matéria prima utilizada para produção de etanol no Brasil é a cana-de-açúcar, seguida pelo milho. A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar foi de 33,8 bilhões de litros, e teve um crescimento de 4,6% em comparação com a safra de 2018/19 (CONAB, 2019).

O potencial de produção de biogás do setor sucroalcooleiro, na Região Sul do Brasil, é de 584,5 milhões de Nm^3/ano , e o Estado do Paraná retém 97% deste potencial (UNIDO 2022b). Na Tabela 4, a seguir, estão apresentados os dados de potencial de geração de biogás por ano da indústria sucroalcooleira de cada estado da Região Sul do Brasil.

TABELA 4 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Potencial de geração de biogás (Nm^3/ano)
Paraná	568,3 mi
Rio Grande do Sul	16,1 mi
Santa Catarina	24,8 mil
Total	584,5 mi

FONTE: UNIDO (2022b).

- Laticínios

Segundo a FAO (2022), em 2021, o Brasil foi o quinto maior produtor de laticínios no mundo. Foram produzidas cerca de 790 mil toneladas de queijo, 594 mil toneladas de leite em pó integral, e 82 mil toneladas de manteiga (USDA, 2023).

O sul do Brasil possui a capacidade de gerar 69 mi de Nm^3/ano a partir do efluente de laticínios. O Estado do Paraná contribui com 44,3% do total, o Rio Grande do Sul com 36,5% e Santa Catarina com 19,2% (UNIDO, 2022a). Na Tabela 5 estão apresentados os dados potenciais de geração.

TABELA 5 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DO SETOR DE LATICÍNIOS NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Geração de efluentes (m ³ /ano)	Potencial de geração de biogás (Nm ³ /ano)	Potencial de geração de biogás (Nm ³ /ano)
Paraná	6,9 mi	30,6 mi	77,8 mi
Rio Grande do Sul	5,7 mi	25,2 mi	105,8 mi
Santa Catarina	3 mi	13,2 mi	53,2 mi
Total	15,6 mi	69 mi	236,9 mi

FONTE: UNIDO (2022a) e UNIDO (2022b)

- Abatedouros

Conforme já mencionado em itens anteriores, o Brasil ocupa posição de destaque na produção de proteína animal, sendo um dos líderes mundiais e abatedouros são parte fundamental da cadeia de beneficiamento, seja para consumo interno ou exportação. Anualmente são produzidas de 3 a 4 milhões de toneladas de resíduo animal não comestível, com elevada carga orgânica e potencial poluidor (ABIOGÁS, 2020).

Os abatedouros do sul do Brasil possuem potencial de produção de 201,6 mi Nm³/ano de biogás, sendo que 53% do potencial está relacionado aos resíduos e efluentes gerados a partir do abate de suínos, 43% ao abate de bovinos e 4% ao abate de aves. Os dados de potencial de geração de biogás de abatedouros, por estado da Região Sul, estão apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DAS ATIVIDADES DE ABATEDOUROS NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Quantidade de resíduos orgânico gerado (toneladas)	Potencial de geração de biogás (Nm ³ /ano)
Paraná	301,2 mil	79 mi
Santa Catarina	192,3 mil	52,9 mi
Rio Grande do Sul	257,4 mil	69,7 mi
Total	750,9 mil	201,6 mi

FONTE: UNIDO (2022a).

- Indústria e processamento de mandioca

A produção de mandioca no Brasil no ano safra de 2021 foi de 18 milhões de toneladas em uma área plantada de 1,2 milhão de hectares. A Região Sul do Brasil

foi responsável por 25% da produção nacional (4,5 milhões de toneladas) (IBGE, 2022).

A Região Sul do Brasil possui potencial de produção de 137 mi Nm³/ano de biogás a partir das indústrias de processamento de mandioca (UNIDO, 2022a). Na Tabela 7, estão apresentados os potenciais anuais de produção de biogás da indústria de mandioca de cada estado da Região Sul do Brasil.

TABELA 7 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA INDÚSTRIA E PROCESSAMENTO DA MANDIOCA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Efluentes gerados (m ³ /ano)	Potencial de geração de biogás (Nm ³ /ano)
Paraná	20 mi	126 mi
Santa Catarina	1,5 mi	9 mi
Rio Grande do Sul	344 mil	2 mi
Total	21,8 mi	137 mi

FONTE: UNIDO (2022a).

- Cervejarias

O Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, ficando atrás apenas da China e Estados Unidos e a frente de países como Alemanha e Rússia (SINDICERV, s.d). Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, em 2023, o número de cervejarias abertas no Brasil alcançou um recorde histórico de 1.847 unidades, representando um crescimento de quase 7% em relação ao ano anterior. (BRASIL, 2024).

O potencial de produção de biogás da indústria cervejeira do sul do Brasil é cerca de 128,2 mi Nm³/ano. Os potenciais de geração de cada Estado estão apresentados na Tabela 8:

TABELA 8 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE CERVEJARIAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Estado	Potencial de geração de biogás (Nm ³ /ano)
Paraná	38,5 mi
Santa Catarina	33,5 mi
Rio Grande do Sul	56,2 mi
Total	128,2 mi

FONTE: UNIDO (2022b).

2.3.2.3 Saneamento

O saneamento básico, de acordo com a Lei Nº 14.026/2020, é definido como o conjunto dos serviços públicos, infraestrutura e instalações operacionais de (1) abastecimento de água, (2) esgotamento sanitário, (3) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, (4) drenagem e manejo de águas pluviais urbana (BRASIL, 2020). Conforme o Cibiogás (2021) as atividades relacionadas à geração de biogás no setor do saneamento são: os aterros sanitários, as usinas de tratamento de resíduos orgânicos e as estações de tratamento de esgotos. Sendo assim, o setor de saneamento se divide em duas áreas com potencial de geração de biogás: manejo de resíduos sólidos e esgotamento sanitário.

- Esgotamento Sanitário

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Saneamento (SNIS, 2020), em 2019, 54,1% da população teve acesso à coleta e tratamento de esgoto. A geração de biogás, nesse caso, ocorre quando o tratamento do esgoto se dá por meio de tratamento anaeróbico. Considerando os dados sobre saneamento no Brasil, a ABIOGÁS (2021) estimou que o potencial atual de produção de biogás a partir do esgoto sanitário tratado de 106 milhões de habitantes seja de 493 milhões de Nm^3/ano . Para 2033, considerando que a cobertura de coleta e tratamento de esgoto cresça mais de 85%, conforme cenário estipulado no Plano Nacional de Saneamento (PLANSAB), a população que poderá ser atendida nesse serviço será de 934,8 milhões de habitantes, o que poderia acarretar na geração de biogás anual de 777,59 milhões de Nm^3 .

Na Região Sul, o potencial atual de geração de biogás anual, proveniente do tratamento de esgoto, é estimado em 121,1 milhões de m^3 . Com potencial de geração, em 2033 de 155,4 Nm^3/ano (ABIOGÁS, 2021).

- Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com os dados mais recentes da ABREMA (2024), em 2023 foram geradas 81 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, com um índice de coleta desses resíduos de 93%. Do total coletado, cerca de 61% é destinado para aterro sanitário, enquanto quase 30 milhões de toneladas de resíduos são

destinadas à disposição inadequada. Do total do resíduo gerado, aproximadamente 54% é orgânico, o que significa uma geração de quase 41 milhões de toneladas de resíduo orgânico, passível de ser biodigerido e transformado em biogás e biofertilizante (ABILOGÁS, 2020).

Conforme dados apresentados pela Abiogás (2020), o potencial de geração de biogás proveniente de resíduos sólidos é cerca de 3 bilhões de Nm^3/ano , considerando que todos os resíduos gerados fossem coletados e encaminhados para um aterro sanitário ou para a biodigestão.

2.4 GÁS DE SÍNTESE

O gás de síntese é uma mistura gasosa, composta por hidrogênio e monóxido de carbono e é obtido através de matérias primas ricas em hidrocarbonetos como carvão, gás natural, biomassa e biogás e pode ser utilizado como matéria prima para diversos combustíveis (SCHAFFNER, 2018; AL-RAHBI e WILLIAMS, 2017).

O gás de síntese, como um agente intermediário, é utilizado na produção de hidrogênio puro e compostos químicos, como a amônia, e na de síntese de produtos líquidos, como metanol, querosene de aviação, dentre outros (PERES, 2010).

Para que o gás de síntese seja empregado como matéria-prima na produção de hidrogênio e na síntese de metanol e outros produtos químicos, é necessário processos como reações Fischer-Tropsch, deslocamento gás-água e/ou purificação como adsorção por variação de pressão (PSA) para uso do H_2 puro (OLIVEIRA, 2021).

2.5 HIDROGÊNIO

O hidrogênio (símbolo químico H) é o elemento mais leve e abundante do universo. Quando combinado em sua forma molecular (H_2), sob condições normais de temperatura e pressão, apresenta-se como um gás incolor, inodoro e insípido. Atualmente, o H_2 é amplamente utilizado como matéria-prima na indústria química, no processamento de alimentos, em processos de hidrogenação, na produção de amoníaco e metanol, na síntese de Fischer-Tropsch, na indústria farmacêutica, entre outros (ALVES *et al.*, 2013).

Por não conter átomos de carbono e ser extremamente leve, o hidrogênio molecular apresenta a maior densidade energética por unidade de massa entre todos os combustíveis, podendo conter aproximadamente três vezes mais energia por grama do que o petróleo. (Santos e Santos, 2005; Vargas, 2006; ABDIN, 2020). Na TABELA 9, é possível observar os valores de Poder Calorífico de diferentes combustíveis.

TABELA 9 - PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

Combustível	Poder Calorífico Superior (a 25 °C e 1 atm) – kJ/g	Poder Calorífico Inferior (a 25 °C e 1 atm) – kJ/g
Hidrogênio	141,86	119,3
Metano	55,53	50,02
Propano	50,36	45,6
Gasolina	47,5	44,5
Gasóleo	44,8	42,5
Metanol	19,96	18,05

FONTE: OLIVEIRA, 2021.

Dessa forma, o hidrogênio pode contribuir de forma significativa para o uso de energia limpa e renovável, quando sua obtenção se der através de processos que possuem baixa ou nula emissão de CO₂. O hidrogênio produzido com baixa emissão de carbono pode atuar como transportador de energia, substituindo os hidrocarbonetos, como diesel e gasolina (SHEFFIELD *et al.*, 2014).

2.6 ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Os processos mais comuns utilizados industrialmente para obtenção do gás de síntese, são: a reforma do metano e a gaseificação. A reforma do metano é classificado em diversos processos, sendo os mais utilizados a reforma a vapor, oxidação parcial, reforma autotérmica e reforma a seco (OLIVEIRA, 2021; ALVES *et al.*, 2013). A Tabela 10 consolida as equações citadas nesta sessão, que são mencionadas no detalhamento de cada rota de produção a seguir.

TABELA 10 - REAÇÕES QUÍMICAS ENVOLVIDAS NOS PROCESSOS DE REFORMA DO METANO

Equação	Reação	ΔH_{298} (kJ mol ⁻¹)	Nome da Reação
1	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{H}_2$	+247,0	Reforma a seco
2	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41,0	Deslocamento gás-água (Water Gas Shift)
3	$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$	+75,0	Decomposição do Metano
4	$2\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{CO}_2$	-172,0	Boudouard
5	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	+165,0	Metanação
6	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$	+206,0	Reforma de metano com vapor d'água
7	$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$	+75,0	Decomposição do metano
8	$\text{CO} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C} + \text{H}_2\text{O}$	-131,0	Redução de CO
9	$\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + 2\text{H}_2$	-38,0	Oxidação Parcial
10	$\text{CH}_4 + 1/2 x\text{O}_2 + y\text{CO}_2 + (1-x-y)\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons (y+1)\text{CO} + (3-x-y)\text{H}_2$	~0	Reforma autotérmica
11	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	-802,0	Combustão

FONTE: Adaptado de Schaffner (2018).

2.6.1 Reforma a vapor

A reforma a vapor é o método predominante utilizado em escala industrial para a produção de gás de síntese, sendo favorecida por condições de baixa pressão e elevada temperatura (DI GIULIANO *et al.*, 2017). Neste processo, o metano reage com vapor de água na presença de um catalisador, produzindo CO e H₂ (Equação 6). A razão H₂/CO obtida nesse processo costuma ser superior a 3:1.

As temperaturas de reação variam entre 650 e 850 °C, possibilitando rendimentos de H₂ da ordem de 60 a 70% (ALVES *et al.*, 2013; DI GIULIANO *et al.*, 2017). O excesso de vapor d'água contribui para a mitigação da formação de coque ao favorecer a reação inversa da redução do CO. Contudo, as elevadas temperaturas envolvidas favorecem reações paralelas (Equações 3, 4 e 8), que podem acelerar a desativação catalítica, tanto por sinterização — perda de área superficial ativa — quanto por deposição de carbono na superfície do catalisador (DI GIULIANO *et al.*, 2017; KARIMIPOURFARD *et al.*, 2014).

2.6.2 Reforma a seco

A reforma a seco do metano tem despertado grande interesse como tópico de pesquisa, principalmente por ser um processo que faz o reaproveitamento de dois gases contribuintes do efeito estufa, o dióxido de carbono (CO_2) e o metano do biogás (CH_4), produzindo o gás de síntese (mistura de CO e H_2), que é comumente usado como combustível ou matéria-prima para a indústria química (BIAN *et al.*, 2016; DE SOUZA, 2020). Esse processo é uma forma eficiente de valorização do CH_4 e do CO_2 , e a matéria-prima que pode ser usada nessa reforma abrange desde reservas de gás natural ricas em CO_2 , até biogás renovável produzido por fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos (composto principalmente por CH_4 e CO_2), oferecendo, portanto, a possibilidade de ampliar sua utilização e evitar a liberação de CO_2 na atmosfera (LUISETTO *et al.*, 2015)

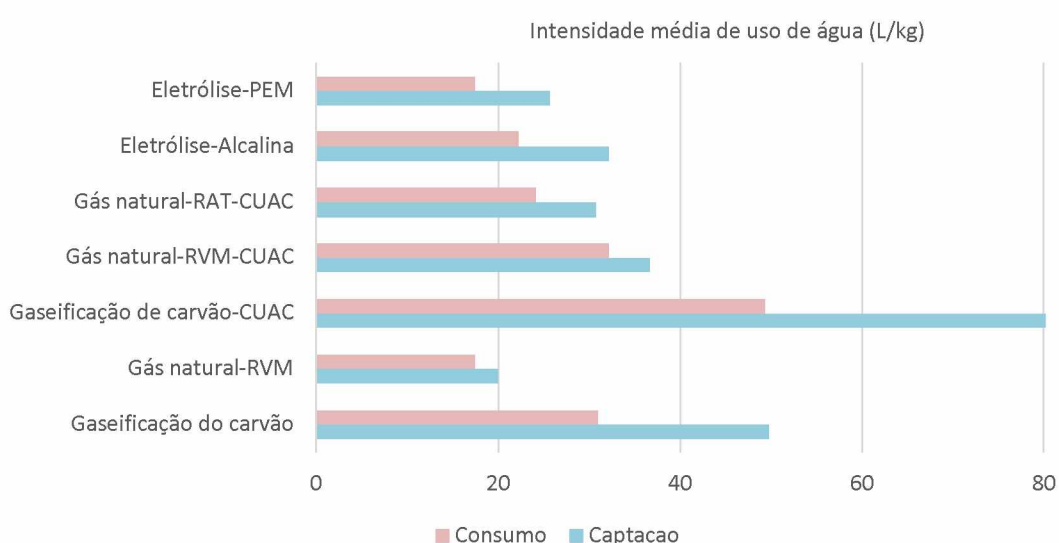
A reforma a seco do biogás é um processo endotérmico ($\Delta H^\circ_{298\text{K}} = + 247 \text{ kJ mol}^{-1}$) que ocorre sob pressão atmosférica, em temperaturas que variam entre 600 e 900 °C. A razão molar típica CH_4/CO_2 varia entre 1 e 1,5 e as conversões são de até 100% para CH_4 e CO_2 e um gás de síntese (equação 1) com uma razão H_2/CO próxima de 1. Esse processo se destaca por sua simplicidade operacional, exigindo menor grau de purificação do biogás e promovendo maior eficiência na conversão de CH_4 e CO_2 (AYODELE *et al.*, 2016; BIAN *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Concomitante à reforma a seco (Equação 1), podem ocorrer reações como deslocamento gás-água (Equação 2), decomposição do metano (Equação 3), Boudouard (Equação 4) e Metanação (Equação 5). Essas reações secundárias podem levar à formação de carbono na superfície do catalisador, provocando obstrução dos poros e bloqueio dos sítios ativos. Além disso, a água formada em algumas dessas reações, como o deslocamento gás-água, pode favorecer a metanação, reduzindo a razão H_2/CO (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a reforma a seco apresenta vantagens econômicas e ambientais em relação à reforma a vapor, uma vez que dispensa completamente o uso de água no processo. Isso elimina a necessidade de geração de vapor, etapa que demanda significativa quantidade de energia para aquecer e vaporizar a água, bem como os sistemas de recuperação e tratamento de água após sua utilização. A ausência desses requisitos resulta na simplificação da planta para esta tecnologia, na redução dos custos de capital e operacionais, e na diminuição do consumo energético

e das emissões de CO₂ associadas à produção e manejo da água no processo. O Gráfico 1, apresentado a seguir, contempla uma comparação das intensidades médias de captação e consumo de água de diferentes tecnologias para a produção de hidrogênio. Vale ressaltar, que conforme os pontos apresentados anteriormente, por não demandar o uso de água, a reforma a seco não está contemplada nessa comparação de consumo de água.

GRÁFICO 1 - COMPARAÇÃO DAS INTENSIDADES MÉDIAS DE CAPTAÇÃO E CONSUMO DE ÁGUA POR TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO



Nota: Água potável (ou fontes com qualidade de água semelhante) é (são) utilizada(s) ou assumida(s) como a(s) fonte(s) de água por trás desses pontos de dados. Para o hidrogênio azul, os requisitos de resfriamento para sistemas de captura, utilização e armazenamento de carbono (CUAC) estão incluídos. Para PEM e RAT, os pontos de dados disponíveis são limitados, uma vez que essas tecnologias são relativamente novas – o que explica as faixas de valores muito menores. RAT = reforma autotérmica; CUAC = captura, utilização e armazenamento de carbono; kg = quilograma;

FONTE: Adaptado de IRENA (2023).

O Gráfico 1, traduzido do relatório da IRENA, de 2023, apresenta as intensidades médias de captação e consumo de água por quilograma de hidrogênio produzido, destacando diferenças significativas entre as rotas tecnológicas. A tecnologia baseada na gaseificação de carvão com captura, utilização e armazenamento de carbono (CUAC) são as mais intensivas, com uma captação média de 80,2 L/kg e consumo de 49,4 L/kg de H₂. Estes valores são quase três vezes superiores aos da eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM). Mesmo sem CUAC, a gaseificação de carvão ainda apresenta alta intensidade hídrica (captação de 49,8 L/kg e consumo de 31,0 L/kg).

No caso das tecnologias baseadas em gás natural, a rota de Reforma a Vapor do Metano sem CUAC apresenta valores mais baixos em relação às versões com captura: 20,0 L/kg de água consumidos e 17,5 L/kg captados, mostrando-se mais eficiente no uso da água do que suas variantes com captura de carbono. A Reforma a Vapor do Metano com CUAC consome 32,2 L/kg e capta 36,7 L/kg, enquanto a Reforma Autotérmica com CUAC apresenta um consumo de 24,2 L/kg e captação de 30,8 L/kg. Já a rotas por Eletrólise Alcalina consome 22,3 L/kg e capta 32,2 L/kg, enquanto a PEM consome 17,5 L/kg, e capta 25,7 17,5 L/kg, valor mais baixo entre as tecnologias limpas analisadas.

Diante desse cenário, destaca-se a reforma a seco como uma alternativa estratégica, não apenas por sua compatibilidade com biocombustíveis e potencial de descarbonização, mas especialmente por eliminar a necessidade de água no processo produtivo. Essa característica, além de reduzir os impactos ambientais diretos, simplifica o sistema industrial e fortalece sua aplicabilidade em regiões com estresse hídrico, mostrando-se uma rota promissora para a produção de hidrogênio sustentável em larga escala.

2.6.3 Oxidação Parcial e Reforma Autotérmica

A oxidação parcial do metano é um método alternativo para produzir H_2 , pois apresenta um custo operacional reduzido de energia, já que a reação é moderadamente exotérmica (equação 9). Portanto, parte da energia térmica necessária para a reação é suprida, reduzindo assim o consumo energético total. No entanto, é importante considerar que o aumento de temperatura local durante o processo pode gerar *hot spots* no leito do reator, o que pode afetar negativamente o desempenho do catalisador e levar à formação de coques na sua superfície, prejudicando a eficiência do processo (SCHAFFNER, 2018; ALVES *et al.*, 2013). A TABELA 10 apresenta as reações químicas envolvidas nos diferentes processos de reforma do metano.

Durante a reforma autotérmica (equação 10), ocorre simultaneamente a reforma a vapor (equação 6) e a oxidação parcial do metano (equação 9), o que torna o processo autossustentável, e reduz significativamente os custos de energia. (SCHAFFNER, 2018). As vantagens da reforma autotérmica dizem respeito à rapidez com que o reator pode ser desligado e reiniciado, além da capacidade de produzir

maiores quantidades de H_2 com menor consumo de O_2 quando comparado à oxidação parcial isolada, já que a razão H_2/CO no gás de síntese produzido pode ser facilmente ajustada por meio da razão $CH_4/O_2/H_2O$ na alimentação do reator, permitindo a síntese do produto desejado (ALVES *et al.*, 2013). A combinação da reforma a vapor e da oxidação parcial possibilita desenvolver um processo favorável energeticamente, uma vez que as reações de reforma são endotérmicas e a oxidação, é exotérmica. Ou seja, a energia liberada pela oxidação é aproveitada na reação de reforma, denominado, portanto, como um processo autotérmico (DE SOUZA, 2020).

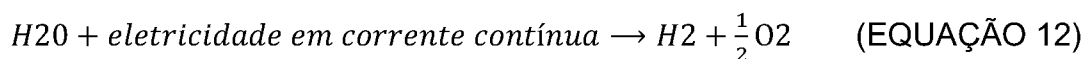
2.6.4 Gaseificação

A gaseificação permite a obtenção de diversos produtos, como eletricidade, insumos para síntese química, combustíveis para transporte e hidrogênio, o que tem consolidado o uso da biomassa como uma alternativa viável e estratégica de combustível no setor industrial (TEZER, 2022).

A gaseificação é um processo termoquímico que converte biomassa em gás de síntese. Durante a conversão, a biomassa passa por decomposição térmica a altas temperaturas, entre 750 e 850°C, resultando na desidratação e despolimerização dos carboidratos e da lignina. Após a conversão, o gás gerado é purificado para remover impurezas inorgânicas e alcatrão (REN *et al.*, 2019).

2.6.5 Eletrólise

A eletrólise da água é uma das rotas tecnológicas mais consolidadas para a produção de hidrogênio de forma potencialmente sustentável, especialmente quando associada a fontes renováveis de energia. Trata-se de um processo no qual a molécula de água (H_2O) é dissociada em hidrogênio e oxigênio por meio da aplicação de energia elétrica (Equação 12). A célula eletrolítica é o elemento central desse processo, sendo composta por eletrodos — cátodo e ânodo — que recebem eletricidade em corrente contínua, promovendo a liberação de H_2 no cátodo e O_2 no ânodo (CETINKAYA, DINCER, NATERER, 2023; BHANDARI, TRUDEWIND e ZAPP, 2014).



O hidrogênio produzido por essa via é considerado de baixo carbono quando a eletricidade utilizada no processo provém de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica. Nesses casos, o sistema de eletrólise da água utiliza a energia elétrica renovável para gerar hidrogênio e oxigênio, sem a emissão direta de gases de efeito estufa. Desde o início do século XIX, a eletrólise tem sido uma técnica empregada para a geração de H_2 , sendo uma das mais antigas e ainda hoje amplamente utilizada (AJEEB, NETO E BAPTISTA, 2024).

Segundo Bhandari, Trudewind e Zapp (2014), com o avanço das tecnologias de eletrólise, diferentes tipos de eletrólizadores vêm sendo desenvolvidos e aplicados industrialmente. Os principais são: o eletrólizador de membrana de troca de prótons (Proton Exchange Membrane Electrolyzer – PEM), o eletrólizador alcalino (Alkaline Electrolyzer – ALEL) e o eletrólizador de óxido sólido (Solid Oxide Electrolyzer – SOEL). Essas tecnologias se distinguem pelas condições operacionais de temperatura e pressão, pelo tipo de eletrólito utilizado e pelos íons predominantes no processo — como OH^- nas tecnologias alcalinas e H^+ nas de membrana de troca de prótons (AJEEB, NETO E BAPTISTA, 2024). A utilização de diferentes eletrólitos e eletrocatalisadores também pode aumentar a velocidade da reação eletroquímica, melhorando a eficiência do sistema e contribuindo para a redução de custos operacionais. A eletrólise AEL e PEM são realizadas a temperaturas de algumas dezenas de graus Celsius. Esses dois tipos representam as tecnologias de eletrólise mais maduras e são comumente utilizadas por plantas de produção de hidrogênio para fins comerciais (JI e WANG, 2021).

2.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida (ACV), ou análise do ciclo de vida, é um método proposto para avaliar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade ao longo de todo o seu ciclo de vida. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA (2006), a ACV avalia todos os estágios da vida útil de um produto sob a perspectiva de que eles são interdependentes, ou seja, um fluxo de produção leva a outro. A ACV permite estimar os impactos ambientais cumulativos resultantes de todos os estágios do ciclo de vida do produto, muitas vezes

incluindo impactos não considerados em análises mais tradicionais (por exemplo, extração de matéria-prima, transporte de material, descarte final do produto *etc.*). Devido à sua natureza quantitativa, a ACV pode ser usada para comparar os impactos ambientais de diferentes processos e sistemas de produtos, quantificando seu potencial de impacto sobre o meio ambiente (Bjørn *et al.*, 2017).

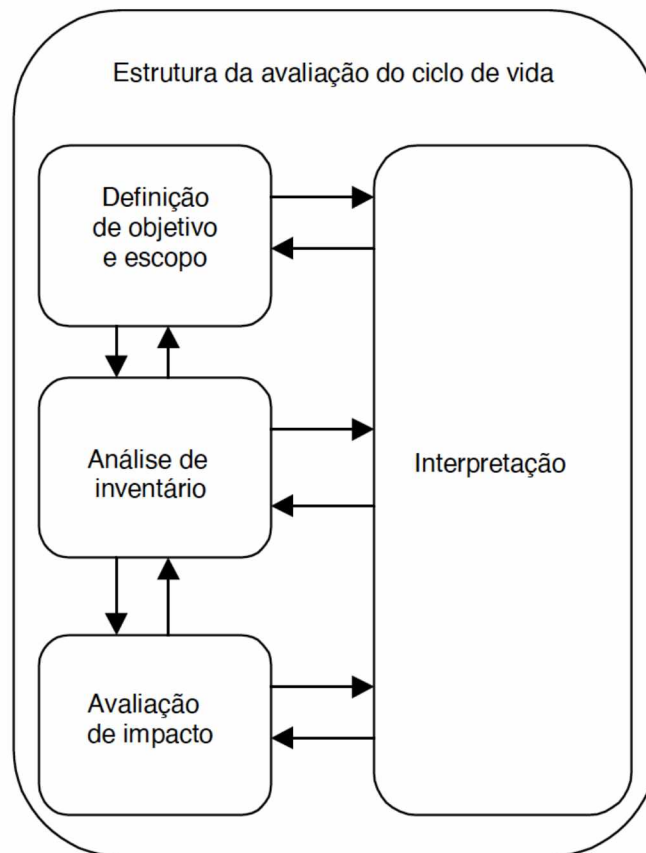
A ACV representa uma ferramenta crucial de apoio à tomada de decisões, estimando os potenciais impactos ambientais de sistemas de produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida. Amplamente empregada para orientar políticas e programas ambientais, a ACV desempenha um papel significativo na informação aos consumidores por meio de rótulos e declarações ambientais. Além disso, ela oferece suporte aos setores na redução do impacto ambiental de suas atividades e no design de produtos mais sustentáveis. Ela pode auxiliar, portanto, na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida; na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não-governamentais; na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição; e no marketing (Levasseur *et al.*, 2016; ABNT NBR ISO 14.040/2009).

Segundo Finnveden *et al.* (2019) a ACV é uma avaliação abrangente e considera todos os atributos ou aspectos do ambiente natural, da saúde humana e dos recursos. O escopo abrangente da ACV é útil para evitar a transferência de problemas, por exemplo, de uma fase do ciclo de vida para outra, de uma região para outra ou de um problema ambiental para outro. A ACV tornou-se mais expressiva na pesquisa, no setor e na formulação de políticas na última década, tornando-se a principal ferramenta aplicada para estudar todo o ciclo de vida de um produto em termos de sustentabilidade (Mehmeti *et al.*, 2018).

2.7.1 Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida

O processo de realização de uma ACV é composto por 4 processos, apresentados na Figura 5. Conforme definido pela ABNT NBR ISO 14.040 de 2009, as etapas consistem em: (i) Definição de objetivo e escopo; (ii) Análise de Inventário; (iii) Avaliação de Impacto; e (iv) Interpretação.

FIGURA 5 - ETAPAS DE UMA ACV



FONTE: ABNT NBR ISO 14.040 (2009).

2.7.1.1 Definição de objetivos e escopo

Nesta primeira etapa é onde será definido e descrito o produto, o processo ou a atividade, estabelecendo o contexto no qual a avaliação será feita. Além disso, serão identificados os limites e os efeitos ambientais a serem analisados para a avaliação (EPA, 2006). A definição da meta e do escopo inclui os motivos para a realização do estudo, a aplicação pretendida e o público-alvo (ABNT NBR ISO 14.040/2009).

De maneira mais aprofundada, o início da Avaliação do Ciclo de Vida demanda uma definição minuciosa dos objetivos do estudo. Essa abordagem, que constitui uma etapa obrigatória nos estudos de ACV, representa o momento em que todas as suposições e julgamentos de valor são minuciosamente explicitados e justificados (HAUSCHILD, 2017).

Durante essa primeira etapa, será estabelecido a unidade funcional a ser analisada. A unidade funcional é uma medida quantitativa das funções que os bens (ou serviços) oferecem. Ou seja, é uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema de produto. O propósito principal de uma unidade funcional é fornecer uma referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas (Finnveden *et al.*, 2019; ABNT NBR ISO 14.040/2009). Além disso, é durante essa fase que se estabelecem os limites para investigação do sistema em questão, selecionam-se os parâmetros de avaliação para a mensuração de impactos e definem-se os métodos a serem utilizados na avaliação desses impactos (HAUSCHILD, 2017).

Na etapa de definição de escopo e fronteiras do sistema, existem diferentes abordagens para a definição do ciclo a ser analisado. A abordagem *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”) considera os impactos da extração de matéria-prima, produção do material até o produto sair da fábrica. Já a abordagem *cradle-to-grave* (“do berço ao túmulo”), abrange todas as fases do ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até o descarte final, incluindo as fases de produção, uso, manutenção e disposição (fase do túmulo) (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; EUROPEAN COMMISSION, 2010)

2.7.1.2 Inventário do Ciclo de Vida

A segunda fase da ACV, o inventário de ciclo de vida (ICV), consiste em quantificar as entradas e saídas de todo o sistema. Nesse momento serão identificados e quantificados, por exemplo, o uso de energia, de água, materiais e ainda o lançamento de possíveis contaminantes, como as emissões atmosféricas, descarte de resíduos sólidos, e descargas de águas residuais (EPA, 2006; ABNT NBR ISO 14.040/2009). Para isso, define-se um sistema que inclui todas as cadeias de processos relevantes para a fabricação, uso e gerenciamento dos resíduos gerados no ciclo de vida do produto. Em cada processo dessa cadeia, são inventariadas as intervenções ambientais, como emissões para o ar e corpos hídricos e extração de

recursos, em relação à função do produto. As intervenções causadas por cada processo são organizadas por tipo, resultando em uma lista de intervenções ambientais associadas à função do produto, conhecida como tabela de inventário. Essa tabela, que contém os fluxos quantificados que cruzam o limite do sistema, serve de base para a fase seguinte, a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (TUKKER, 2000; BJORN, 2017a).

Essa fase é fundamental, pois envolve a coleta detalhada e organização de dados sobre os fluxos de entrada e saída ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, processo ou sistema. Sem esse inventário, que compõe a base para a avaliação de impactos ambientais, não é possível realizar comparações precisas ou identificar oportunidades de melhoria. Para otimizar a coleta de dados, é possível consultar bases de dados especializadas em ACV, que oferecem inventários com dados genéricos para preencher lacunas de informações específicas. Essas bases contêm informações sobre fluxos ambientais e tecnológicos, auxiliando na análise dos impactos associados e permitindo a adaptação dos dados a cenários específicos, especialmente em casos em que os dados locais não são acessíveis (EPA, 2006).

2.7.1.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Na terceira fase de uma ACV, denominada Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), é feita a associação das informações obtidas no inventário com os reais impactos gerados por esses dados. Para isso, são escolhidas previamente as categorias de impacto a serem abordadas naquele estudo, geralmente refletindo um mecanismo comum de ameaça ao meio ambiente (SCHRAM, 2020; TUKKER, 2000).

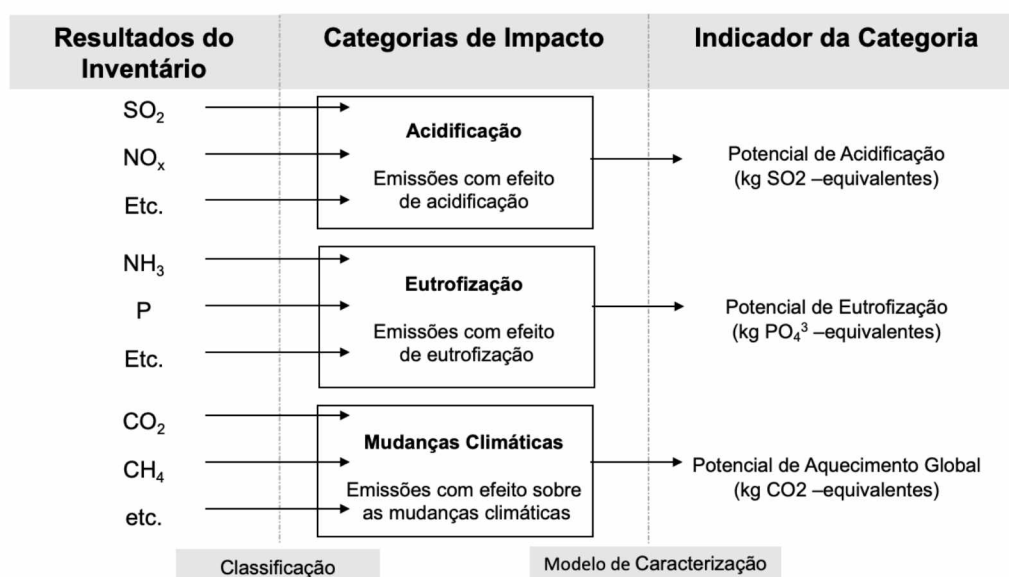
O objetivo da fase de avaliação de impacto é agregar as informações obtidas no inventário. Para essa fase, de acordo com a ABNT NBR ISO 14.044/2009, são obrigatórios três elementos: a seleção das categorias de impacto; a classificação; e a caracterização.

- **Seleção das categorias de impacto:** No primeiro passo da etapa de AICV, são selecionadas as categorias de impacto, que irão refletir um mecanismo comum de ameaça ao meio ambiente (por exemplo, aquecimento global, acidificação e destruição da camada de ozônio).

- Na etapa de **classificação**, as intervenções ambientais listadas na tabela do inventário (como por exemplo emissões atmosféricas de CO₂ e CH₄), são atribuídas às categorias de impacto.
- A **caracterização** do impacto utiliza fatores de conversão com base científica, chamados fatores de caracterização, para converter e combinar os resultados do inventário em indicadores equiparáveis para se obter uma quantificação do impacto daquela categoria. Em outras palavras, os fatores de caracterização traduzem diferentes dados de inventário em indicadores de impacto diretamente comparáveis. Por exemplo, emissões atmosféricas de diferentes gases, que contribuem na categoria de impacto de Mudanças Climáticas são transformadas em emissões de CO₂ equivalente. Assim, tem-se uma visão geral da contribuição de cada gás na categoria, e a contribuição total da categoria de impacto.

As três etapas obrigatórias da etapa de AICV estão apresentadas na FIGURA 6.

FIGURA 6 - CATEGORIAS DE IMPACTO, CLASSIFICAÇÃO DE CARACTERIZAÇÃO



FONTE: Adaptado de SCHRAM (2000).

De acordo com Piekarski *et al.* (2012), alguns métodos estão integrados nos softwares de ACV normalmente utilizados como suporte para estudos dessa natureza. A escolha do método de avaliação é feita tomando-se como base a análise das questões ambientais relevantes para o ciclo de vida do produto estudado.

Os métodos atualmente utilizados para AICV foram desenvolvidos majoritariamente para regiões específicas, como o Canadá, Europa, Japão e Estados Unidos. Exemplos desses métodos incluem CML 2002, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, MEEuP e ReCiPe. (MENDES, BUENO, OMETTO, 2016; PIEKARSKI *et al.*, 2012). Observa-se, portanto, uma lacuna significativa em métodos desenvolvidos para as especificidades brasileiras e da América do Sul, o que resulta na ausência de procedimentos de avaliação adequados ao contexto brasileiro (MENDES, BUENO, OMETTO, 2016). Para minimizar as incertezas nessas avaliações, alguns estudos sugerem a aplicação de múltiplos métodos de AICV.

Barros *et al.* (2020) revisou 47 estudos sobre Avaliação de Ciclo de Vida da geração de eletricidade, analisando, dentre vários aspectos, os métodos de AICV. O estudo indicou que, embora a mudança climática fosse a categoria de impacto mais comumente utilizada entre todos os estudos, os métodos de avaliação de impacto mais aplicados foram ReCiPe, CML e IPCC.

A partir do resultado do Inventário do Ciclo de Vida, a fase de AICV traduz esses dados de entrada e os fluxos estabelecidos em termos de impactos ambientais. Existem diferentes métodos de AICV disponíveis, criados a partir de distintas perspectivas científicas e teóricas, abrangendo uma ampla gama de categorias de impacto e proporcionando variados fatores de caracterização que permitem uma análise detalhada dos efeitos ambientais (ESNOUF *et al.*, 2019). No Quadro 1, estão apresentados alguns métodos de AICV existentes, identificados por Mendes, Bueno e Ometto (2016).

QUADRO 1 - MÉTODOS DE AICV

CML
Eco-indicator99
Ecological scarcity
EDIP
EPS 2000
Impact 2002+
LIME
LUCAS

MEEuP
ReCiPe
TRACI
USEtox
IMPACT WORLD+

FONTE: Mendes, Bueno e Ometto (2016).

Além da escolha do método, são elementos opcionais da fase de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida: a normalização; o agrupamento; a ponderação; e a análise da qualidade dos dados.

- A **normalização** expressa os valores encontrados para as categorias de impacto em relação a um valor de referência estabelecido para cada categoria (ABNT NBR ISO 14.044; SCHRAM, 2020).
- O **agrupamento** atribui categorias de impacto em um ou mais conjuntos para facilitar a interpretação dos resultados em áreas específicas de preocupação. Esse agrupamento poderá ser, por exemplo, de acordo com as características dos indicadores de impacto como emissões (atmosféricas e hídricas, ou locais, regionais e globais), ou ainda impactos com prioridade alta, baixa ou média. (ABNT NBR ISO 14.044/2009; EPA 2006).
- A etapa de **ponderação** de uma AICV atribui pesos ou valores relativos às diferentes categorias de impacto com base na importância ou relevância de cada uma, conforme avaliado pelo profissional que está realizando o estudo. Essa etapa deve refletir as metas do estudo e os valores das partes interessadas (SCHRAM, 2020; EPA 2006).
- A **análise de qualidade dos dados** é realizada com intuito de se compreender melhor a significância, incerteza e sensibilidade dos resultados da AICV, de modo a ajudar a distinguir se diferenças significativas estão ou não presentes, identificar resultados não significativos do ICV, ou orientar o processo iterativo da AICV (ABNT NBR ISO 14.044/2009).

2.7.1.4 Interpretação

A interpretação constitui a etapa final de uma Avaliação do Ciclo de Vida, na qual os resultados das fases anteriores são integrados e analisados considerando as incertezas dos dados utilizados e as suposições feitas e registradas ao longo do estudo. O resultado desse processo serve para orientar as fases anteriores quanto à necessidade de aprimorar a base de dados do estudo e, caso isso não seja possível, reconsiderar a definição dos objetivos e do escopo do estudo. Por fim, são fornecidas diretrizes sobre como formular conclusões baseadas nos passos prévios da interpretação, avaliar a robustez dessas conclusões e desenvolver recomendações a partir dos resultados obtidos (HAUSCHILD, BONOU E OLSEN, 2017).

A interpretação visa formular conclusões ou recomendações que estejam alinhadas com os objetivos estabelecidos na fase de definição de objetivos e as restrições definidas pelo escopo, e levem em consideração a adequação da unidade funcional e os limites do sistema. Além disso, a interpretação deve apresentar as conclusões da ACV de maneira clara, auxiliando os usuários do estudo a avaliar sua robustez e identificar possíveis limitações, considerando quaisquer restrições identificadas ao longo do estudo (HAUSCHILD, BONOU E OLSEN, 2017).

Conforme definido pela ABNT NBR ISO 14.040/2009, a fase de interpretação é a fase da ACV onde os resultados da análise do inventário e da avaliação de impacto são combinados com o objetivo e escopo definidos, para alcançar conclusões e recomendações para os tomadores de decisão.

A interpretação é a fase da ACV em que os resultados da análise de inventário e da avaliação de impacto são combinados para identificar as questões mais significativas. Nessa fase, o estudo é avaliado por meio de verificações de completude, sensibilidade e consistência. O objetivo dessa avaliação é estabelecer e aumentar o grau de certeza e confiabilidade dos resultados do estudo de ACV.

Esta última etapa da ACV resume os resultados da Análise de Inventário do Ciclo de Vida (LCI) e da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA), assim como a qualidade desses resultados. Nessa fase, são elaboradas conclusões e recomendações com base nos dados analisados (MEHMETI *et al.*, 2018).

2.8 ACV E A PRODUÇÃO DE H₂

A literatura existente que envolve a Avaliação do Ciclo de Vida na produção de hidrogênio mostra uma ampla diversidade de abordagens e contextos de aplicação. Estudos recentes exploram a viabilidade ambiental e econômica da produção de hidrogênio, a partir da biomassa, considerando diferentes tipos de matéria-prima, como madeira, palha de milho e resíduos orgânicos de várias origens (por exemplo lodo de esgoto, restos de alimentos e adubos animais). Além disso, as pesquisas abordam uma variedade de métodos químicos para a produção de hidrogênio, como gaseificação, eletrólise, reforma a vapor, contemplando tanto rotas com menor impacto ambiental quanto as tradicionais baseadas no uso de gás natural. Neste item 2.8, são reunidos trabalhos que aplicam a Avaliação do Ciclo de Vida à produção de hidrogênio por diferentes rotas, incluindo tanto aquelas voltadas à obtenção de H₂ de baixo carbono quanto as associadas à reforma do gás natural. Ressalta-se aqui que não foram encontrados estudos com o mesmo escopo que este trabalho aborda, ou seja, a reforma a seco para a obtenção de hidrogênio de baixo carbono.

Chelvam *et al.* (2024) apresentam uma revisão de 61 artigos de pesquisa sobre estudos de ACV baseados em diferentes tecnologias de produção de hidrogênio durante o período de 2002 a 2022. A maior parte dos estudos analisados (50) foram realizados em países desenvolvidos, e uma pequena parte foram realizados em países em desenvolvimento (11). Dessa minoria, não há nenhum estudo que contemple a América do Sul, sendo apenas um deles realizado no âmbito da América Latina (México). Além disso, o processo de produção de hidrogênio com mais reincidência, nos 61 artigos, foi a eletrólise da água, com 30 estudos registrados, e, em seguida, a reforma a vapor do metano e a gaseificação de biomassa estiveram presentes em 24 e 16 estudos de caso, respectivamente.

Dentre os autores analisados para este trabalho, Cho, Strezov e Evans (2022) analisaram a produção de hidrogênio por reforma a vapor do metano utilizando dados reais de 33 instalações nos Estados Unidos. A partir da Avaliação do Ciclo de Vida, o estudo identificou que as emissões diretas do processo alcançam cerca de 9,35 kgCO₂eq/kgH₂, valor que sobe para 11,2 kgCO₂eq/kgH₂ quando consideradas todas as etapas do ciclo de vida, incluindo a extração e o transporte do gás natural.

Ouana *et al.* (2024) avaliou três rotas para produção de hidrogênio no Brasil com base em uma Análise do Ciclo de Vida, destacando a rota convencional por

reforma a vapor de gás natural como a de maior impacto ambiental. Os resultados indicam que a produção de hidrogênio derivada de fontes fósseis apresenta uma emissão de $17,5 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$, evidenciando a necessidade de transição para rotas mais limpas e sustentáveis. Koroneos *et al.* (2004) realizaram uma análise do ciclo de vida de diferentes rotas de produção de hidrogênio, incluindo a reforma a vapor do gás natural. Para o hidrogênio obtido a partir da reforma a vapor do metano, foi identificado um valor de emissão de $10,8 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$, evidenciando a carga ambiental associada a essa rota baseada em combustíveis fósseis. Em contrapartida, rotas que utilizam fontes renováveis, como energia eólica, hídrica e solar térmica, foram apontadas como as mais ambientalmente favoráveis.

Hajjaji *et al.* (2016) analisaram, por meio da metodologia ACV, o desempenho energético e o impacto ambiental do sistema de produção de H_2 a partir da reforma a vapor do biogás. O estudo demonstrou que a rota de produção de hidrogênio proveniente do biogás pode representar uma boa alternativa em termos de emissões de GEE ($5,59 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$), pois emite cerca de metade de um sistema de produção de H_2 convencional (reforma a vapor do metano, proveniente do gás natural).

Li *et al.* (2020a) comparou os processos de produção de hidrogênio, por meio da gaseificação a partir de carvão e biomassa. A análise foi feita por meio da aplicação da metodologia de análise do ciclo de vida, considerando o consumo de energia e as emissões de GEE desses processos. O estudo constatou que o processo baseado em biomassa consome 75,4% menos energia e emite 89,6% menos GEE do que o processo a partir de carvão, com um valor total de emissões da rota por biomassa de $5,39 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgH}$

Salkuyeh *et al.* (2018) avaliou e comparou o impacto da tecnologia de gaseificação (de leito fluidizado e de fluxo arrastado) no desempenho técnico-econômico e ambiental do ciclo de vida da produção de hidrogênio a partir da biomassa. Este estudo destacou que a utilização de biomassa como matéria-prima neutra em carbono e a captação de CO_2 pode resultar em emissões negativas de gases de efeito estufa nas rotas baseadas em biomassa analisadas. As emissões reportadas variaram entre $-21,8$ e $-15,8 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgH}$, dependendo do cenário considerado.

Arfan *et al.* (2023) avaliou a produção de hidrogênio a partir da gaseificação da biomassa utilizando análise do ciclo de vida e custos. O processo com biomassa

apresentou um impacto climático de 1,54 kgCO₂eq/kgH demonstrando competitividade em diversas categorias ambientais e econômicas.

É relevante destacar, no entanto, que a comparabilidade entre estudos pode ser desafiada pelas diferentes fronteiras do sistema adotadas em cada avaliação. Cada pesquisa define seus próprios limites e parâmetros de análise, o que pode levar a variações nos resultados. Assim, ao comparar estudos sobre a produção de hidrogênio a partir de biomassa, é fundamental considerar essas diferenças nas fronteiras do sistema, assim como nas fontes de biomassa e nos métodos químicos utilizados. Essa consideração ajuda a interpretar os resultados de forma mais contextualizada e a entender melhor as limitações e implicações dos dados apresentados.

A tecnologia de eletrólise da água tem sido amplamente investigada como uma rota promissora para a produção de hidrogênio de baixo carbono. No âmbito da ACV, diversos estudos têm buscado quantificar os impactos ambientais associados a essa tecnologia, considerando desde a origem da eletricidade utilizada até os insumos necessários ao processo. Os resultados dos estudos apresentados a seguir reflete não apenas as diferenças nas fontes energéticas, mas também nos critérios metodológicos adotados, o que evidencia a complexidade envolvida na comparação entre sistemas. A seguir, são apresentados estudos que analisam a produção de hidrogênio via eletrólise em diferentes contextos energéticos, com ênfase nas emissões de gases de efeito estufa.

Nnabuife et. al (2023) comparou diferentes métodos de produção de H₂ e os impactos ambientais relativos a esses processos. Segundo o estudo, que analisou estudos de ACV para a produção de H₂ por meio da eletrólise via energia eólica, via biomassa, e via energia solar, os valores médios obtidos para a categoria de potencial de aquecimento global foram, respectivamente: 1,08 kgCO₂eq/kgH₂; 2,70 CO₂eq/kgH₂; 1,82 CO₂eq/kgH₂.

Zhang et. al, (2022) realizaram avaliação de ciclo de vida para três métodos de produção de H₂ por meio de energia solar, sendo dois deles métodos envolvendo eletrólise. No que se refere ao potencial de aquecimento global, o sistema com energia fotovoltaica apresenta impacto ligeiramente superior ao sistema com energia fototérmica. Os valores estimados de emissões de dióxido de carbono equivalente foram de 9,37 kg e 8,67 kgCO₂eq/kgH₂, respectivamente.

O trabalho de Ajeeb, Neto e Baptista (2024) traz comparações de estudos de ACV que analisaram a produção de H₂ via eletrólise, e apresenta resultados que variam de 0,033 a 2,89 kg de CO₂ por quilograma de hidrogênio produzido. Cetinkaya, Dincer e Naterer (2012) apresentam resultados considerando o impacto ambiental dos processos de eletrólise via energia eólica e energia solar, que são respectivamente 0,97 e 2,41 kgCO₂eq/kgH₂.

Ji e Wang (2021) apresenta diversas tecnologias para a produção de hidrogênio a partir de recursos renováveis e não renováveis, levando em conta os impactos ambientais gerados por cada uma delas. Em se tratando do potencial de aquecimento global, os autores trazem informações com relação à eletrólise baseada em biomassa, energia eólica e solar, e os resultados são, respectivamente, 2,70 kgCO₂eq/kgH₂, 1,08 kgCO₂ eq/kgH₂ e 1,82 kgCO₂ eq/kgH₂.

Mehmeti *et al.* (2018) realizou estudos de Avaliação de Ciclo de Vida de diferentes métodos de produção de hidrogênio, incluindo os processos de Eletrólise por célula a membrana de troca de prótons (PEM) e Eletrólise por célula eletrolítica de óxido sólido (SOEC), ambos considerando fontes de energia eólica. Para cada um deles obteve-se os valores de 2,21 kgCO₂eq/kgH₂ e 5,10 kgCO₂eq/kgH₂.

Gerloff (2021) traça cenários considerando a matriz energética da Alemanha e considera um cenário onde a matriz energética é 100% renovável. Os valores obtidos para as tecnologias de eletrólise estão entre 3 e 4 kgCO₂eq/kgH₂. Delpierre *et al.* (2021), Henriksen *et al.* (2024), Zhang *et al.* (2023) e Ghandehariun e Kumar (2016), trazem análises da produção de H₂ por meio da eletrólise via energia eólica, sendo os resultados 0,74 kgCO₂eq/kgH₂, 1,8 a 2,2 kgCO₂eq/kgH₂, 0,094 a 1,49 kgCO₂ eq/kgH₂ e 0,68 ± 0,05 kgCO₂ eq/kgH₂, respectivamente.

Para fins de exemplificação, os estudos consultados para este capítulo, seus respectivos resultados e metodologias, estão consolidados no Quadro 2, apresentado a seguir.

QUADRO 2 - ESTUDOS DE ACV E PRODUÇÃO DE H₂

Autor	Software	Processo/metodologia	Resultado encontrado na ACV (CO₂ eq/kgH₂)
Cho, Strezov e Evans (2022)	Open LCA	Reforma a vapor do gás natural	9,35 a 11,2
Ouana <i>et al.</i> (2024)	SimapPo 9.5	Reforma a vapor do gás natural	17,5
Koroneos (2004)	Não informado	Reforma a vapor do gás natural	10,8

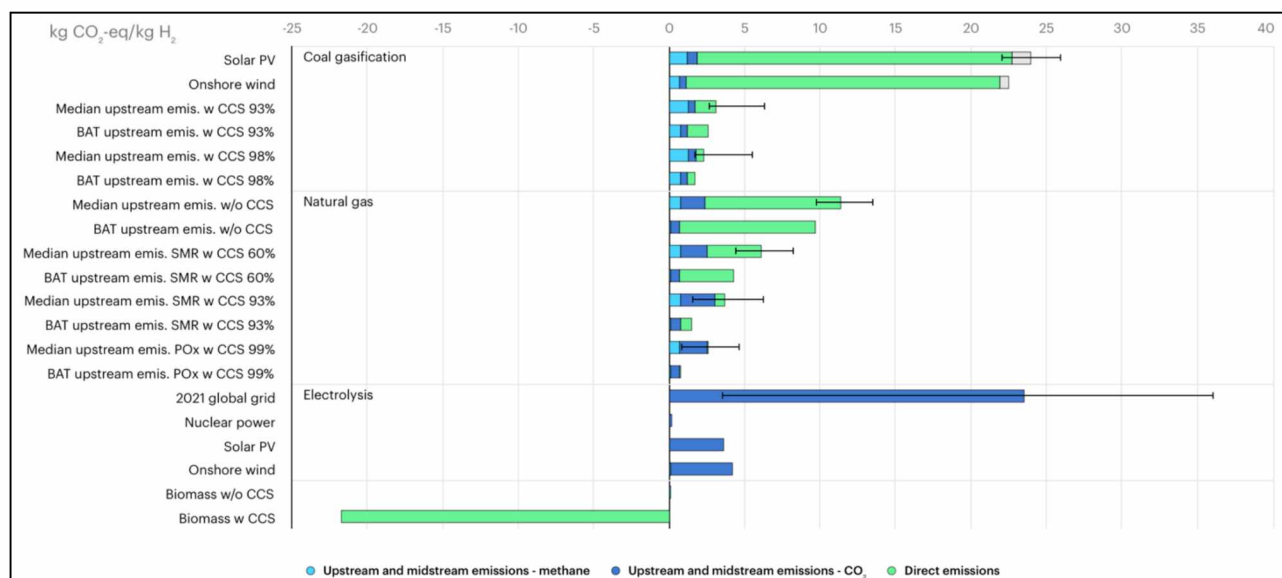
Hajjaji <i>et al.</i> (2016)	ILCD 2011, SimaPro 8	Reforma a vapor do biogás	5,59
Li <i>et al.</i> (2020a)	Gabi	Gaseificação da biomassa	5,39
Salkuyeh <i>et al.</i> (2018)	REET-2015 version 1.3.0.12842	Gaseificação da biomassa	-21,8* e -15.8*
Arfan <i>et al.</i> 2023	SimaPro 9.13	Gaseificação da biomassa	1,54
Nnabuike <i>et al.</i> (2023)	Não informado	Eletrólise via energia eólica	1,08
		Eletrólise via biomassa	2,70
		Eletrólise via energia solar	1,82
Zhang <i>et al.</i> , (2022)	Gabi 5	Eletrólise com sistema com energia fotovoltaica	9,37
		Eletrólise com sistema com energia fototérmica	8,67
Cetinkaya, Dincer, e Naterer (2012)	Não informado	Eletrólise via energia eólica	0,97
		Eletrólise via energia solar	2,41
Ji e Wang (2021)	Não informado	Eletrólise baseada em biomassa	2,70
		Eletrólise via energia eólica	1,08
		Eletrólise via energia solar	1,82
Mehmeti <i>et al.</i> (2018)	SimaPro 8	Eletrólise por célula a membrana de troca de prótons	2,21
		Eletrólise por célula eletrolítica de óxido sólido	5,10
Gerloff (2021)	Umberto	Não especifica	3 e 4
Delpierre <i>et al.</i> (2021)	OpenLCA	Eletrólise via energia eólica	0,74
Henriksen <i>et al.</i> (2024)	OpenLCA	Eletrólise via energia eólica	1,8 a 2,2
		Eletrólise via energia solar	2,8 a 2,9
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Não informado	Eletrólise via energia eólica	0,094 a 1,49
Ghandehariun e Kumar (2016)	Não informado	Eletrólise via energia eólica	0,68 ± 0,05

*Os valores apresentados por Salkuyeh *et al.* (2018) consideraram um sistema com captura de CO₂, o que permitiu que os resultados atingissem um valor negativo em emissões.

FONTE: A autora (2025).

Ainda contemplando as emissões de GEE das rotas de produção de hidrogênio, o Gráfico 2, elaborado pela International Energy Agency (IEA), apresenta uma comparação da intensidade de emissões entre rotas de produção de hidrogênio. São contempladas distintas tecnologias, como a gaseificação do carvão, o uso de gás natural (incluindo a reforma a vapor), a eletrólise da água e rotas baseadas em biomassa. Em alguns casos, o gráfico também diferencia os cenários com e sem a aplicação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, possibilitando uma avaliação mais detalhada do potencial de redução de emissões associado a cada rota.

GRÁFICO 2 - COMPARAÇÃO DA INTENSIDADE DE EMISSÕES DE DIFERENTES ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO



Nota: BAT = melhor tecnologia disponível; CCS = captura e armazenamento de carbono; SMR = reforma a vapor do metano; POx = oxidação parcial;

FONTE: IEA (2021).

Como se observa no Gráfico 2, há uma ampla variação na intensidade de emissões de CO₂ equivalente por quilograma de hidrogênio produzido, a depender da rota tecnológica adotada. As emissões mais elevadas estão associadas à gaseificação do carvão sem captura de carbono, com valores que podem ultrapassar os 25 kgCO₂eq/kgH₂. No entanto, quando se aplicam tecnologias de captura e armazenamento de carbono, observa-se uma redução significativa nas emissões. Nesse cenário, a gaseificação do carvão com captura em alta eficiência pode apresentar valores de emissão inferiores aos de rotas baseadas em gás natural com captura parcial ou ausente,

No caso do gás natural, a reforma a vapor apresenta um perfil de emissões intermediário, sendo possível reduzir consideravelmente esse impacto com a incorporação de captura de carbono. Já as rotas baseadas em eletrólise apresentam emissões diretas nulas, com a intensidade final dependendo fortemente da fonte elétrica utilizada: enquanto a eletrólise baseada na média da matriz elétrica global de 2021 ainda gera emissões relevantes, aquelas que utilizam energia eólica ou solar mostram desempenho ambiental significativamente melhor.

Destacam-se, especialmente, as rotas baseadas em biomassa, que demonstram elevado potencial de sustentabilidade. Quando associadas à captura e armazenamento de carbono, essas rotas podem resultar em emissões negativas, combinando o caráter renovável da biomassa com a remoção efetiva de CO₂ da atmosfera. Essa característica torna a conversão de biomassa em hidrogênio uma das opções mais promissoras para a produção de H₂ de baixo carbono, contribuindo não apenas para a mitigação, mas também para a remoção líquida de emissões no setor.

As evidências discutidas até aqui demonstram que a escolha da rota tecnológica para a produção de hidrogênio influencia de forma decisiva a intensidade das emissões de gases de efeito estufa, bem como outros impactos ambientais relevantes, como o consumo de água. Nesse cenário, a reforma a seco do metano desponta como uma alternativa particularmente promissora. Ao contrário de outras rotas, a reforma a seco não consome água durante sua operação, o que representa uma vantagem importante em regiões com escassez hídrica, realidade comum em diversas áreas do Brasil e do mundo.

Além disso, essa tecnologia se destaca por seu potencial de apresentar emissões líquidas de CO₂ bastante reduzidas. Em configurações que incorporam a captura e armazenamento de carbono, a reforma a seco pode, inclusive, alcançar emissões negativas. Esses atributos indicam o potencial da reforma a seco para se consolidar como uma rota promissora na produção de hidrogênio de baixo carbono.

Diante desse panorama, este trabalho adota a Análise do Ciclo de Vida como abordagem metodológica para quantificar, de forma abrangente, os impactos ambientais associados à produção de hidrogênio via reforma a seco do biogás. A aplicação da ACV permitirá uma avaliação integrada e comparativa dos impactos, contribuindo para preencher lacunas de conhecimento e subsidiar decisões mais informadas e sustentáveis no avanço das tecnologias de hidrogênio no Brasil. A seguir, serão apresentadas as etapas metodológicas adotadas nesta pesquisa, bem como os principais resultados obtidos.

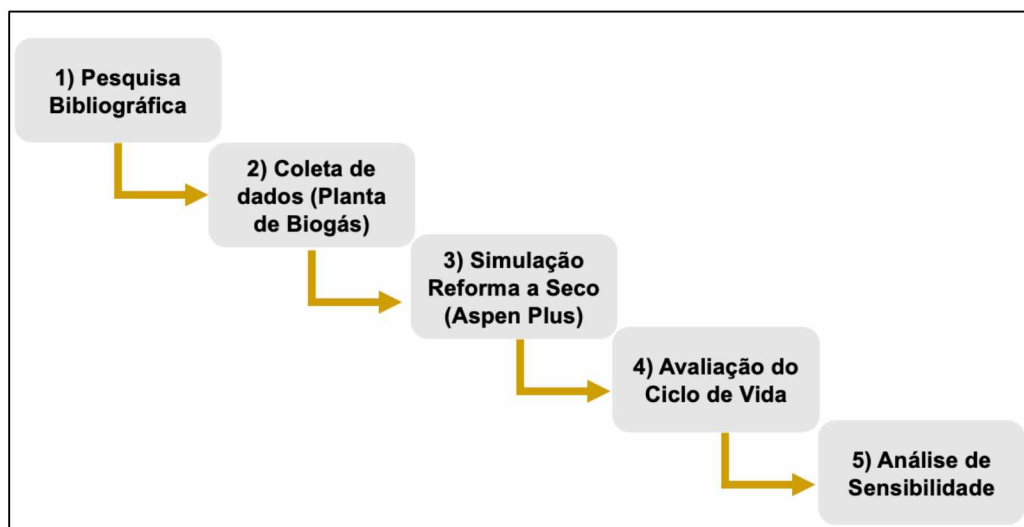
3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho compreendeu os seguintes estágios:

- 1) Pesquisa bibliográfica, a fim de possibilitar um maior entendimento sobre a rota de produção de biogás, e o processo de reforma a seco para a obtenção do hidrogênio. Além disso, foi realizado levantamento de dados disponíveis em literatura específica da área e dos trabalhos focados em reforma a seco do biogás, realizados no Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (LABMATER) da UFPR;
- 2) Coleta de dados de uma planta de biogás;
- 3) Simulação do processo da reforma a seco, considerando os dados coletados da produção de biogás;
- 4) Implementação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, conforme proposto pela ABNT NBR SO 14.040/2009 e 14044/2009, apresentada anteriormente, considerando os dados de bibliografia, e os dados das etapas 2 e 3;
- 5) Análise de sensibilidade, realizada após os resultados obtidos pela metodologia de ACV. Esse estágio teve com objetivo analisar como os parâmetros utilizados no estudo influenciam os resultados finais.

A Figura 7 contempla as etapas percorridas na metodologia do presente trabalho.

FIGURA 7 - ETAPAS DA METODOLOGIA



FONTE: A autora (2024).

A pesquisa e o referencial teórico foram desenvolvidos a partir de uma extensa revisão de literatura, envolvendo consultas em bibliotecas especializadas de instituições acadêmicas e empresas atuantes na área.

As etapas 2 e 3, de coleta de dados da planta de biogás e a simulação da reforma a seco, serão apresentadas no próximo item, com mais detalhes.

Para a avaliação do ciclo de vida, foram considerados diversos aspectos, incluindo as rotas de produção analisadas, as unidades funcionais, as fronteiras das rotas, as categorias de impacto selecionadas, a avaliação dos impactos e a interpretação subsequente dos resultados. Também foram considerados os pressupostos estabelecidos, as limitações do estudo, a análise da qualidade dos dados e a revisão crítica do estudo.

O estudo de Avaliação de Ciclo de Vida foi conduzido em quatro etapas distintas, conforme apresentado no item 2.8, da fundamentação teórica, deste trabalho. A primeira envolveu a definição do objetivo e escopo da análise. Em seguida, foram identificadas e quantificadas as variáveis no inventário do ciclo de vida. A terceira etapa irá abordar a avaliação dos impactos associados ao ciclo de vida em estudo. Por fim, a última etapa consistiu na interpretação dos resultados obtidos nas etapas anteriores, onde também foi prevista a etapa de análise de sensibilidade. Para a realização dos cálculos de estimativas relacionadas a ACV foi utilizado o software SimaPro 9.4.0.3, cuja licença foi disponibilizada pelo Laboratório de Gestão de Resíduos e Tecnologias Sustentáveis (LABGERTS) da UFPR/Setor Jandaia do Sul.

O SimaPro é um software amplamente utilizado para a realização de estudos de ACV. Ele oferece uma coleção extensa de inventários de ciclo de vida e metodologias de avaliação de impactos ambientais, possibilitando a construção de modelos de ciclo de vida diversos e apoiando a tomada de decisões informadas. Através da utilização do software é possível uma análise detalhada dos aspectos e impactos ambientais associados a processos de produção de produtos ou serviços.

O cenário do estudo se baseia no processo de produção de hidrogênio, proveniente da biomassa. Para isso, a definição dos limites desse sistema contou tanto com a fase de produção de biogás proveniente de biomassa, quanto a fase de produção do hidrogênio.

Em se tratando da fase de produção de biogás, optou-se por utilizar os dados de uma planta instalada na Região Oeste do Estado do Paraná, a fim de realizar um estudo com dados os mais próximos da realidade e de uma escala de produção real. Para a fase de produção de hidrogênio, foram considerados como premissa os trabalhos e estudos desenvolvidos pelo LABMATER, optando-se pela rota da reforma a seco do biogás, com o objetivo de aprofundar os estudos nessa temática, dada a sua relevância e as potenciais vantagens ambientais associadas. Como não foi identificada nenhuma planta instalada na região que produza, em larga escala, desde o biogás proveniente de biomassa, até a geração de hidrogênio, por meio da reforma a seco do biogás, o cenário foi estabelecido em duas fases: Produção de biogás pela planta; e produção do hidrogênio, por meio da reforma a seco. Para a obtenção de dados da segunda fase, já que não houve consideração de uma planta real para tal fim, foi realizado uma simulação no software Aspen Plus V12.1, realizada pelo Laboratório de Catálise e Termodinâmica Aplicada (LACTA) da UFPR. O Aspen Plus é um programa de simulação utilizado para modelar e otimizar processos químicos, realizando balanços de massa e energia com base em modelos termodinâmicos e cinéticos.

Desse modo, o ciclo de vida a ser considerado neste trabalho consiste desde a inserção dos resíduos orgânicos na planta em operação, a produção do biogás, a reforma a seco produzindo o gás de síntese (syngás), e a purificação desse último, dando origem ao gás hidrogênio. O cenário analisado, bem como o processo simulado estão apresentados em detalhes a seguir.

3.1 CENÁRIO ANALISADO

O cenário analisado nesse estudo compreendeu desde a produção de biogás, obtido a partir de biomassa, até a geração de hidrogênio por meio da reforma a seco. Para compor o processo químico da produção de hidrogênio, foi realizada uma modelagem no software Aspen Plus, uma vez que não se encontram disponíveis dados consolidados de uma planta em operação, que contemplem todas as etapas do processo em estudo, tanto no Estado do Paraná quanto no restante do país. Por esse motivo, a simulação permitiu criar uma representação detalhada do sistema, suprimindo a lacuna de dados concretos disponíveis no contexto deste estudo.

Para a composição do cenário completo do estudo dessa avaliação de ciclo de vida, o primeiro estágio é a produção do biogás, proveniente de biomassa, e o segundo é o processo de reforma a seco do biogás, que dá origem ao gás hidrogênio. Para exemplificação e explicação das origens dos dados, os títulos a seguir foram divididos da mesma forma.

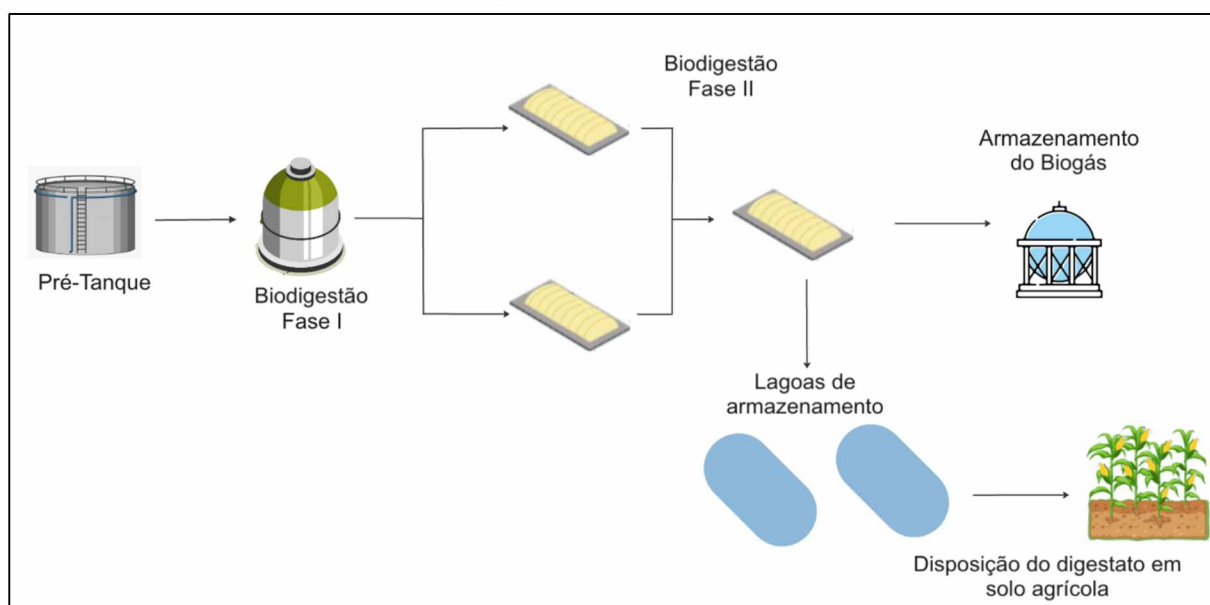
3.1.1 Processo de Produção de Biogás

Para este estágio, foram utilizados dados de uma central de bioenergia em operação localizada no Estado do Paraná. Para preservar a integridade e a confidencialidade das informações, os detalhes específicos sobre a planta não serão divulgados. Entretanto, garante-se que os dados utilizados são precisos e pertinentes para alcançar os objetivos deste estudo. A central de bioenergia, utilizada como base para este estudo, abrange processos que vão desde a produção de biogás até sua utilização para geração de energia elétrica. No entanto, para os propósitos deste trabalho, o foco será restrito aos dados relacionados ao recebimento do substrato e à produção de biogás. Essa delimitação se justifica pelo objetivo específico de analisar a produção de gás hidrogênio obtido por meio da reforma a seco, etapa que não é realizada pela planta em questão.

A central de bioenergia opera utilizando dejetos suínos e carcaças de animais como substrato principal. O processo de produção de biogás é estruturado com componentes dedicados à alimentação de substratos líquidos e sólidos, integrando um sistema de biodigestão em dois estágios, além de lagoas para o armazenamento do digestato resultante.

A etapa de alimentação de substratos é realizada em um tanque de estabilização. Este tanque é hermético, escavado no solo, e possui capacidade de volume de 700 m³. Sua função é equalizar as vazões de alimentação, controlar a qualidade dos substratos e atuar como reservatório para os processos de codigestão. Em seguida, na segunda etapa do processo, o sistema de biodigestão em dois estágios entra em operação. O estágio I conta com um reator tipo CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor), de mistura completa, com volume de 3.500 m³. Já o estágio II conta com três reatores, totalizando um volume de 12.000 m³. O tempo de retenção do processo todo é de 30 dias e a carga orgânica volumétrica total é mantida abaixo de 1,5 kgSV.m³/d, considerando possíveis ampliações para tratar outros resíduos recebidos. Após os biodigestores, o biogás é coletado, e o digestato resultante do processo é armazenado em 2 lagoas com volume de 35.800 m³ e tem sua disposição final em solo agrícola dos produtores parceiros do projeto e vizinhos à planta. A FIGURA 8 demonstra o sistema descrito da planta de produção de biogás.

FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DA PLANTA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS



Fonte: A autora (2024).

Conforme mencionado, para o estudo em questão serão utilizados apenas os dados da planta referente à etapa de produção do biogás. Por esse motivo, foram considerados para o inventário da pesquisa a quantidade de biomassa que chega na

planta, a vazão e composição do biogás gerado. Esses últimos dados foram utilizados na modelagem do processo químico, explicado a seguir.

3.1.2 Processo de Produção do Gás Hidrogênio

Para a configuração da modelagem do cenário de produção do gás hidrogênio, por meio da reforma a seco do biogás, no software Aspen Plus, foram considerados os dados do biogás gerado da central de bioenergia, apresentada anteriormente, localizada no Estado do Paraná.

Para a concretização do cenário, com a produção de hidrogênio, foi necessário realizar a modelagem dessa segunda fase em software, já que não se teve acesso a uma planta real para esse processo. Sendo assim, para os dados de entrada da modelagem, foram utilizados os dados de composição e vazão do biogás medidos na planta, para que a simulação fosse feita considerando dados reais de produção do biogás. Esses valores foram inseridos no software como condições iniciais para a simulação. A simulação do processo de produção de gás hidrogênio por meio da reforma a seco do biogás foi realizada no software Aspen Plus, permitindo a modelagem detalhada das etapas envolvidas, desde a conversão do biogás até a obtenção de gás de síntese (syngas), sua purificação, e a produção do gás hidrogênio.

Na Figura 9 está representado o esquema do processo todo simulado no software Aspen Plus. A representação contempla as etapas da reforma a seco do biogás e o processo de purificação do syngás, até a geração do gás hidrogênio. A simulação inicia com a entrada do biogás no processo (vazão de 6.500 m³/dia), que passa pelo sistema de dois compressores (1 e 3), para aumento de pressão do biogás, e por dois trocadores de calor (2 e 4) para redução da temperatura, garantindo que o biogás não ultrapasse a temperatura de 170°C e pressão de 12 bar ao chegar na (6) coluna absorvedora. Neste momento, ocorre a absorção de componentes indesejados presentes na corrente de gás, utilizando um líquido – neste caso, água, pressurizada pela bomba (5). O componente indesejado removido é o H₂S, que é transportado pela corrente de água até a Coluna Striping (13), onde a água passa por um processo de lavagem com ar. Como subprodutos, obtêm-se a água (15), que será reinserida no sistema, e o ar (14), contendo as impurezas removidas.

Legenda:

CP - Compressor	ABSOR - Coluna absorvedora
TC - Trocadores de calor	STRIP - Coluna stripping
B - Bomba	PBR - Reator
V - Válvula	PSA - Separador

Fonte: A autora (2024).

3.2 METODOLOGIA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

3.2.1 Definição de objetivos e escopo

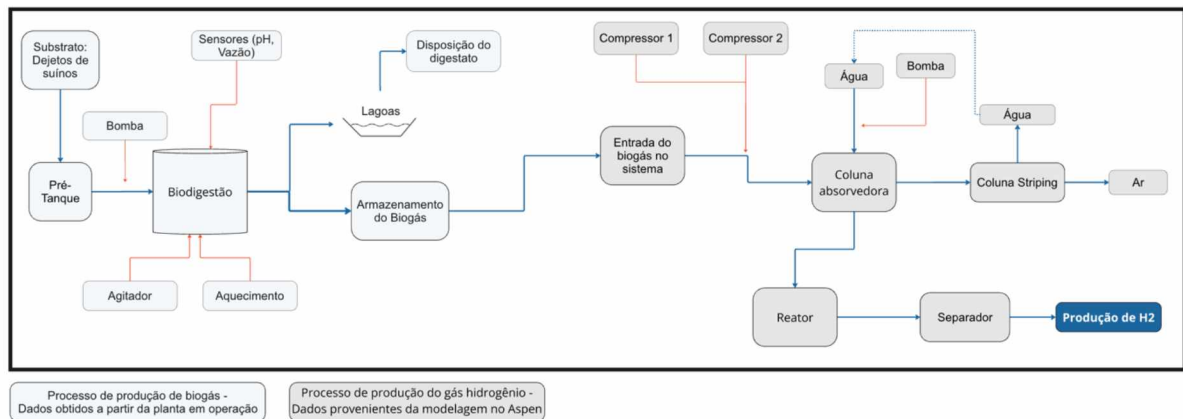
A primeira fase do processo de Análise do Ciclo de Vida consiste na definição do objetivo e escopo do produto, o processo ou da atividade a ser considerada. O estudo analisando o processo de produção de biogás, proveniente de biomassa, e processo de produção de gás hidrogênio, por meio da reforma a seco do biogás, foi desenvolvido com o suporte do *software* SimaPro 9.4.0.3 (Laboratório de Gestão de Resíduos e Tecnologias Sustentáveis – LABGERTS/UFPR Jandaia do Sul), alinhado com as orientações previstas na ABNT NBR ISO 14.040/2009 e 14.044/2009. O intuito do trabalho foi possibilitar a avaliação dos impactos causados pela produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono, que tem como insumo a biomassa. Para esse fim, a unidade funcional escolhida foi de 1kg de Hidrogênio, baseando-se em pesquisas semelhantes já realizadas no tema, e tendo em vista os objetivos deste trabalho.

A abordagem definida do escopo do estudo se assemelha a abordagem de *cradle-to-gate* (do berço ao portão), uma vez que as fronteiras do sistema consideram a geração da matéria-prima do biogás (os dejetos suínos), mas não consideram todo o processo de uso do gás hidrogênio e sua disposição final.

Ressalta-se que não foi definido um período específico para a coleta de dados da planta de geração de biogás, uma vez que ela já está em operação há tempo suficiente para que os dados disponíveis reflitam de maneira representativa o desempenho da planta. Por isso, foram consideradas as médias diárias de operação já registradas ao longo desse período.

A FIGURA 10 representa todos os componentes, as etapas e a fronteira do sistema a ser analisado. O cenário foi construído tendo como base a planta piloto de produção de biogás, e o processo de reforma a seco para a produção do gás hidrogênio, conforme mencionado nos itens 3.1.1 e 3.1.2.

FIGURA 10 - FRONTEIRAS DO SISTEMA PARA O CENÁRIO ANALISADO



FONTE: A autora (2024).

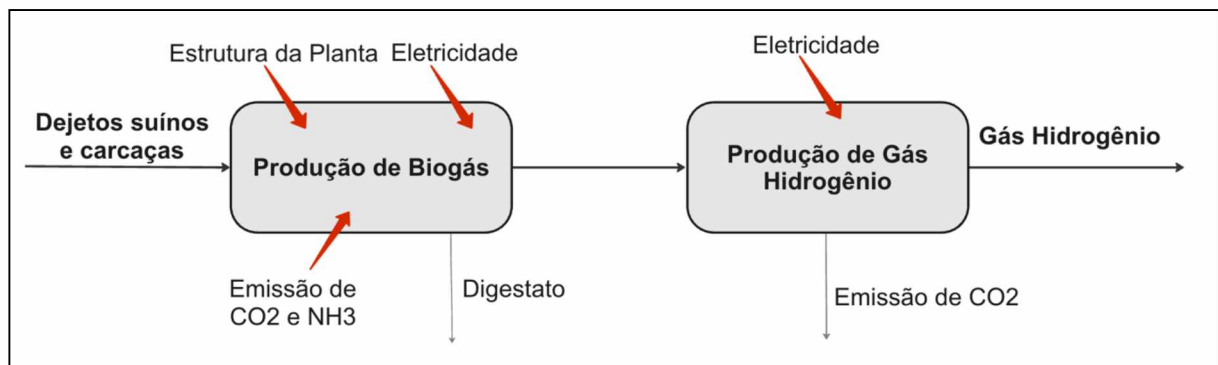
3.2.2 Inventário do Ciclo de Vida

A construção do inventário do presente estudo compreendeu o levantamento, a compilação e a quantificação das entradas e saídas do sistema analisado, incluindo energia, recursos naturais e emissões, conforme retratado na FIGURA 10. Essa etapa, essencial na análise do ciclo de vida, organiza as intervenções ambientais causadas por cada processo do sistema, agrupando-as por tipo e resultando em uma lista consolidada de todas as intervenções associadas à função do produto.

A construção deste inventário se deu tanto pela adoção de dados primários quanto dados secundários. Ou seja, conforme já mencionado, foram considerados dados obtidos diretamente da planta em operação de produção de biogás, e do processo de simulação realizado no Software Aspen Plus, para a produção de Hidrogênio. Adicionalmente, foram empregados dados bibliográficos e a base de dados Ecoinvent 3.6 para a obtenção de dados secundários. A base de dados Ecoinvent é um recurso disponível no software SimaPro e oferece uma extensa biblioteca de inventários, que detalha as cargas ambientais, incluindo entradas e saídas de materiais, substâncias e energia, associadas ao ciclo de vida de uma vasta gama de produtos, processos, sistemas de energia, transporte, disposição de resíduos, entre outros.

Os inventários utilizados no estudo contemplaram todas as etapas que estão englobadas no sistema da FIGURA 10. Para fins de exemplificação com relação à utilização do software SimaPro, criou-se a FIGURA 11, onde estão elucidados os fluxos adotados para o estudo, bem como as entradas e saídas do sistema.

FIGURA 11 - FLUXOS DOS PROCESSOS DA ACV



FONTE: A autora (2024).

No primeiro fluxo, de produção de biogás, os dados primários correspondem ao consumo de energia demandado pela produção do gás, a entrada de material orgânico na planta, a quantidade de biogás gerada, a quantidade de digestato que retorna para o solo, e a área ocupada da planta.

Para o item de Estrutura da Planta, foram amplificados os dados disponíveis na base de dados Ecoinvent, os quais faziam referência a um digestor de 500m³. O escalonamento foi feito com base no estudo de Azapagic e Whiting (2014), por meio da seguinte fórmula:

$$E2 = E1 \times \left(\frac{C2}{C1}\right)^{0,6}$$

Onde,

E2 = impacto Ambiental da planta maior

E1 = impacto ambiental da planta menor

C2 = capacidade da planta maior

C1 = capacidade da planta menor

0,6 = fator de escala

Portanto os dados de impacto da planta menor, foram considerados aqueles presentes na base de dados, e o dado de capacidade da planta menor foi considerado o volume do biodigestor, de 500m³. Já a capacidade para a planta maior, foi

considerada a capacidade dos biodigestores, sendo 12.000m³, conforme apresentado anteriormente.

Com relação os fatores de emissão de GEE, foram adotados os valores estimados por Hajjaji *et al.* (2016). Foi considerada a emissão quanto ao armazenamento do material orgânico, após a digestão, realizado em lagoas, que emite amônia. Para as emissões de amônia, foi considerado 0,115 kg/t de matéria-prima (Hajjaji *et al.*, 2016), e em se tratando das emissões de CO₂, foi adotado o mesmo valor, 90,42 g/kgH₂, utilizado por Hajjaji *et al.* (2016). Todos os valores passaram por adequações para a inserção no inventário, tendo em vista os valores adotados para a unidade funcional em cada processo.

No segundo fluxo do processo, de produção de gás hidrogênio foram adotados os valores obtidos pela simulação executada no Software Aspen Plus. Os insumos energéticos, de ambos os fluxos foram de dados primários fazendo o uso da biblioteca da base de dados para a seleção da fonte/natureza/região da energia.

As Tabelas 11 e 12 Apresentam todos os valores assumidos para cada parâmetro.

TABELA 11 - DADOS DO INVENTÁRIO DO FLUXO DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Processo	Valor	Unidade
Entradas no sistema		
<u>Operação da Planta de Biogás</u>		
Substrato (dejetos)	0,038	kg
Substrato (carcaça)	0,446	t
Elettricidade	0,16	kWh
<u>Construção</u>		
Concreto	7,81E-06	m ³
Cobre	7,09E-04	kg
Polietileno	2,27E-04	m ³
Poliestireno	4,82E-04	kg
Cloreto de polivinilideno	1,62E-03	kg
Aço de reforço	9,36E-04	kg
Aço	3,06E-02	kg
Borracha sintética	3,69E-03	kg
Área de construção	3,40E-03	m ²
Saídas		
Biogás	1	m ³

Digestato	0,48	T
CO ₂	12,59	g
NH ₃	0,0548	g

TABELA 12 - DADOS DO INVENTÁRIO DO FLUXO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

Processo	Valor	Unidade
Entradas no sistema		
<u>Produção de Hidrogênio</u>		
Biogás	33,85	m ³
Elettricidade	3,89	kWh
Saídas		
CO ₂	6,56	kg
H ₂	1	kg

FONTE: A autora (2024).

3.2.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A primeira parte da fase de avaliação envolve a seleção dos critérios e padrões que serão utilizados para analisar os efeitos das atividades humanas. De modo geral, a cadeia causal entre a intervenção ambiental e o efeito final é usada como base para realizar a avaliação de impacto (TUKKER, 2000). Essa etapa tem como objetivo garantir que o processo de tomada de decisão, em relação a atividades que possam ter uma influência significativa no meio ambiente, leve em consideração os aspectos ambientais.

Para o presente trabalho foram selecionados a aplicação de dois métodos de AICV, sendo eles CML e ReCiPe (H). A escolha foi feita com base na revisão de estudos sobre o tema, onde a escolha de pelo menos um desses métodos foi predominante. Além disso, foi considerada a análise de Barros *et al.* (2020), que revisou 47 estudos e identificou uma predominância dos métodos ReCiPe, CML e IPCC.

Segundo Schramm (2020), a metodologia ReCiPe combina abordagens de *midpoint* e *endpoint*, cobrindo não apenas categorias de impacto nas etapas iniciais

da cadeia causa-efeito, mas também abordando o dano final que pode resultar desses impactos. O ReCiPe possui três versões diferentes para as abordagens de *midpoint* e *endpoint* — Hierarquista (H), Individualista (I) e Igualitária (E) — que levam em conta três perspectivas culturais distintas. A Perspectiva Hierarquista (H) do método ReCiPe baseia-se em princípios de política e regulamentação amplamente aceitos, focando em normas e diretrizes estabelecidas para equilibrar as necessidades da sociedade com limites ambientais. Adota-se um horizonte de tempo médio, como 100 anos para o potencial de aquecimento global, refletindo uma abordagem mais institucional e conservadora na gestão de riscos (GOEDKOOPE *et al.*, 2008). De maneira adicional, o método CML é um método focado em midpoint, que divide as categorias de impacto em duas classes: básicas (obrigatórias) e opcionais. Apesar de ter sido criado para a região europeia, sua aplicação é global, exceto para as categorias de impacto relacionadas à acidificação e formação de foto-oxidação (MENDES, BUENO, OMETTO, 2016). O Quadro 4 resume as categorias de impactos que serão analisados em cada um dos métodos que serão aplicados no estudo.

QUADRO 3 - MÉTODOS DE AICV E CATEGORIAS DE IMPACTO

Método AICV	Categorias de Impacto (midpoint)	Categorias de Impacto (endpoint)
ReCiPe	• Depleção de ozônio estratosférico • Toxicidade humana não carcinogênica • Toxicidade humana carcinogênica • Acidificação terrestre • Aquecimento global (GWP100) • Eutrofização de água doce • Eutrofização marinha • Ecotoxicidade de água doce • Ecotoxicidade terrestre • Ecotoxicidade marinha • Formação de ozônio • Formação de material particulado fino • Consumo de água • Radiação Ionizante • Uso do Solo (Land Use) • Escassez de Recursos Fósseis • Escassez de Recursos Minerais e Metálicos	Danos à saúde humana, danos à diversidade dos ecossistemas, e danos à disponibilidade de recursos.

CML	• Depleção de recursos abióticos • Acidificação • Eutrofização • Ecotoxicidade em ambientes aquáticos de água doce • Potencial de aquecimento global • Toxicidade humana • Ecotoxicidade em ambientes aquáticos marinhos • Depleção da camada de ozônio • Oxidação fotoquímica • Ecotoxicidade terrestre	-
-----	---	---

FONTE: Adaptado de Piekarski *et al.*, (2012) e Schram (2020).

3.2.4 Interpretação

Conforme mencionado previamente, foram obtidos resultados para o mesmo processo de obtenção do gás hidrogênio por meio dos dois métodos de AICV. Para uma melhor interpretação dos dados, no primeiro momento foram analisados os dados normalizados dos resultados. Ou seja, como os resultados de cada categoria de impacto dispõem de uma unidade específica coerente com a representação do seu impacto, todos os resultados são normalizados uma mesma unidade. Isso torna os resultados mais compreensíveis e facilita a comparação entre diferentes categorias de impacto, que normalmente apresentam unidades e escalas distintas. Além disso, tendo em vista o objetivo do trabalho, também foi realizada uma análise detalhada das categorias de impacto referente às emissões de CO_{2eq} do processo. Essa análise buscou identificar pontos críticos no processo e fornecer recomendações que possam otimizar a eficiência e a sustentabilidade da rota analisada.

3.2.4.1 Categorias de Impacto

Baseando-se nos resultados normalizados obtidos por meio da implementação dos métodos de AICV, algumas das categorias foram selecionadas para serem analisadas com maiores detalhes. Essa seleção foi feita, inicialmente, com base na identificação das categorias que apresentaram os resultados normalizados mais altos na avaliação de impacto. No entanto, considerando que o objetivo da fase

de interpretação deste estudo também é possibilitar a comparação entre as metodologias aplicadas, foi utilizado como critério adicional a seleção de categorias comuns entre ambos os métodos. Sendo assim, as categorias selecionadas para uma avaliação mais detalhada estão apresentadas no Quadro 5, a seguir:

QUADRO 4 - CATEGORIAS DE IMPACTO PARA INTERPRETAÇÃO

Categoria de Impacto (unidade)	Título no Recipe	Título no CML
Potencial de Aquecimento Global (CO _{2eq})	Global Warming	Global Warming (GWP 100)
Ecotoxicidade Marinha (1,4 -DBeq)	Marine Ecotoxicity	Marine Aquatic Ecotoxicity
Ecotoxicidade de água doce (kg 1,4 -DBeq)	Fresh Water Ecotoxicity	Fresh Water Aquatic Ecotoxicity
Toxicidade Humana (kg 1,4 -DBeq)	Human Ecotoxicity	Human Ecotoxicity

FONTE: A autora (2024).

Na etapa final da fase de interpretação, foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar a influência da metodologia aplicada e de alguns parâmetros pré-selecionados. Essa análise comparou os resultados obtidos, destacando as variações entre os processos conforme os métodos utilizados.

3.2.4.2 Análise de Sensibilidade

A etapa de verificação da sensibilidade foi realizada após a obtenção dos resultados a AICV. O intuito da implementação dessa etapa é analisar quanta influência alguns dados performam nos resultados finais do estudo. De acordo com Reaño (2020), a análise de sensibilidade é essencial para identificar os fluxos e parâmetros que necessitam de melhorias no processo, uma vez que alterações nos parâmetros do processo podem revelar as mudanças necessárias na tecnologia.

Para a realização dessa etapa no presente estudo, primeiramente, foram identificados os fluxos que mais contribuíam para os resultados finais do estudo, e, ao mesmo tempo, analisados os autores mencionados no item 2.8, os quais desempenharam estudos de natureza semelhante ao do presente trabalho. Para essa etapa também foi considerado o objetivo deste trabalho, que visa quantificar as emissões de CO_{2eq} no ciclo de vida de produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono. Por esses motivos, a escolha de alteração dos parâmetros foram as seguintes:

- Vazão de biogás para a produção de hidrogênio;
- Infraestrutura da planta de produção de biogás.

As proposições de ajustes de valores, para essa etapa de análise de sensibilidade foram feitas baseando-se em estudos semelhantes ao deste trabalho. Conforme resultados obtidos, optou-se por alterar a eficiência do processo da reforma do biogás. Ou seja, diminuir a quantidade de biogás necessário para a produção de H_2 . Por esse motivo, foi sugerido a alteração nesse parâmetro para a análise de sensibilidade, embasado no valor utilizado por Hajjaji *et al.* (2016), a fim de compreender qual o impacto desse parâmetro nos resultados finais do estudo.

Outro parâmetro incorporado na análise de sensibilidade foi a dimensão física da planta de produção de biogás. Como os resultados obtidos no software SimaPro indicaram que os impactos associados ao processo de digestão anaeróbica têm peso significativo nos resultados finais, optou-se por testar alterações no porte da infraestrutura da planta, como, por exemplo, o tamanho dos tanques de digestão, com o objetivo de avaliar o quanto esse aspecto influencia os impactos ambientais do sistema. A inclusão desse parâmetro busca justamente explorar em que medida a infraestrutura física da planta contribui para os impactos totais do ciclo de vida. Ressalta-se que, neste caso, a produção de biogás foi mantida constante, ainda que, na prática, alterações físicas na planta possam afetar sua eficiência operacional. Na análise de Hajjaji *et al.* (2016), os impactos relacionados à infraestrutura da planta de biogás foram calculados com base em um biodigestor com volume de 800 m³. Para fins de comparação e alinhamento com a literatura, esse valor foi adotado na análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade se deu, portanto, considerando as alterações apresentadas na TABELA 13, E considerando os dois métodos de AICV já mencionados neste trabalho.

TABELA 13 – PARÂMETROS ESTUDADOS PARA A ANÁLISE SE SENSIBILIDADE

Parâmetro	Cenário Base (CB)	Análise de sensibilidade (AS)
Vazão de biogás para a produção de hidrogênio	12,31 m ³ para a produção de 1kg de Hidrogênio	7,18 m ³
Infraestrutura da planta de produção de biogás	Proporção para 12.000m ³	Proporção para 800m ³

FONTE: A autora (2024).

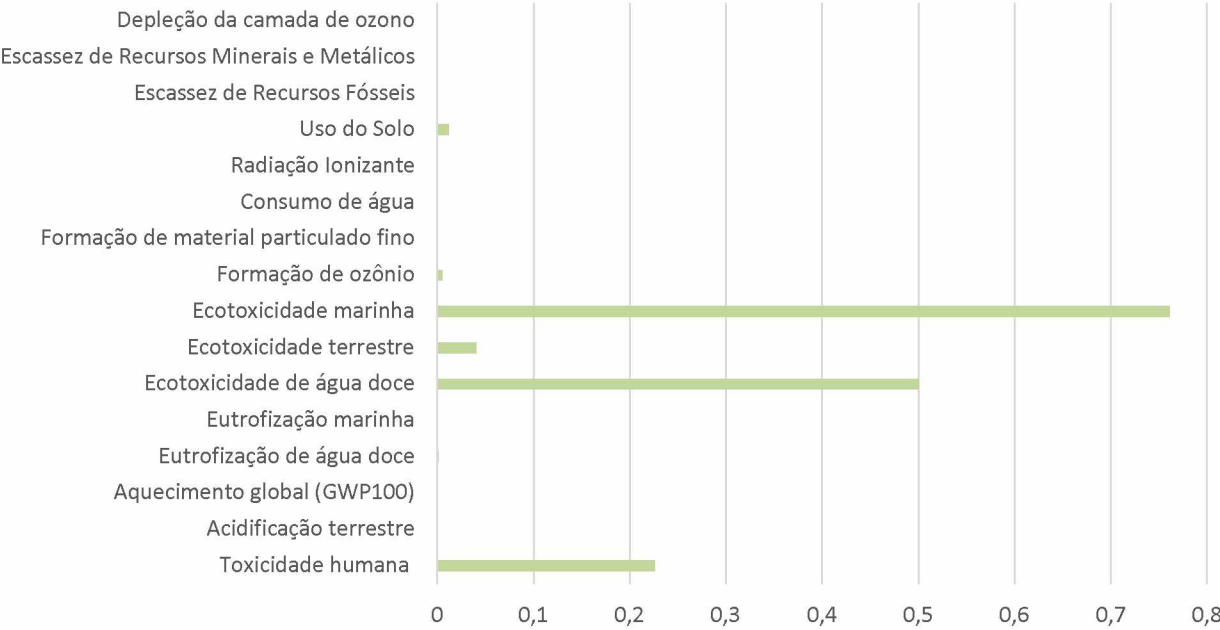
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados da avaliação, abrangendo tanto uma visão geral quanto uma análise detalhada das categorias de impacto selecionadas. São explorados os dados normalizados e os principais aspectos que influenciam os resultados, destacando as contribuições mais relevantes. O capítulo se encerra com a análise de sensibilidade, que examina os efeitos dos métodos aplicados e das alterações nos parâmetros sobre os resultados obtidos.

4.1 RESULTADOS NORMALIZADOS

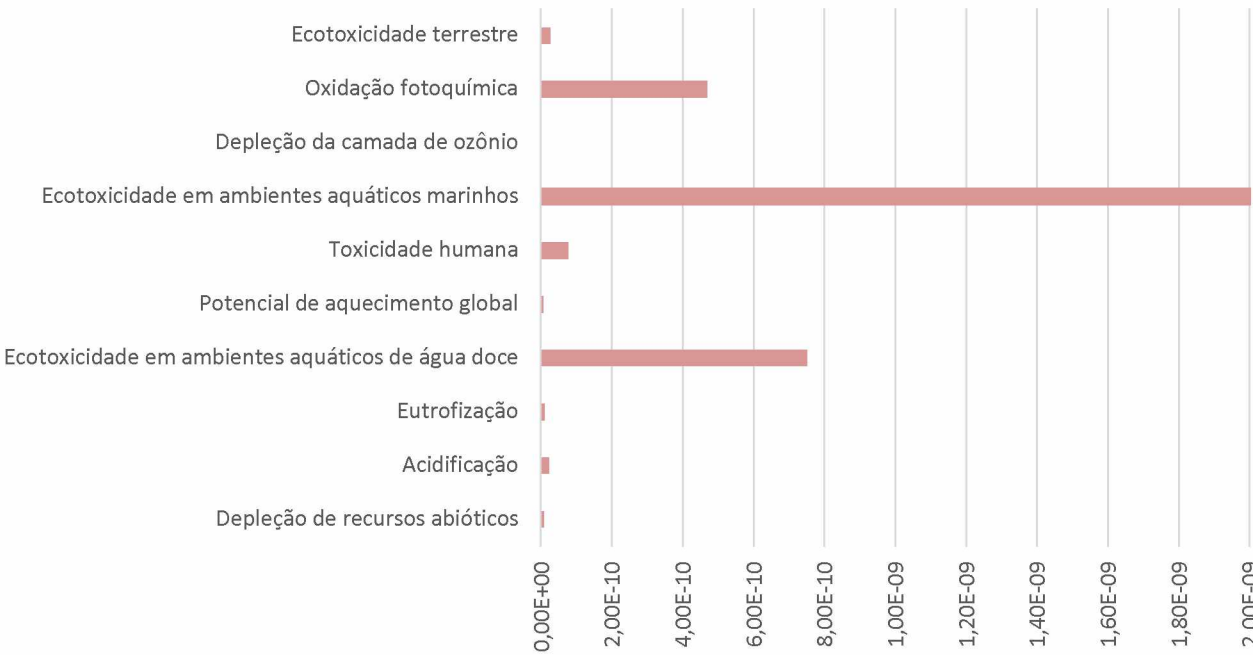
Os resultados normalizados do processo de obtenção do gás hidrogênio, por meio da reforma a seco do biogás estão apresentados nos gráficos a seguir. Os resultados, obtidos através da metodologia de Análise do Ciclo de Vida, utilizando o Software SimaPro, estão separados de acordo com os dois métodos escolhidos para o cálculo dos impactos. O GRÁFICO 3 reúne os resultados das categorias de impacto relacionadas ao método Recipe (H), e o GRÁFICO 4 reúne os resultados referentes às categorias de impacto do método CML.

GRÁFICO 3 - RESULTADOS NORMALIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H₂ DE ACORDO COM O MÉTODO RECIPE (H)



FONTE: A autora (2025).

GRÁFICO 4 - RESULTADOS NORMALIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H₂ DE ACORDO COM O MÉTODO CML



FONTE: A autora (2025).

Apesar das diferenças significativas nas magnitudes dos resultados normalizados entre os dois métodos, onde os valores absolutos de cada categoria variam consideravelmente de um método para outro, é possível observar uma convergência nas categorias de impacto mais relevantes em ambos os métodos: Ecotoxicidade Marinha; Ecotoxicidade de água doce; e Toxicidade Humana.

Essa diferença nos resultados decorre das distintas suposições e abordagens adotadas por cada método, já que eles são desenvolvidos a partir de perspectivas científicas e teóricas diferentes, considerando, assim, categorias de impacto também distintas (ESNOUF *et al.*, 2019). Além disso, conforme mencionado anteriormente, há uma lacuna na criação de métodos específicos para a América do Sul e o Brasil, o que leva à ausência de procedimentos de avaliação alinhados ao contexto brasileiro, dificultando a obtenção de resultados mais representativos e condizentes com as condições ambientais, sociais e econômicas locais.

4.2 INTERPRETAÇÃO

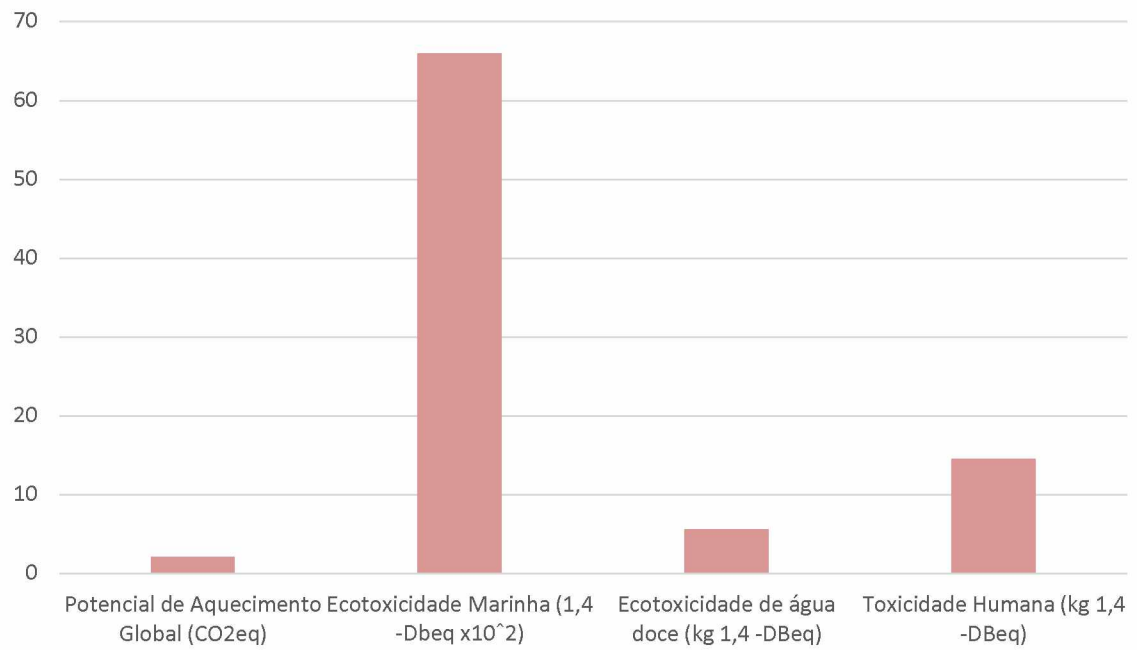
Para uma análise mais detalhada dos resultados, foram selecionadas quatro categorias específicas, conforme apresentado no QUADRO 4. A escolha dessas categorias baseou-se nos resultados mais expressivos, portanto, as 3 categorias com os maiores impactos e que estivessem presentes em ambos os métodos, e ainda, a categoria relacionada às emissões de CO_{2eq}, dada sua relevância para o objetivo principal do estudo. O GRÁFICO 5 e o GRÁFICO 6 contêm os resultados com as devidas unidades de medida, das quatro categorias selecionadas, para os dois métodos. A unidade kg 1,4 DB_{eq} representa a equivalência de impacto tóxico de uma substância em comparação ao 1,4-diclorobenzeno, um composto orgânico clorado comumente utilizado como referência porque seus efeitos tóxicos sobre organismos vivos são bem conhecidos e documentados.

GRÁFICO 5 - RESULTADOS CARACTERIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H₂ DE ACORDO COM O MÉTODO RECIPE



FONTE: A autora (2025).

GRÁFICO 6 - RESULTADOS CARACTERIZADOS PARA A PRODUÇÃO DE H₂ DE ACORDO COM O MÉTODO CML

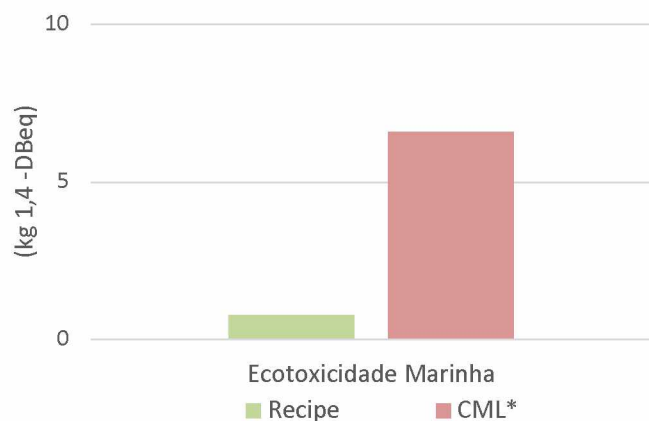


FONTE: A autora (2025).

Com base nos Gráficos 5 e 6 é possível verificar que, apesar da categoria de Ecotoxicidade Marinha ter sido a com resultado mais expressivo nos resultados normalizados em ambos os métodos, nos resultados caracterizados, com as devidas unidades, os resultados divergem para esta categoria. Para o método Recipe, a categoria mais expressiva é a de Toxicidade Humana. Já no método CML, a categoria com resultado mais discrepante é a categoria de ecotoxicidade marinha. Outra categoria que os resultados dos métodos divergem, ao se apresentarem com as devidas unidades, é a de Ecotoxicidade de Água Doce. Já as categorias de Toxicidade Humana e Aquecimento Global os resultados, se convergem para valores coerentes entre si.

Abaixo estão apresentados os Gráficos 7 a 10, para uma análise mais detalhada das quatro categorias examinadas.

GRÁFICO 7 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE MARINHA



*Valores do método CML foram divididos por 10³ para fins de visualização.

GRÁFICO 8 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE

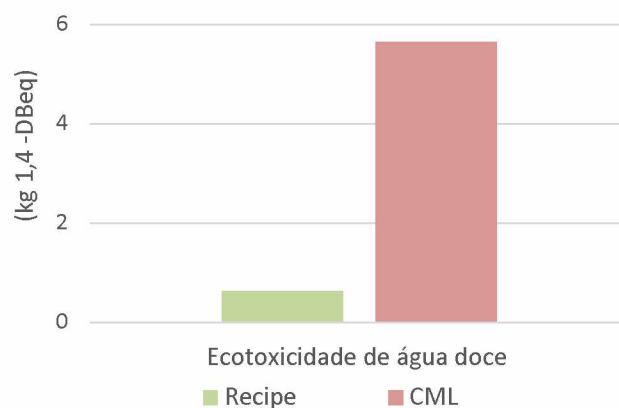


GRÁFICO 9 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE TOXICIDADE HUMANA

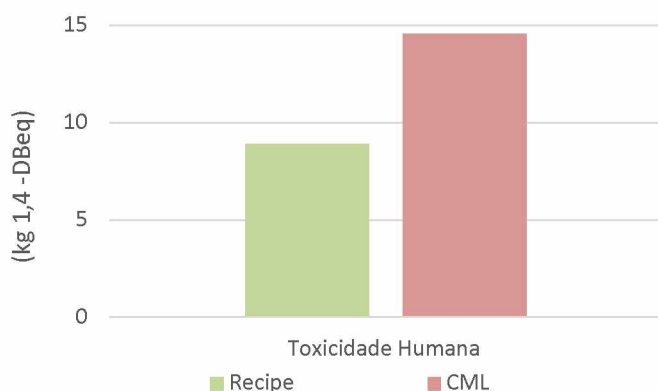
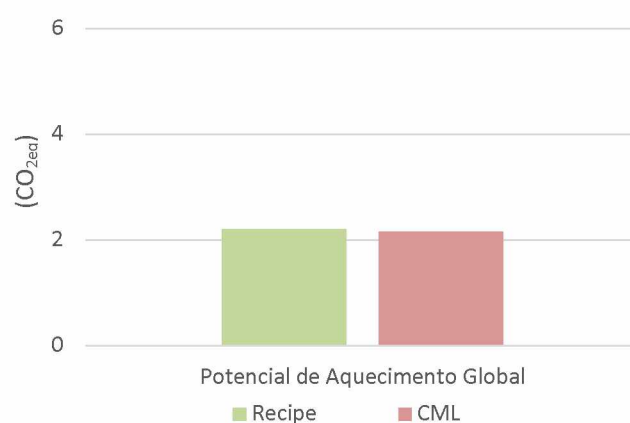


GRÁFICO 10 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE AQUECIMENTO GLOBAL



FONTE: A autora (2025).

Considerando os resultados das quatro categorias de impacto analisadas, não foi possível identificar um padrão consistente ao comparar os métodos CML e ReCiPe. Em três das categorias avaliadas, os resultados obtidos pelo método CML foram maiores do que os do método ReCiPe. Dentre essas três, a categoria de ecotoxicidade marinha apresenta o resultado mais discrepante, sendo o resultado do CML expressivamente mais elevado que o do Recipe. Enquanto nas categorias de ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana, as diferenças foram significativamente menores. Por outro lado, na categoria relacionada aos impactos das emissões de GEE, o método CML apresentou resultados ligeiramente mais

moderados do que o método ReCiPe. Dessa forma, os resultados não indicam, necessariamente, que uma das abordagens de cálculo seja, de maneira geral, mais conservadora do que a outra.

Vale destacar que, conforme mencionado anteriormente na seção 2.7.1.3, o objetivo de utilizar dois métodos de AICV foi justamente permitir o acesso a diferentes resultados, possibilitando uma análise mais crítica e fundamentada dos dados. Dado o nível de discrepância observado em algumas categorias de impacto, a aplicação de mais de um método evidencia não apenas a complexidade inerente a uma ACV, mas também a necessidade de cautela e rigor ao interpretar os resultados absolutos fornecidos por cada método.

Para compreender melhor as diferenças observadas entre os resultados das categorias de impacto, seria necessário aprofundar a investigação sobre a forma como os métodos de AICV são estruturados, incluindo a análise dos fluxos e fatores de caracterização considerados em cada metodologia para calcular os impactos. Entretanto, é importante ressaltar que a análise detalhada dos cálculos e fundamentos de cada método não está contemplada no escopo deste estudo.

4.2.1 Ecotoxicidade Marinha, de Água Doce, e Toxicidade Humana

As categorias de impacto de ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana são comumente avaliadas na mesma unidade, kg 1,4-DBeq, e estão relacionadas aos efeitos adversos que poluentes podem ter em organismos vivos. A ecotoxicidade marinha e de água doce consideram os impactos de substâncias químicas em ecossistemas aquáticos, com foco em organismos como peixes, invertebrados e plantas aquáticas. Ambas as categorias envolvem a avaliação de como essas substâncias podem afetar a biodiversidade e a integridade funcional dos ecossistemas, considerando a complexidade dos impactos gerados por diferentes compostos químicos. Por outro lado, a toxicidade humana foca nos efeitos dessas substâncias na saúde humana, avaliando os riscos de exposição a poluentes e contaminantes. Embora todas essas categorias sejam conectadas pela análise do potencial de toxicidade, elas se distinguem na forma como os impactos são traduzidos para o ecossistema ou para a saúde humana (Oginah *et al.*, 2023; Kadam e Adav, 2024).

A avaliação das categorias de ecotoxicidade continua sendo desafiadora, especialmente ao tentar traduzir os dados de testes laboratoriais em estimativas de danos no ambiente real, como a perda de espécies ou alterações nos serviços ecossistêmicos. Esses desafios são acentuados pela variação de fatores locais e pela complexidade dos ecossistemas analisados (Oginah *et al.*, 2023; Kadam e Adav, 2024).

Nos resultados obtidos para as categorias de ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana, foram observadas diferenças significativas entre os dois métodos avaliados, conforme mencionado. Para o método Recipe, a ecotoxicidade marinha apresentou um valor de 0,78 kg 1,4-DBeq, enquanto a ecotoxicidade de água doce foi de 0,61 kg 1,4-DBeq. Já o método CML obteve valores de 6.609 kg 1,4-DBeq para a ecotoxicidade marinha e 5,66 kg 1,4-DBeq para a de água doce. Em relação à toxicidade humana, o primeiro método obteve 8,93 kg 1,4-DBeq e o segundo 14,6 kg 1,4-DBeq.

4.2.2 Aquecimento Global

Considerando os objetivos deste estudo, destaca-se a importância de analisar as emissões de CO₂ equivalente associadas à produção de 1 kg de hidrogênio via reforma a seco do biogás. Conforme apresentado nessa sessão, os valores encontrados para essa categoria foram de 2,2kg de CO₂eq/kgH₂ e 2,1kg de CO₂eq/kgH₂, de acordo com os métodos Recipe e CML, respectivamente. Com relação aos fluxos que mais influenciam esses dados, foi possível notar que quase a totalidade desse valor (95%) é proveniente do processo de produção de biogás, e muito pouco provém dos impactos causados pela demanda energética.

Tendo em vista a Lei Nº 14.948/2024, mencionada anteriormente e a qual traz a definição sobre hidrogênio de baixa emissão de carbono, e referências bibliográficas citadas anteriormente neste trabalho, nota-se que os resultados obtidos estão em concordância ao estipulado em Lei. A legislação brasileira em questão define que será considerado hidrogênio de baixa emissão de carbono aquele que, ao aplicar a metodologia de ACV, resulte em valor inicial menor ou igual a 7 quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido (7 kgCO₂eq/kgH₂).

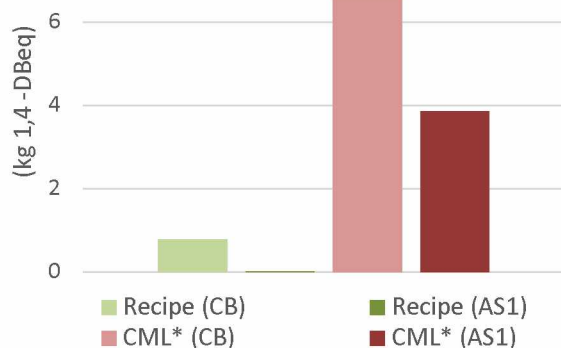
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Considerando o objetivo final desse estudo, a etapa de verificação da sensibilidade foi desempenhada visando principalmente os resultados atrelados à categoria de impacto de Aquecimento Global, a fim de entender quais dados e ajustes estariam diretamente influenciando os resultados finais de emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ por kg de hidrogênio produzido.

Tendo em vista esse objetivo, foram propostas algumas alterações e melhorias em algumas variáveis do processo, obtendo-se, assim, novos resultados da AICV. Os insumos investigados na análise de sensibilidade foram apresentados em detalhes na TABELA 13. Abaixo estão apresentados os resultados da análise de sensibilidade para cada parâmetro alterado, conforme descrito no item 3.2.4.2.

- Vazão de biogás para a produção de hidrogênio (AS1):

GRÁFICO 11 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE MARINHA (AS1)



*Valores do método CML foram divididos por 10^3 para fins de visualização.

GRÁFICO 12 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE (AS1)



GRÁFICO 13 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE TOXICIDADE HUMANA (AS1)

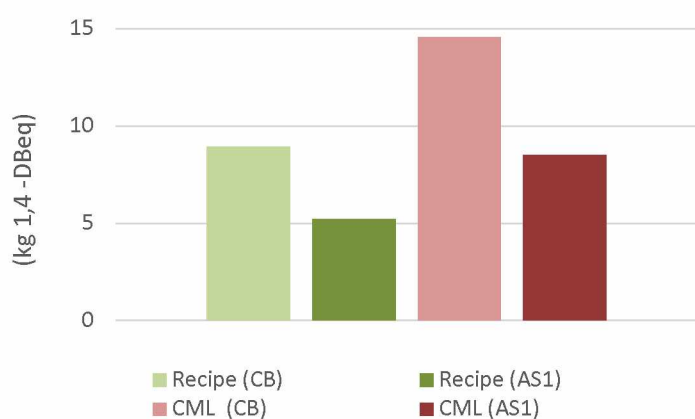
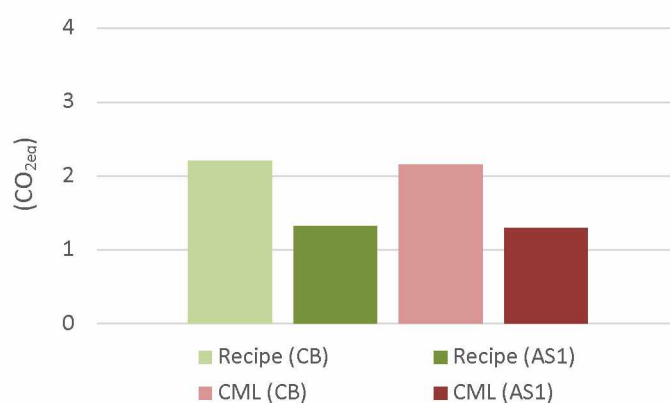


GRÁFICO 14 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE AQUECIMENTO GLOBAL (AS1)



FONTE: A autora (2025).

Neste item, no cenário 1 da Análise de Sensibilidade, conforme mencionado na TABELA 13, optou-se por alterar os dados de eficiência da demanda de biogás para a geração de H_2 . Com isso, o valor para a quantidade de biogás, inserido no inventário para a geração de 1kg de H_2 , passou de $12,31 \text{ m}^3$ para $7,18 \text{ m}^3$. Este valor foi adotado conforme encontrado em bibliografia, como o estudo realizado por Hajjaji *et al.* (2016). Vale ressaltar, no entanto, que o estudo utilizado como referência analisa a rota da reforma a vapor, e que as proporções para essa reforma são diferentes da reforma a vapor. Este valor, portanto, apresenta-se aqui apenas para fins de análise do quanto a eficiência do processo pode refletir nos resultados finais.

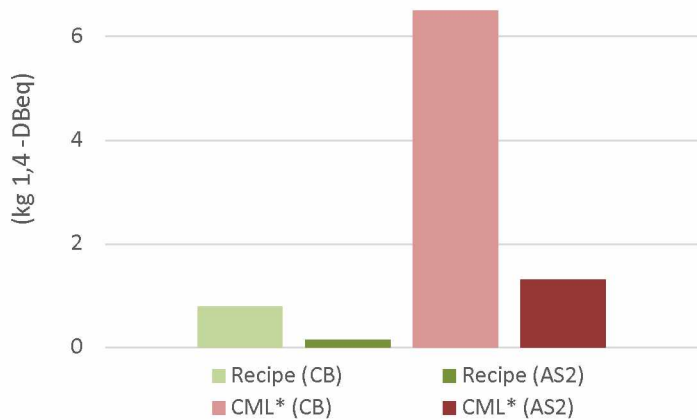
Os resultados obtidos neste primeiro cenário da análise de sensibilidade sofreram grandes impactos em todas as 4 categorias analisadas. A redução foi de pouco mais de 40% na maior parte dos resultados, considerando esse novo cenário, e em ambos os métodos.

Com relação aos resultados referentes à categoria de Aquecimento Global, os resultados passaram de 2,2 kgCO_{2eq}/kgH₂ para 1,3 kgCO_{2eq}/kgH₂, considerando o método Recipe. E no método CML, diminuíram de 2,1 kgCO_{2eq}/kgH₂ para 1,3 kgCO_{2eq}/kgH₂.

Os resultados obtidos no primeiro cenário análise de sensibilidade, considerando a eficiência na produção de H₂, apontam para um resultado ainda mais positivo considerando os impactos ambientais gerados pelo processo.

- Infraestrutura da planta de produção de biogás (AS2)

GRÁFICO 15 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE MARINHA (AS2)



*Valores do método CML foram divididos por 10³ para fins de visualização.

GRÁFICO 16 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE (AS2)

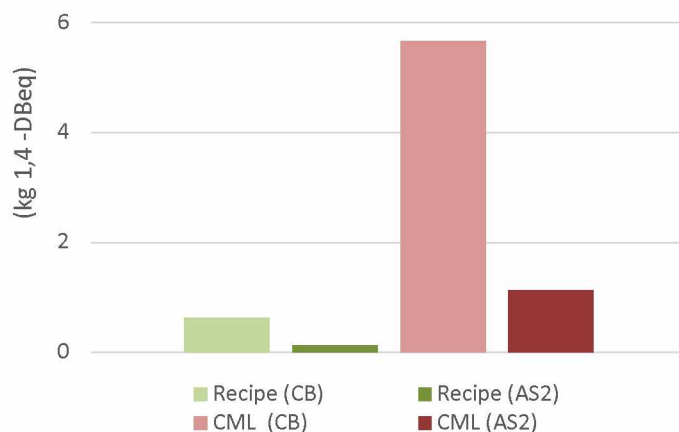
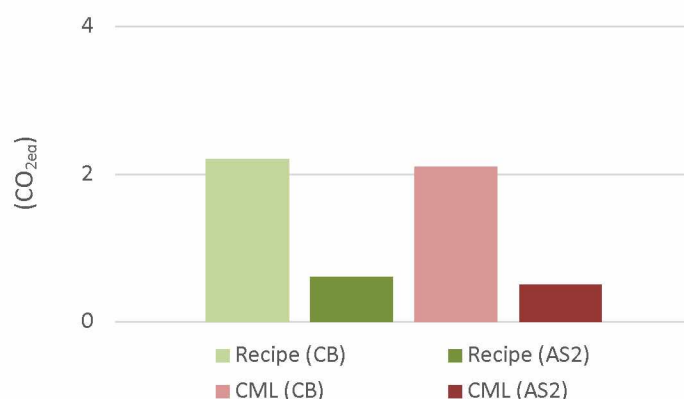


GRÁFICO 17 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE TOXICIDADE HUMANA (AS2)



GRÁFICO 18 - RESULTADOS DA CATEGORIA DE AQUECIMENTO GLOBAL (AS2)



FONTE: Autora (2025).

No cenário 2 da Análise de Sensibilidade, conforme descrito no item 3.2.4.2, foram modificados os dados referentes à estrutura física da planta de geração de biogás, com base no estudo de Hajjaji *et al.* (2016), que considera um biodigestor com volume de 800 m³. Embora, na prática, alterações na infraestrutura possam impactar a eficiência do processo, esse efeito não foi incorporado na modelagem. A proposta deste cenário é verificar exclusivamente como a variação da estrutura física influencia os resultados ambientais.

Quanto aos resultados do segundo cenário da análise de sensibilidade, onde foram ajustados os valores referentes ao tamanho da planta de biodigestão, os resultados também foram menores do que o cenário base analisado. Em ambos os métodos de impacto, em todas as categorias, a diminuição dos impactos foi bastante expressiva, sendo os resultados cerca de 80% a menos que a configuração inicial.

Considerando a categoria de Aquecimento Global, os resultados mudaram de 2,2 kgCO_{2eq}/kgH₂ para 0,6 kgCO_{2eq}/kgH₂, considerando o método Recipe, e de 2,1 kgCO_{2eq}/kgH₂ para 0,5 kgCO_{2eq}/kgH₂, pelo método CML.

A redução expressiva dos impactos neste segundo cenário da Análise de Sensibilidade evidencia que a escolha e o dimensionamento da infraestrutura podem influenciar significativamente os resultados de um estudo de ACV. Ainda que a eficiência do processo não tenha sido considerada nesta análise, os dados reforçam a importância de avaliar e otimizar não apenas os fluxos operacionais, mas também os elementos estruturais envolvidos no sistema.

4.4 REFORMA A SECO DO BIOGÁS VS ELETRÓLISE

A fim de ampliar a compreensão dos resultados obtidos, este capítulo inclui uma comparação com dados de ACV disponíveis na literatura, com foco na rota da eletrólise, que tem ganhado destaque como alternativa para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Essa análise busca posicionar os resultados obtidos para a reforma a seco do biogás no contexto das tecnologias emergentes para produção de hidrogênio, comparando-os com as alternativas amplamente discutidas na literatura, como a eletrólise. A rota envolvendo a eletrólise tem ganhado destaque como uma alternativa para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono, especialmente quando alimentada por fontes renováveis de eletricidade. Da mesma forma, a reforma a seco do biogás também se mostra uma alternativa promissora, ao permitir o aproveitamento de gases residuais, como o metano e o dióxido de carbono, com a vantagem adicional de não demandar volumes significativos de água no processo. Tal característica pode representar uma vantagem ambiental substancial, dado o potencial de redução de impactos relacionados à captação, uso e tratamento de água. Além disso, a utilização de biogás, uma fonte renovável que pode ser aproveitada a partir de resíduos orgânicos e biomassa, traz benefícios adicionais em termos de sustentabilidade e de mitigação de emissões de gases de efeito estufa, tornando essa tecnologia uma alternativa interessante no panorama da produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Com relação aos resultados para ambas as tecnologias, conforme apresentado no Quadro 2, observa-se algumas variações nos dados da eletrólise. Como mencionado anteriormente, ao lidar com estudos de ACV, é fundamental considerar as fronteiras de sistema adotadas em cada estudo, uma vez que essas definições podem justificar as diferenças nos resultados obtidos. Nesse contexto, alguns estudos sobre eletrólise, como Nnabuife *et al.* (2023), Cetinkaya, Dincer e Naterer (2012) e Ji e Wang (2021), apresentaram emissões inferiores às observadas neste trabalho para a reforma a seco, com valores abaixo de 2,2 e 2,1 kg CO₂ eq/kg H₂. Por outro lado, pesquisas como as de Mehmeti *et al.* (2018) e Henriksen *et al.* (2024) apontaram resultados semelhantes aos deste estudo, variando entre 2,2 e 5,1 kg CO₂ eq/kg H₂. Além disso, também foram identificados estudos como o de Zhang

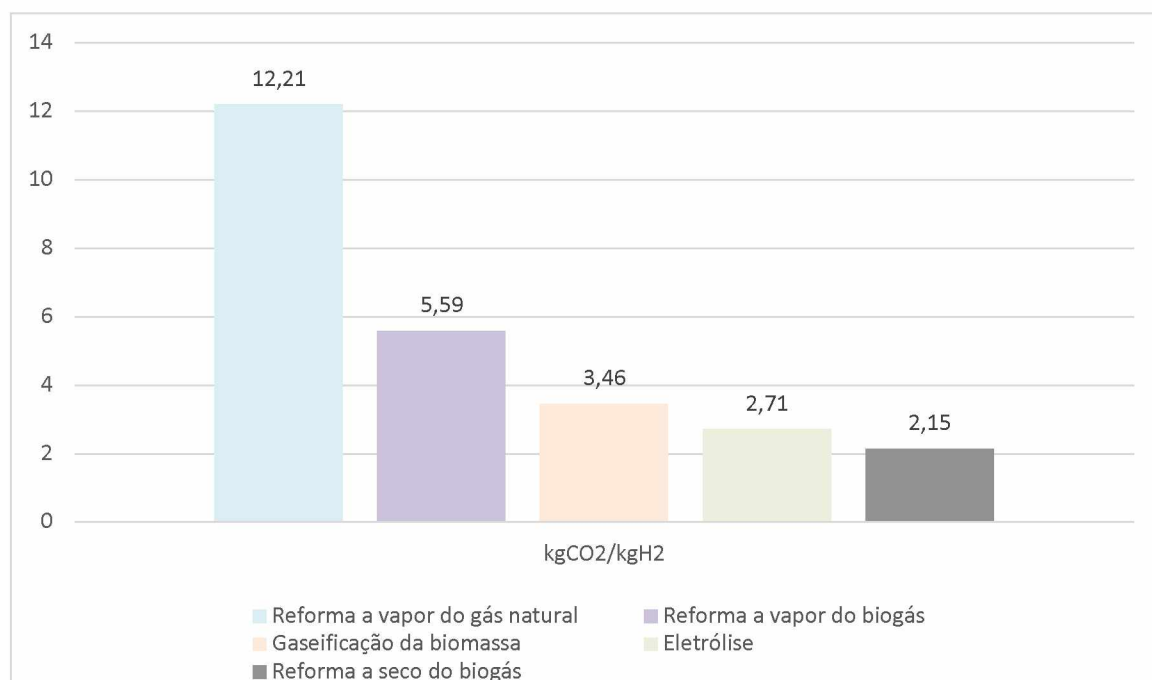
et al. (2022), com resultados mais elevados, que alcançaram valores entre 8,67 e 9,37 kg de CO₂ eq/kg H₂, conforme evidenciado no Quadro 2.

Estes resultados evidenciam os desafios metodológicos envolvidos na Avaliação de Ciclo de Vida de tecnologias emergentes, especialmente quando dependentes de parâmetros que nem sempre estão disponíveis em bases consolidadas. Como destacado por Nnabuife *et al.* (2023), essas diferenças podem decorrer da ausência de padronização em processos ainda pouco difundidos em escala comercial, o que obriga os pesquisadores a recorrerem a suposições próprias ou estimativas específicas para compor os inventários. Esse cenário reforça a importância de analisar os resultados à luz de suas premissas e de considerar com cautela a comparabilidade entre estudos de ACV.

Diante desse panorama, destaca-se a relevância deste estudo como uma das primeiras iniciativas conhecidas a avaliar, por meio da ACV, a rota da reforma a seco do biogás para a produção de hidrogênio no contexto brasileiro. A escassez de estudos sobre essa rota evidencia não apenas o caráter pioneiro da presente análise, mas também os desafios inerentes à modelagem de tecnologias ainda pouco consolidadas. Ainda assim, os resultados obtidos indicam um desempenho ambiental competitivo, sobretudo quando comparado a alternativas mais difundidas, como a eletrólise da água. Adicionalmente, considerando que o CO₂ gerado nesse processo tem origem biogênica, a eventual adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono pode tornar essa rota ainda mais atrativa do ponto de vista climático, potencialmente alcançando emissões líquidas negativas de gases de efeito estufa. Tal perspectiva ressalta o potencial estratégico da reforma a seco do biogás como alternativa sustentável na matriz energética em transição.

O Gráfico 19 traz uma compilação dos resultados encontrados em estudos de ACV considerando diferentes rotas de produção de hidrogênio, conforme apresentadas no Quadro 2. Os valores do gráfico são as médias encontradas considerando os estudos analisados neste trabalho, e o valor pertinente à reforma a seco do biogás refere-se ao valor encontrado no presente trabalho.

GRÁFICO 19 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE EMISSÃO DE CO₂ eq CONSIDERANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO



FONTE: A autora (2025).

Observa-se que a reforma a vapor do gás natural apresenta o maior valor de emissões entre as tecnologias analisadas, reforçando seu caráter intensivo em carbono. Por outro lado, tanto a eletrólise da água quanto a reforma a seco do biogás demonstram desempenhos ambientais significativamente melhores. Embora os valores entre essas duas tecnologias sejam próximos, a vantagem ambiental da reforma a seco do biogás se destaca por seu insumo renovável, pela possibilidade de emissões líquidas negativas, quando combinada com tecnologias de captura e armazenamento de carbono, e, ainda, pela não utilização de água no processo, o que representa um diferencial importante, especialmente em contextos de estresse hídrico.

Essa perspectiva é corroborada por dados internacionais, como os apresentados pela Agência Internacional de Energia, no GRÁFICO 2, apresentado anteriormente. Nele, observa-se que a produção de hidrogênio a partir de biomassa já apresenta, mesmo sem a aplicação de tecnologias de captura, uma das menores intensidades de emissões entre todas as rotas analisadas. Quando combinada com captura e armazenamento de carbono, essa rota atinge emissões líquidas negativas, com valores em torno de -21 kg de CO₂ eq/kg H₂, evidenciando o significativo

potencial climático da biomassa como fonte de hidrogênio de baixa emissão de carbono.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida, a viabilidade ambiental da produção do hidrogênio de baixa emissão de carbono, a partir da reforma a seco do biogás.

Para este fim, foi construído um inventário com relação ao processo de produção do hidrogênio, desde a geração do biogás até a etapa de reforma a seco, abrangendo os principais fluxos de entrada e saída de matéria e energia em cada estágio da cadeia. Esse inventário, apresentado pelas Tabelas 11 e 12 incluiu dados sobre o consumo de recursos naturais (como biomassa para biodigestão), infraestrutura e os rendimentos energéticos associados ao processo.

Em se tratando dos impactos ambientais, os quais o trabalho se propôs a investigar, principalmente considerando as emissões de CO₂ equivalente, os resultados obtidos apontam para dois valores próximos, de 2,1 CO₂eq/kgH₂ e 2,2 CO₂ eq/kgH₂, considerando a aplicação de dois métodos distintos implementados na ACV. Ao mesmo tempo, por meio da análise de sensibilidade, foi possível compreender com mais profundidade a influência de alguns fatores no processo de produção de hidrogênio nesta rota. Com isso, foi possível explorar como os resultados da ACV se comportam diante de diferentes cenários e parâmetros operacionais, revelando a conexão entre as emissões de CO₂ e as escolhas relacionadas ao dimensionamento e à estrutura das plantas destinadas a essa tecnologia.

Considerando os resultados apresentados neste trabalho, é possível observar que a rota da reforma a seco para a produção de H₂ de baixo carbono demonstra um desempenho ambiental competitivo. Além de apresentar emissões de CO₂ equivalente compatíveis com outras tecnologias, ela se destaca por não exigir água como insumo no processo principal, ao contrário de outras rotas convencionais de produção de hidrogênio, como a reforma a vapor e, especialmente, a eletrólise da água. Esse diferencial não só reduz a pressão sobre os recursos hídricos — particularmente relevante em contextos de escassez —, mas também simplifica a cadeia operacional, eliminando a necessidade de etapas complementares de purificação ou fornecimento de água de alta qualidade.

Outro aspecto relevante é o alinhamento da rota da reforma a seco com o marco regulatório do hidrogênio no Brasil. A Política Nacional do Hidrogênio define como hidrogênio de baixa emissão de carbono aquele produzido por processos que resultam em emissões abaixo de 7 kg de CO₂ equivalente por kg de H₂. Os valores obtidos neste estudo, variando entre 2,1 e 2,2 kgCO₂eq/kg H₂, atendem a esse critério, posicionando a reforma a seco do biogás como uma alternativa não só tecnicamente viável, mas também em plena conformidade com as metas e incentivos regulatórios que estão sendo desenvolvidos no país.

Nesse contexto, os achados deste estudo não apenas reforçam a viabilidade ambiental da rota de reforma a seco do biogás, como também evidenciam seu potencial estratégico no contexto da transição energética brasileira. Considerando o potencial de produção de biogás do Brasil e o avanço das políticas de incentivo ao hidrogênio de baixa emissão de carbono, essa rota se mostra promissora para a descentralização da produção de H₂, especialmente em regiões com vocação agroindustrial ou carência hídrica.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver metodologias de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida especificamente adaptadas ao contexto brasileiro e sul-americano. A formulação de métodos regionais deve considerar variáveis locais como a matriz energética predominante, o uso e a ocupação do solo, além das particularidades da infraestrutura industrial. A incorporação desses fatores é essencial para garantir avaliações mais realistas e representativas dos impactos ambientais associados à produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono na América do Sul.
- Realizar análises tecnoeconômicas aprofundadas que avaliem a viabilidade das rotas de produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono, incluindo os custos associados a cada etapa do processo. Esses estudos podem considerar também os custos de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para uma avaliação integrada da viabilidade das rotas analisadas.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás e do Biometano. *Nota técnica: potencial brasileiro de biogás 2020*. São Paulo: ABiogás, 2020.

ABIOGÁS - Associação Brasileira do Biogás e do Biometano. Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto: perspectivas para a universalização sustentável dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil. Publicação elaborada por: ABES, ABiogás, CIBiogás, GEF Biogás Brasil, INCT ETEs Sustentáveis, Instituto 17/Programa de Energia para o Brasil (BEP), Sabesp e Sanepar. São Paulo/SP: ABiogás, 2021. 33 p.

ABREMA. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023. São Paulo: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024.

AJEEB, W; COSTA NETO, R; BAPTISTA, P. Life cycle assessment of green hydrogen production through electrolysis: a literature review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 69, p. 103923, set. 2024.

ALVES, H. J. *et al.* Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. *International journal of hydrogen energy*, v. 38, n. 13, p. 5215-5225, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Produção e fornecimento de biocombustíveis. 2018. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-758-2018-regulamenta-a-certificacao-da-producao-ou-importacao-eficiente-de-biocombustiveis-de-que-trata-o-art-18-da-lei-no-13-576-de-26-de-dezembro-de-2017-e-o-credenciamento-de-firmas-inspetoras?origin=instituicao>.

AGUIAR, M. Síntese de catalisadores de níquel suportados em MCM-41 obtida a partir de diferentes fontes de sílica e sua aplicação na reforma a seco do metano para produção de gás de síntese. 2017. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). *Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília: ANA, 2017.

ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSAPEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL, H.; KOUGIAS, P. G. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, v. 36, p. 452-466, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>.

ANUÁRIO BIOMASSA E ENERGIAS RENOVÁVEIS. Anuário Biomassa e Energias Renováveis 2012. Disponível em: https://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario_biomassa_e_energias_renovaveis_2012.

AYODELE, B. V.; KHAN, M. R.; CHENG, C. K. Catalytic performance of ceria-supported cobalt catalyst for CO-rich hydrogen production from dry reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 1, p. 198-207, 2016.

AZIZ, N. I. H. A.; HANAFIAH, M. M.; GHEEWALA, S. H. A review on life cycle assessment of biogas production: Challenges and future perspectives in Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, v. 122, p. 361-374, 2019.

BALAT, M.; BALAT, M. Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, p. 3589–603, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.067>.

BARROS, M. V.; SALVADOR, R.; PIEKARSKI, C. M.; DE FRANCISCO, A. C.; FREIRE, F. M. C. S. Life cycle assessment of electricity generation: a review of the characteristics of existing literature. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 25, p. 36–54, 2020.

BENEDET JÚNIOR, Gilberto. Avaliação de incertezas em inventários do ciclo de vida. 2007. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007*.

BNDES. Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. Set., Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar. 2021.

BJØRN, A.; MOLTESEN, A.; LAURENT, A.; OWSIANIAK, M.; CORONA, A.; BIRKVED, M.; HAUSCHILD, M. Z. Life Cycle Inventory Analysis. In: *Life Cycle Assessment*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017a. p. 117-165.

BJØRN, A.; OWSIANIAK, M.; MOLIN, C.; LAURENT, A. Main Characteristics of LCA. In: *Life Cycle Assessment*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017b. p. 9-16.

BJÖRKLUND A. E. Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 7 (2): 64-72. 2002.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. *Interciencia*, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.

BRASIL. Lei n. 14.026, de 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm.

BRASIL. Intended nationally determined contribution towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2016. Disponível em:

<https://www4.unfccc.int/sites/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>.

BRASIL. Intended nationally determined contribution towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2023. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/11/NDC-1.4-Brasil-27-out-2023-portugues.pdf>.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Anuário da Cerveja 2024: ano de referência 2023. Brasília: MAPA/SDA, 2024. Disponível em: <https://www.sindicerv.com.br/wp-content/uploads/2024/05/Anuario-da-cerveja-2024-referencia-2023-MAPA-versao-web.pdf>.

CI Biogás – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. Panorama do Biogás no Brasil 2021. Relatório Técnico nº 001/2022 – Foz do Iguaçu: CI Biogás, 2022.

CI Biogás – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. Panorama do Biogás no Brasil 2023. Relatório Técnico nº 001/2024 – Foz do Iguaçu: CI Biogás, 2024.

CI Biogás – Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. Sem data (s.d.). Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/biogas-o-que-e-biomassa-e-como-pode-ser-utilizada/>.

CHO, H. H.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Environmental impact assessment of hydrogen production via steam methane reforming based on emissions data. *Energy Reports*, [S.l.], v. 8, p. 13585–13595, nov. 2022

COSTA, D. F. Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de etanol deve chegar a 35,5 bilhões de litros e consumirá 65% da safra, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3202-producao-de-etanol-deve-chegar-a-35-5-bilhoes-de-litros-e-consumira-65-da-cana-moida>.

DA SILVA, I. A. Hidrogênio: combustível do futuro. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016.

DANTAS, S. C. *et al.* Hydrogen production from oxidative reforming of methane on supported nickel catalysts: An experimental and modeling study. *Chemical Engineering Journal*, v. 197, p. 407-413, 2012.

DELPIERRE M, QUIST J, MERTENS J, PRIEUR-VERNAT A, CUCURACHI S. Assessing the environmental impacts of wind-based hydrogen production in the Netherlands using ex-ante LCA and scenarios analysis. *126866 Journal of Cleaner Production* 2021;299.

DI GIULIANO, A.; GIRR, J.; MASSACESI, R.; GALLUCCI, K.; COURSON, C. Sorption enhanced steam methane reforming by Ni–CaO materials supported on mayenite. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 19, p. 13661-13680, 2017.

EMBRAPA. Suínos e Aves. Estatísticas - Desempenho da produção, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas>.

EMBRAPA. Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>.

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. EUR 24708 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

ESNOUF, A.; HEIJUNGS, R.; COSTE, G.; LATRILLE, É.; STEYER, J. P.; HÉLIAS, A. A tool to guide the selection of impact categories for LCA studies by using the representativeness index. *Science of the Total Environment*, v. 658, p. 768-776, 2019.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 440-455, 2018.

GHANDEHARIUN S, KUMAR A. Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in Western Canada. *International Journal of Hydrogen Energy* 2016;41(22):9696–704.

GERLOFF, N. Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production. *Journal of Energy Storage*, v. 43, p. 102759, nov. 2021.

GIZ – GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro. Brasília: GIZ, Oct. 2021.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level / Report I: Characterization. Holanda: Ministerie van VROM, Den Haag, 2009.

HAJJAJI, N.; MARTINEZ, S.; TRABLY, E.; STEYER, J.-P.; HELIAS, A. Life cycle assessment of hydrogen production from biogas reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S. l.], v. 41, n. 44, p. 19672–19688, 2016.

HAUSCHILD, M. Z.; BONOU, A.; OLSEN, S. I. Life Cycle Interpretation. In: HAUSCHILD, M.; ROSENBAUM, R.; OLSEN, S. (eds). *Life Cycle Assessment*. Springer, Cham.

HENRIKSEN, M. S.; MATTHEWS, H. S.; WHITE, J.; WALSH, L.; GROL, E.; JAMIESON, M.; SKONE, T. J. Tradeoffs in life cycle water use and greenhouse gas

emissions of hydrogen production pathways. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.l.], 24 ago. 2023

IBGE. Produção da Pecuária Municipal 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/mandioca/br>.

INSTITUTO 17. Biogás no Brasil: potencial oferta a curto prazo. Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil), Relatório Técnico 02-2021. São Paulo: Instituto 17, 2021. 74 p.

IRENA and International Energy Agency (IEA). Perspectives for the Energy Transition – Investment Needs for a Low-Carbon Energy System. IRENA & Paris: IEA, Abu Dhabi, 2017. Disponível em: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Perspectives_for_the_Energy_Transition_2017.pdf.

IRENA; BLUERISK. Water for hydrogen production. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; Bluerisk, 2023.

Jl, M.; WANG, J. Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 89, p. 43657–43670, 2021.

KADAM, R. S.; YADAV, G. D. Life cycle analysis of ammonia and methane production using green hydrogen and carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, v. 302, p. 127006, 2021.

KARIMIPOURFARD, D.; KABIRI, S.; RAHIMPOUR, M. R. A novel integrated thermally double coupled configuration for methane steam reforming, methane oxidation and dehydrogenation of propane. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 21, p. 134-146, 2014.

KOJ, J. C.; WULF, C.; ZAPP, P. Environmental impacts of power-to-X systems—a review of technological and methodological choices in life cycle assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 112, p. 865–879, 2019.

KUMAR, S.; KUMAR, B.; KUMAR, S.; JILANI, S. Comparative modeling study of catalytic membrane reactor configurations for syngas production by CO₂ reforming of methane. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 20, p. 336-346, 2017.

LAVOIE, J. M. Review on dry reforming of methane, a potentially more environmentally-friendly approach to the increasing natural gas exploitation. *Frontiers in Chemistry*, v. 2, p. 81, 2014.

LUISETTO, I.; TUTI, S.; BATTOCCHIO, C.; LO MASTRO, S.; SODO, A. Ni/CeO₂–Al₂O₃ catalysts for the dry reforming of methane: The effect of CeAlO₃ content and nickel crystallite size on catalytic activity and coke resistance. *Applied Catalysis A: General*, v. 500, p. 12-22, 2015.

MAO, C. *et al.* Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540-555, 2015.

METCALF & EDDY. INC. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. 4. ed. New York: McGraw-Hill Book, 2003. 1815 p.

MEHMETI, A.; ANGELIS-DIMAKIS, A.; ARAMPATZIS, G.; MCPHAIL, S.; ULGIATI, S. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments*, v. 5, p. 24, 2018.

MENDES, N. C.; BEUNO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Production*, v. 26, n. 1, p. 160-175, jan./mar. 2016.

MINH, D. P.; SIANG, T. J.; VO, D. V. N.; PHAN, T. S.; RIDART, C.; NZIHO, A.; GROUSE, D. Hydrogen production from biogas reforming: an overview of steam reforming, dry reforming, dual reforming, and tri-reforming of methane. *Hydrogen Supply Chains*, v. 1, p. 111-166, 2018.

MIZIARA, C. R. Estudo Técnico e Econômico das Fontes de Biomassa para Uso em Cogeração de Energia Elétrica. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba-MG, 2013. Disponível em: <http://bdtd.ufm.edu.br/handle/tede/68>.

NADELETI, E.; GOMES, F. Green hydrogen production from urban waste biogas: An analysis of the Brazilian potential and the process' economic viability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 171, p. 113669, 2023.

NNABUIFE, S.G.; DARKO, C.K.; OBIKO, P.C.; KUANG, B.; SUN, X.; JENKINS, K. A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact. *Clean Technol.* 2023, 5, 1344–1380.

OGINAH, S. A.; POSTHUMA, L.; MALTBY, L.; HAUSCHILD, M.; FANTKE, P. Linking freshwater ecotoxicity to damage on ecosystem services in life cycle assessment. *Environmental International*, v. 164, p. 107705, 2022.

OLIVEIRA, L. G., SOUZA, L. P., MACHADO, B., TREVISAN, S. V. C., GASPARRINI, L. J., & ALVES, H. J. Obtenção de gás de síntese por reforma a seco do metano em unidade piloto. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26(3), e13024, 2021.

OUANA, S. A.; LEME, M. M. V.; ENSINAS, A. V.; KHALID, H. Análise do ciclo de vida da produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto e gás natural no contexto brasileiro. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY*, Goiânia – GO, 2024.

OLIVEIRA, L. G. Reforma a seco do biogás para obtenção de hidrogênio verde em unidade piloto utilizando catalisadores Ni/Si-MCM-41. Palotina, 2021.

PERES, A. P. G. Produção de gás de síntese a partir da glicerina. 136 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2010.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. *Revista Gestão Industrial*, v. 08, n. 03, p. 222-240, 2012.

REAÑO, R.L., 2020. Assessment of environmental impact and energy performance of rice husk utilization in various biohydrogen production pathways. *Bioresource Technology*.

REN, J.; CAO, J. P.; ZHAO, X. Y.; YANG, F. L.; WEI, X. Y. Recent advances in syngas production from biomass catalytic gasification: A critical review on reactors, catalysts, catalytic mechanisms and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 116, p. 109426, 2019.

SCHAFFNER, R. Catalisadores Ni/Al₂O₃ para a reforma a seco do metano: efeito da temperatura de calcinação do suporte e uso de promotor alcalino. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

SCHULTZ, G. Boas práticas ambientais na suinocultura. Porto Alegre: SEBRAE, 2007. 44 p.

SINDICERV – Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja. O setor em números. Disponível em: <https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>. Acesso em: 17 dezembro de 2023.

SOUSA, F. F.; SOUSA, H. A. S.; OLIVEIRA, A. C.; JUNIOR, M. C. C.; AYALA, A. P.; BARROS, E. D. Nanostructured Ni-containing spinel oxides for the dry reforming of methane: effect of the presence of cobalt and nickel on the deactivation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 35, p. 1-11, 2016.

STERNBERG, A., BARDOW, A., 2016. Life cycle assessment of power-to-gas: syngas vs methane. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4 (8), 4156–4165.

STYLES, D., ADAMS, P., THELIN, G., VANEECKHAUTE, C.I., CHADWICK, D., WITHERS, P.J., 2018. Life cycle assessment of biofertilizer production and use compared with conventional liquid digestate management. *Environ. Sci. Technol.* 52, 7468–7476.

SULEMAN F, DINCER I, AGELIN-CHAAB M. Comparative impact assessment study of various hydrogen production methods in terms of emissions. *Int J Hydrogen Energy* 2016;41(19):8364–75.

TEZER, Ö.; KARABAĞ, N.; ÖNGEN, A.; ÇOLPAN, C. Ö.; AYOL, A. Biomass gasification for sustainable energy production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 154, p. 111804, 2022.

UNIDO - Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. Panorama e potencial de crescimento da produção de biogás e biometano no sul do Brasil: nota técnica / Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento

Industrial; Fundação Getúlio Vargas; Comitê diretor do projeto Centro Internacional de Energias Renováveis. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2020.

UNIDO - Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. Potencial de produção de biogás no sul do Brasil / Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Comitê diretor do projeto Centro Internacional de Energias Renováveis. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022a.

UNIDO - Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. Potencial de produção de biogás: mapeamento de substratos e sua conversão energética no sul do Brasil: relatório / Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial; Associação Brasileira de Biogás e Biometano; Comitê diretor do projeto Centro Internacional de Energias Renováveis. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022b.

USDA - United States Department of Agriculture. Dairy Production and Trade Developments. 21 p., 2020. Disponível em: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/5t34sj56t/p2677h26v/ks65j1241/dairy.pdf>

USDA - United States Department of Agriculture. Livestock and Poultry: World Markets and Trade. 16 p., 2020. Disponível em: https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/73666448x/tq57pc63r/5d86pm455/livestock_poultry.pdf

VAN DEN, H. P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. Cement & Concrete Composites, n. 34, p. 431-442, 2012.

VITA, A.; ITALIANO, C. Fuel and hydrogen related problems for conventional steam reforming of natural gas. In: Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. Elsevier, 2020. p. 71-89.

ZHANG J, LING B, HE Y, ZHU Y, WANG Z. Life cycle assessment of three types of hydrogen production methods using solar energy. Int J Hydrogen Energy 2022;47 (30):14158–68.

ZHANG, J.; WANG, Z.; HE, Y.; LI, M.; WANG, X.; WANG, B.; ZHU, Y.; CEN, K. Comparison of onshore/offshore wind power hydrogen production through water electrolysis by life cycle assessment. Sustainable Energy Technologies and Assessments 2023.

WHITING, A.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. Energy, [S. l.], v. 70, p. 181–193, 2014.