



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Fernando Henrique Cavalcante Rodella

A energia do hidrogênio e suas rotas tecnológicas: explorando o potencial da suinocultura
catarinense para a transição energética

Florianópolis
2024

Fernando Henrique Cavalcante Rodella

A energia do hidrogênio e suas rotas tecnológicas: explorando o potencial da suinocultura catarinense para a transição energética

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Paulo Belli Filho, Dr.

Florianópolis

2024

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

Rodella, Fernando Henrique Cavalcante

A energia do hidrogênio e suas rotas tecnológicas :
Explorando o potencial da suinocultura catarinense para a
transição energética /Fernando Henrique Cavalcante
Rodella ; orientador, Paulo Belli Filho, 2024.

92 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Hidrogênio. 3.
Suinocultura. 4. Descarbonização. I. Belli Filho, Paulo.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Fernando Henrique Cavalcante Rodella

A energia do hidrogênio e suas rotas tecnológicas: explorando o potencial da suinocultura catarinense para a transição energética

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 26 de junho de 2024.

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus queridos pai e mãe, Aristeu e Elzi, por todo o amor, apoio incondicional e pela inspiração constante ao longo desta jornada. Sem vocês, com toda certeza, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio e a contribuição de diversas pessoas, às quais gostaria de expressar minha profunda gratidão: À minha família, especialmente ao meu pai, minha mãe e meu irmão, por todo o amor, suporte e por acreditar em mim, mesmo nos momentos em que eu mesmo duvidei. Vocês sempre foram meu principal alicerce e fonte de inspiração; aos amigos que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis e celebraram comigo cada pequena vitória; à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que me proporcionou o ambiente acadêmico e os recursos necessários para meu crescimento pessoal e profissional; aos professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, cujos ensinamentos foram fundamentais para minha formação; ao meu orientador, Paulo Belli Filho, por sua orientação precisa, paciência e por compartilhar seu vasto conhecimento comigo; aos colegas de trabalho pela colaboração, incentivo e ensinamento contínuo ao longo dessa caminhada. A todos, meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

As constantes crises no setor energético em paralelo às inequívocas manifestações recentes do aquecimento global, têm impulsionado pesquisas em tecnologias mais eficientes que utilizem recursos renováveis como matéria-prima para geração de energia de baixo carbono. Nesse cenário, a cadeia produtiva do hidrogênio recebe atenção especial por ser um combustível com alta capacidade energética e impacto ambiental mínimo, apresentando-se como um vetor energético com potencial para substituir combustíveis fósseis tradicionais e promover, portanto, os esforços em direção à descarbonização. Este trabalho apresenta aspectos técnicos da produção de hidrogênio a partir de rotas tecnológicas que envolvem a reforma de hidrocarbonetos, como o biogás, ou a biomassa proveniente dos dejetos suínos como fonte biológica para produção de gás de síntese. Santa Catarina, maior produtor de suínos do Brasil, tem na suinocultura uma atividade econômica significativa. Contudo, os dejetos gerados representam um grande problema ambiental no estado, ainda gerando passivos aos produtores e degradando o meio natural. Como estudo de caso, este projeto busca avaliar o potencial teórico de produção de hidrogênio no Estado de Santa Catarina através da reforma a vapor do biogás proveniente da digestão anaeróbia dos dejetos suínos. Concomitantemente, são investigados os aspectos ecológicos, apresentando uma análise das emissões do processo de reforma do biogás, demonstrando que este método de produção de hidrogênio é uma rota tecnologicamente atraente do ponto de vista ambiental. Desta forma, este projeto propõe que a integração da produção de hidrogênio com os dejetos produzidos pelos rebanhos suínos do estado catarinense, representa uma abordagem inovadora e viável, alinhada aos objetivos de sustentabilidade socioambiental e com expressivo potencial para somar na contribuição de um setor de energia vinculado aos anseios contemporâneos.

Palavras-chave: Hidrogênio. Suinocultura. Descarbonização.

ABSTRACT

The constant crises in the energy sector, in parallel with the unequivocal recent manifestations of global warming, have driven research into more efficient technologies that use renewable resources as raw materials for generating low-carbon energy. In this scenario, the hydrogen production chain receives special attention because it is a fuel with high energy capacity and minimal environmental impact, presenting itself as an energy vector with the potential to replace traditional fossil fuels and therefore promote efforts towards decarbonization. This paper presents technical aspects of hydrogen production from technological routes that involve the reforming of hydrocarbons, such as biogas, or biomass from pig waste as a biological source for the production of synthesis gas. Santa Catarina, Brazil's largest pig producer, has a significant economic activity in pig farming. However, the waste generated represents a major environmental problem in the state, still generating liabilities for producers and degrading the natural environment. As a case study, this project seeks to evaluate the theoretical potential for hydrogen production in the state of Santa Catarina through the steam reforming of biogas from the anaerobic digestion of pig waste. At the same time, the ecological aspects are investigated, presenting an analysis of the emissions from the biogas reforming process, demonstrating that this method of hydrogen production is a technologically attractive route from an environmental point of view. In this way, this project proposes that integrating hydrogen production with the waste produced by pig herds in the state of Santa Catarina represents an innovative and viable approach, aligned with the objectives of socio-environmental sustainability and with significant potential to contribute to an energy sector linked to contemporary aspirations.

Keywords: Hydrogen. Pig farming. Decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões de CO ₂ para empreendimentos a base de combustíveis fósseis e os limites para as emissões globais.	20
Figura 2 - Comparativo dos riscos do aumento das temperaturas globais	21
Figura 3 - Emissões de CH ₄ no Brasil por Setor.	23
Figura 4 - Emissão de CH ₄ na agropecuária.	24
Figura 5 - Tecnologias de base e desafios na produção e utilização de H ₂	28
Figura 6 - Marcos temporais da estratégia brasileira para a economia do hidrogênio.	29
Figura 7 - Potencial técnico de produção de H ₂ no Brasil com projetos de anunciados.	30
Figura 8 - Representação esquemática de células de tipo PEMFC e SOFC.	32
Figura 9 - Protótipo de automóvel movido à CAC.	33
Figura 10 - Classificação do H ₂ em uma estrutura cromática.	35
Figura 11 - Comparativo entre densidade volumétricas e gravimétricas de energias dos combustíveis e carreadores de H ₂	36
Figura 12 - Tecnologias de armazenamento de H ₂	36
Figura 13 - Tanque de armazenamento de H ₂	38
Figura 14 - Representação gráfica de um carreador de H ₂	39
Figura 15 - Representação gráfica das rotas tecnológicas para obtenção de H ₂	40
Figura 16 – Rotas tecnológicas de interesse para o presente estudo.	41
Figura 17 - Tecnologias de produção a partir da reforma de hidrocarbonetos.	43
Figura 18 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.	44
Figura 19 - Reação de Stickland, onde um par de aminoácidos é degradado, formando acetato, amônia e CO ₂	46
Figura 20 - (a) Formação de metano pelo acetato; (b) formação de CH ₄ pelo CO ₂	47
Figura 21- Distribuição de substratos utilizados na biodigestão anaeróbia (esquerda) e aplicação energética do uso do biogás (direita) nas usinas brasileiras em operação.	48
Figura 22 - Etapas de tratamento e purificação do biogás para concentração do biometano.	50
Figura 23 - Diagrama de fluxo do processo de SMR.	53
Figura 24 - Diagrama de fluxo do processo de ATR.	57
Figura 25 - Representação gráfica das rotas tecnológicas para obtenção de H ₂ a partir de fontes renováveis.	58
Figura 26 - Diagrama de fluxo do processo de pirólise da biomassa.	59
Figura 27 - Diagrama de fluxo do processo de gaseificação de biomassa.	60

Figura 28 - Diagrama de fluxo do processo de biofotólise direta.	62
Figura 29 - Diagrama de fluxo do processo de biofotólise indireta.	62
Figura 30 - Diagrama de fluxo do processo de foto-fermentação.	63
Figura 31 - Diagrama de fluxo do processo de fermentação escura.....	64
Figura 32 - Produção e exportação no mercado mundial de carne suína (por mil toneladas) nos anos de 2021 e 2022.	65
Figura 33 - Recorte temporal da produção brasileira de carne suína por milhões de toneladas (direita) e alojamento de matrizes por cabeças (esquerda).....	66
Figura 34 - Exportações de carne suína por unidade federativa no ano de 2022.	66
Figura 35 - Abate de suínos por unidade federativa no ano de 2022 (cabeças).	67
Figura 36 - Distribuição do rebanho suinícola entre as mesorregiões de SC (efetivo em cabeças).	69
Figura 37 - Distribuição do rebanho suinícola catarinense por mesorregiões catarinenses. (efetivo em cabeças).	69
Figura 38 - Mapa de localização do estado de SC.....	72
Figura 39 - Esquema e protótipo do sistema de reforma a vapor do biogás.	76
Figura 40 - Esquema aproximado do reformador de biogás	77
Figura 41 - Sistema de produção de H ₂ via reforma de biogás.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo do conteúdo energético de algumas fontes energéticas.....	26
Tabela 2 - Métodos básicos de armazenamento de hidrogênio.....	37
Tabela 3 - Comparativo entre os diferentes processos de produção de H ₂	42
Tabela 4 - Composição típica do biogás.....	49
Tabela 5 - Principais impurezas encontradas no biogás.....	50
Tabela 6 - Resumo do processo de SMR para a síntese de H ₂ a partir do CH ₄	53
Tabela 7 - Resumo do processo de POX e CPOX para a síntese de H ₂ a partir do CH ₄	55
Tabela 8 - Resumo do processo de ATR para a síntese de H ₂ a partir do CH ₄	57
Tabela 9 - Taxa de síntese de H ₂ e volume do bio-reator necessário para uma célula de combustível de eletrólitos de polímero (PEMFC), de 5 kW	64
Tabela 10 - Representatividade catarinense na produção nacional de carne suína.	68
Tabela 11 - Quantidade (kg/dia) de elementos poluentes e coliformes fecais (colônias) expresso por matriz (1) e suíno alojado (2).....	71
Tabela 12 - Valores da metodologia da CIBiogás-ER para os parâmetros.	75
Tabela 13 – Valores da metodologia proposta por Kunz para terminação de suínos.....	76
Tabela 14 - Equações estequiométricas de reforma do biogás.....	78
Tabela 15 - Capacidades caloríficas e entalpia de formação.....	79
Tabela 16 - Valores de fluxos calculados.....	79
Tabela 17 - Resultados obtidos de acordo com as metodologias propostas.....	82
Tabela 18 - Emissões de poluentes durante o processo de reforma do biogás.....	84
Tabela 19 - Composição química e PCI.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR - Reforma autotérmica
CAC - Células a combustível
CCUS - Captura, utilização e armazenamento de carbono
CCS - Captura e armazenamento de carbono
CH₄ - Metano
CO - Monóxido de carbono
CO₂ - Dióxido de Carbono
COS - Oxissulfeto de carbono
CPOX - Oxidação parcial catalítica
DR - Reforma a seco
ETE - Estação de tratamento de esgoto
GEE - Gases de efeito estufa
GH₂ - H₂ gasoso
GNV - Gás natural veicular
GWP-AR6 - Sexto relatório de avaliação do IPCC sobre aquecimento global
H₂ - Hidrogênio
H₂O - Água
H₂S - Sulfeto de hidrogênio
H₂V - Hidrogênio verde
IPCC - Painel intergovernamental sobre as alterações climáticas
LH₂ - Hidrogênio liquefeito
MP - Material Particulado
Mtoe - Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
N₂O - Óxido nitroso
NH₃ - Amônia
NO_x - Óxidos de nitrogênio
O₂ - Oxigênio
PEMFC - Células a Combustível de Membrana Polimérica
PNH₂ - Programa Nacional de Hidrogênio
POX - Oxidação parcial
SBR - Reforma catalítica do biogás

SC – Santa Catarina

SMR - Reforma do metano a vapor

SOFC - Células a combustível de óxido sólido

SO_x - Óxidos de enxofre

UCC - Unidade produtora de suínos em ciclo completo

UPL - Unidades produtoras de leitões

UPT - Unidades produtoras de terminados

VPA - Valor da produção agropecuária

WGS - Transferência água-gás

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	EMERGÊNCIA CLIMÁTICA e a CRISE SOCIOAMBIENTAL	18
2.1.1	Os desafios da transição energética e descarbonização catarinense	22
2.2	FUNDAMENTOS DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO	25
2.3	A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO E SEU PAPEL NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	27
2.3.1	Perspectivas para a economia do H₂ em Santa Catarina.....	29
2.3.2	Aplicação do H₂ na mobilidade urbana.....	31
2.3.3	Aplicação do H₂ na Indústria	33
2.4	MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DAS ROTAS DE PRODUÇÃO DO H ₂	34
2.5	LOGÍSTICA DE ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DO H ₂	35
2.5.1	H₂ comprimido	37
2.5.2	H₂ liquefeito.....	38
2.5.3	Carreadores de H₂	39
2.6	PROCESSOS E ROTAS TECNOLÓGICAS DE OBTENÇÃO DO H ₂	40
2.6.1	Produção de H₂ a partir da reforma de hidrocarbonetos.....	42
<i>2.6.1.1</i>	<i>Fundamentos da Digestão Anaeróbia</i>	<i>43</i>
<i>2.6.1.2</i>	<i>Biogás e Biometano</i>	<i>47</i>
<i>2.6.1.3</i>	<i>Reforma do metano a vapor (SMR).....</i>	<i>51</i>
<i>2.6.1.4</i>	<i>Oxidação parcial (POX) e oxidação parcial catalítica (CPOX)</i>	<i>54</i>
<i>2.6.1.5</i>	<i>Reforma autotérmica (ATR)</i>	<i>56</i>

2.6.2	Produção de H₂ a partir de fontes renováveis como a biomassa.....	58
2.6.2.1	<i>Processos Termoquímicos</i>	59
2.6.2.2	<i>Processos biológicos</i>	60
2.7	ASPECTOS DA SUINOCULTURA NO BRASIL E EM SANTA CATARINA	64
2.7.1	Caracterização dos dejetos suínos.....	69
3	METODOLOGIA.....	72
3.1	METODOLOGIAS PARA ESTIMAR O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DE SC	74
3.2	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE H ₂ A PARTIR DO BIOGÁS ESTIMADO.	76
3.3	EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DO PROCESSO DE REFORMA DO BIOGÁS....	80
4	RESULTADOS	81
4.1	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DE SC.....	81
4.2	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	82
4.3	EFICIÊNCIA ECOLÓGICA	83
5	CONCLUSÃO.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a comunidade científica tem se dedicado amplamente na busca por alternativas viáveis aos combustíveis fósseis. O enfoque em alternativas energéticas limpas e sustentáveis tem se intensificado, impulsionado pela crescente conscientização acerca dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela necessidade de reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis.

A transição energética é um processo complexo e multidimensional que visa a transformação da matriz energética de forma a torná-la mais sustentável, eficiente e menos prejudicial ao meio ambiente. Recentemente, tem-se observado alterações significativas no meio ambiente, resultado direto da intervenção humana. Estas transformações, denominadas como antropogênicas, eram insignificantes antes da Revolução Industrial no final do século XIX, porém tornaram-se motivo de apreensão devido ao abrupto crescimento populacional e ao uso excessivo e predatório dos recursos naturais existentes, especialmente os recursos energéticos, pelas nações industrializadas (GOLDEMBERG & LUCON, 2012). Diante desta realidade imposta, trabalhar incansavelmente em vista da transição para um futuro energético sustentável é um dos desafios centrais da humanidade neste século (CECHIN, 2010).

Nesse contexto, biocombustíveis tem emergido como uma promissora solução para atender às demandas energéticas e mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dentre as várias opções de biocombustíveis disponíveis, o hidrogênio (H_2) se destaca como um atraente futuro veículo de produção energética, devido à sua alta eficiência de conversão em energia útil, baixa ou inexistente geração de poluentes e alta densidade energética (HALLENBECK; GHOSH, 2009). A transição energética, motivada pela urgência de combater as mudanças climáticas, destacou o H_2 produzido através de métodos de baixa emissão, como um componente crucial para a descarbonização de setores com grande emissão de GEE.

Se até recentemente, o uso do H_2 como fonte de energia estava principalmente relacionado ao desenvolvimento de células a combustível, no cenário atual, as expectativas sobre suas possíveis aplicações são amplamente variadas (BNDES, 2022). Em virtude da importância significativa deste tema, de seu alinhamento com os princípios de sustentabilidade, da necessidade de minimizar os impactos ambientais e ao potencial inovador do H_2 como fonte energética, observa-se um crescimento progressivo de pesquisas nos últimos anos.

Porém, embora tenham sido publicadas muitas pesquisas recentes sobre a produção e aplicação energética do H_2 , reconhecendo-a como uma tecnologia promissora, as

implementações práticas do processo ainda se apresentam incipientes, sendo observadas poucas iniciativas do processo em escala real. (BARTACEK, ZABRANSKA & LENS, 2007), demonstrando clara a necessidade de continuidade de fomento à pesquisa e desenvolvimento científico. O interesse renovado no H₂ segue sendo impulsionado por avanços tecnológicos e constantes quedas em seus custos de produção. Ademais, o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias de armazenamento e transporte deste combustível, prometem superar alguns dos principais desafios logísticos associados à sua adoção em larga escala.

Partindo das premissas pormenorizadas nos parágrafos anteriores, o presente projeto centrou-se no entendimento através de um amplo estudo bibliográfico acerca produção do H₂, em especial das rotas tecnológicas que envolvam a reforma de hidrocarbonetos, como o biogás e biometano provenientes da digestão anaeróbia, ou a adoção da biomassa dos dejetos suínos como fonte biológica para produção de gás síntese. O biogás e a biomassa, provenientes de resíduos biológicos gerados nas propriedades suinícolas do estado catarinense, representam recursos abundantes e renováveis, disponíveis em grande escala e amplamente distribuídos, sendo uma maneira prima muito atrativa para gerar esse portador de energia, explorando seu papel na descarbonização e sustentabilidade energética.

Este estudo também se concentra na análise da capacidade atual de produção de H₂ no estado de Santa Catarina (SC) através da rota tecnológica mais utilizada e madura a nível industrial atualmente (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023), a reforma a vapor do metano (SMR). Considerando o elevado potencial de produção de resíduos biológicos em virtude da importância econômica da suinocultura catarinense, o entendimento acerca da viabilidade e do potencial desse estado para a produção do referido biocombustível é fundamental para o desenvolvimento de estratégias e políticas voltadas para a transição energética sustentável.

Neste contexto, SC vislumbra no H₂ uma poderosa matriz energética. Com um olhar voltado para a descarbonização e o impulso à economia verde, o estado se posiciona para alavancar a produção de H₂ abundantemente disponível. Essa estratégia não só promete mitigar emissões de carbono, mas também impulsionar setores-chave como transporte e indústria, conferindo sustentabilidade e inovação à economia catarinense, ao mesmo tempo em que fomenta o desenvolvimento regional e fortalece a posição de SC na vanguarda da transição energética no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Investigar a literatura científica e técnica relacionada ao uso do H₂ como fonte de energia com foco em suas aplicações atuais e potenciais, das vantagens e desafios associados, considerando seu importante papel na transição para uma matriz energética mais sustentável.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar e investigar os possíveis arranjos tecnológicos emergentes para a obtenção do H₂, com ênfase na utilização de matéria prima oriunda da atividade suinícola.
- Analisar o panorama geral de desenvolvimento do H₂ no Brasil e em SC, compilando informações sobre políticas públicas relevantes que afetam a produção, distribuição e uso do H₂ como fonte de energia
- Avaliar o potencial de produção de H₂ para fins energéticos no Estado de SC a partir da reforma do biogás proveniente dos resíduos biológicos oriundos da atividade suinícola.
- Avaliar a eficiência ecológica da reforma a vapor do biogás e o nível de poluição associado a um processo de produção

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EMERGÊNCIA CLIMÁTICA E A CRISE SOCIOAMBIENTAL

O Homo sapiens emerge como proeminente agente de transformação na complexa trama da ecologia global, impelido por nossa singular habilidade de esculpir e manipular o ambiente conforme nossas conveniências, em paralelo a um crescimento populacional vertiginoso em um mundo de atividades econômicas globalizadas. Desde os primórdios da civilização, temos engendrado tecnologias e métodos agrícolas, desbravado vastas extensões de florestas, erguido cidades e infraestruturas, e explorado os recursos naturais numa escala sem precedentes (HARARI, 2018). Tais atividades transformaram paisagens inteiras, perturbaram os ciclos naturais e reverberaram na biodiversidade que permeia todo o globo.

Oficialmente vivemos em uma era chamada Holoceno. Mas talvez seja melhor chamar a era que cobre os últimos 70 mil anos de Antropoceno: a era da humanidade. Durante este milênio o Homo sapiens tornou-se o mais importante fator individual de mudança da ecologia global. É um fenômeno sem precedentes. Desde o surgimento da vida, há cerca de 4 bilhões de anos, uma única espécie jamais havia mudado sozinha a ecologia global (HARARI, 2016, p. 80).

Atualmente há um grande consenso entre a comunidade científica de que as atividades antropogênicas, especialmente aquelas relacionadas à emissão de GEE, como o dióxido de carbono (CO₂), estão fazendo o clima do planeta mudar em um compasso aterrador. A incerteza persiste sobre a quantidade segura de CO₂ que podemos liberar na atmosfera sem desencadear consequências irreversíveis e, com base em análises científicas, é previsto que a menos que sejam reduzidas drasticamente a emissão de GEE nos próximos vinte anos, a temperatura média global aumentará em 2°C (HARARI, 2018). É de crucial importância ressaltar que, segundo Cechin (2010), a meta de 2°C acima da temperatura média, estabelecida antes da Revolução Industrial, se justifica como o patamar a partir do qual a mudança do clima se torna perigosa em razão das consequências negativas para os ecossistemas, a biodiversidade e o suprimento de água e alimentação.

Todavia, para evitar que a temperatura do planeta tenha um aumento superior a 2°C acima do nível pré-industrial até o final do século, seria crucial reduzir, até 2050, as emissões globais de CO₂ para 15% do nível de emissões do ano-base de 2000 (CECHIN, 2010), algo que se torna a cada novo ano uma realidade menos factível em virtude do crescente aumento das taxas globais de emissão de GEE, provenientes em grande parte do setor energético. Para Harari (2018), o homo sapiens dispõe de muito pouco tempo para se desapegar dos

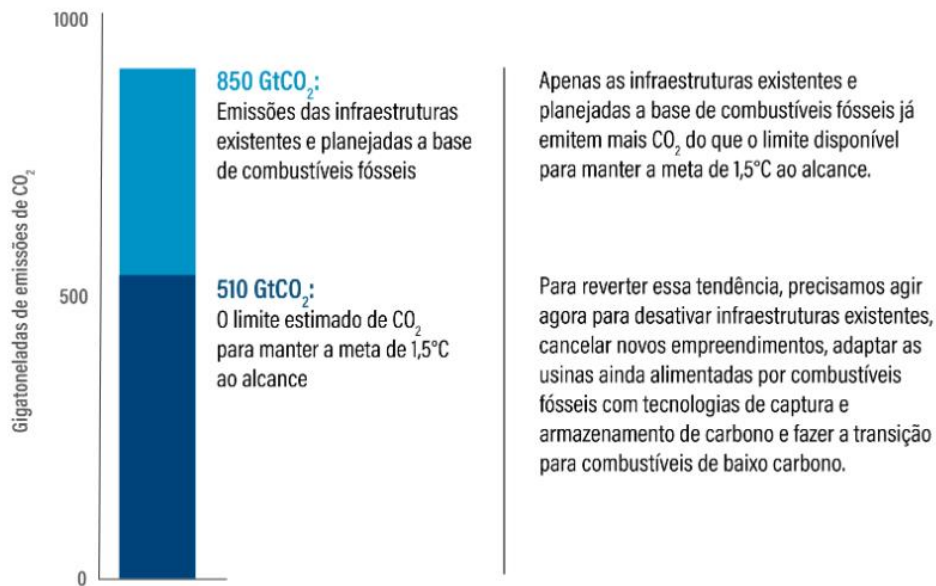
combustíveis fósseis, necessitando iniciar, não no ano ou mês que vem, mas hoje um radical processo de desintoxicação ambiental.

O meio imprescindível para atingir este propósito é a transição de base energética utilizada abundantemente na contemporaneidade, ou seja, a mudança de uma matriz energética centrada nos combustíveis fósseis para outra com baixas ou nulas emissões de carbono, fundamentada em fontes renováveis. Apesar de, num primeiro plano de análise, essa transição abrupta de direcionamento aparentar ser algo disruptivo para a evolução da espécie humana, o processo de transição energética não é inédito na história da humanidade. Em períodos anteriores, testemunhamos transformações significativas, como a transição da madeira para o carvão no século XIX, ou mesmo do carvão e máquinas a vapor para motores de combustão interna (ciclos Otto e diesel), motores elétricos e energia nuclear a partir do século XX (GOLDEMBERG & LUCON, 2012). O que distingue essa transição das precedentes é a necessidade premente de preservar o planeta diante da mais grave ameaça já enfrentada, exigindo ação imediata.

O atual contexto reivindica que os membros signatários da UNFCCC (Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas) centralizem os compromissos adotados em suas NDCs no sentido da pronta descarbonização de suas economias nacionais, implementando diversas ações e fortalecendo suas estratégias para permitir assim zerar as emissões líquidas de carbono até 2050. Para o setor energético, especificamente, relatórios do IPCC destacam a necessidade de expandir a produção de fontes de energia de baixa emissão e o uso de eletricidade e de portadores alternativos de energia, visando reduzir significativamente o consumo de combustíveis fósseis.

Em escala global, as emissões de GEE aumentaram ao longo da última década, atingindo 59 gigatoneladas de CO₂ equivalente (GtCO₂e) em 2019 - um aumento de cerca de 12% em relação a 2010 e 54% em relação a 1990 (SCHUMER et al., 2022). De acordo com o relatório do IPCC, em cenários que visam limitar o aquecimento global a 1,5°C (com ou sem excedente), restam apenas 510 gigatoneladas (Gt) líquidas de CO₂ que podem ser emitidas até atingir a neutralidade de carbono por volta de meados do século (2050-2055). No entanto, as projeções das emissões futuras de CO₂ provenientes da infraestrutura de combustíveis fósseis existente ou planejada (Figura 1) indicam que as emissões podem atingir 850 Gt, ou seja, 340 Gt acima desse limite (SCHUMER et al., 2022).

Figura 1 - Emissões de CO₂ para empreendimentos a base de combustíveis fósseis e os limites para as emissões globais.

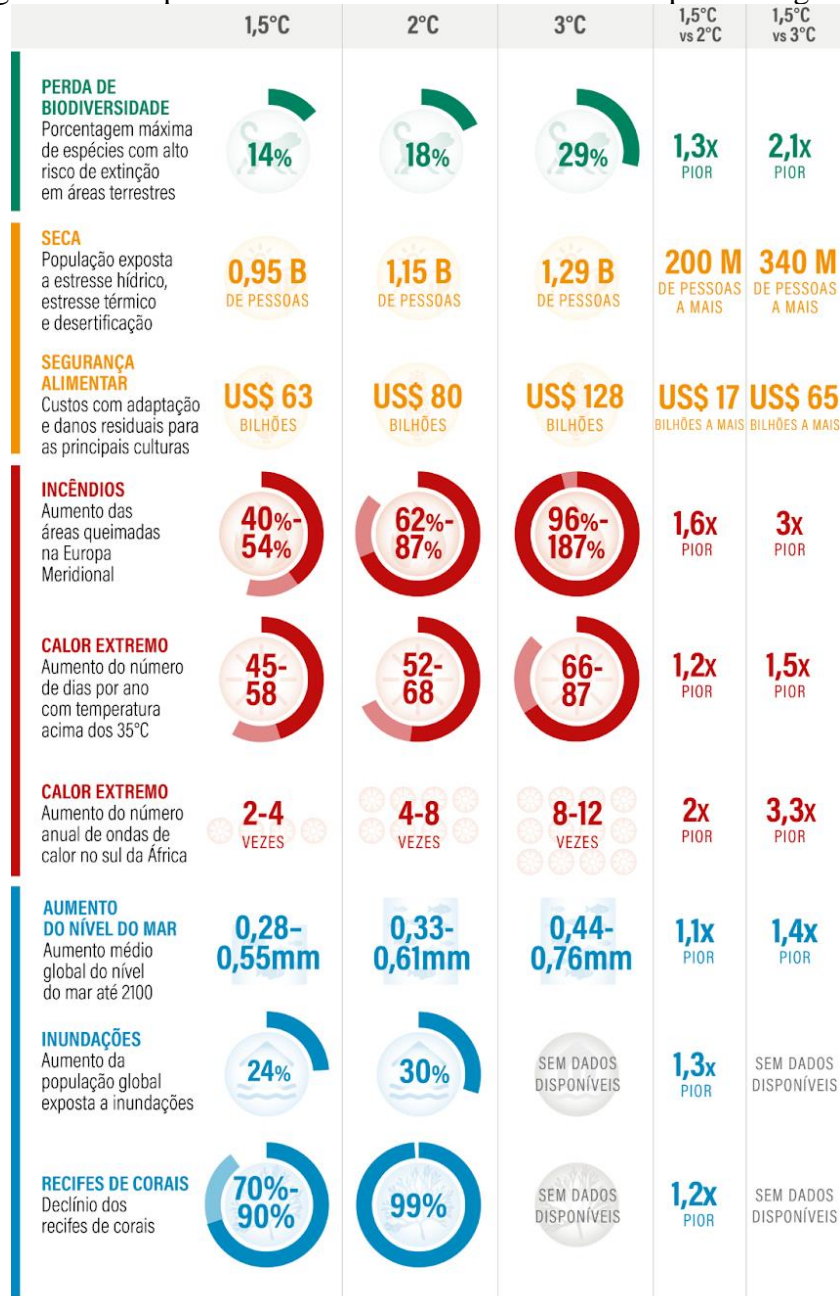


Fonte: Schumer et al. (2022)

Nos cenários que visam limitar o aquecimento global a 1,5°C (sem ultrapassar esse limite ou mesmo com uma ínfima margem excedida), é previsto, segundo relatório do IPCC, a diminuição do uso de carvão em 95% até 2050, do petróleo em 60% e da gasolina em cerca de 45% (SCHUMER e BOEHM, 2023). Estas projeções consideram a ampla adoção de tecnologias de mitigação, como a captura e armazenamento de carbono (CCS). Em contrapartida, sem essas tecnologias, esses mesmos cenários indicam declínios ainda mais acentuados até meados do século. Por exemplo, espera-se que o uso global de carvão sem a implementação de CCS seja praticamente eliminado até 2050 (SCHUMER e BOEHM, 2023).

O aumento das temperaturas ampliará ainda mais o impacto dessas mudanças. Cada aumento de 0,5°C na temperatura global, por exemplo, resultará em aumentos notáveis na frequência e na intensidade do calor extremo, tempestades e secas (SCHUMER e BOEHM, 2023). Por exemplo, as ondas de calor, que ocorrem em média uma vez a cada dez anos em climas pouco influenciados pela atividade humana, tendem a se tornar 4,1 vezes mais frequentes com um aumento de 1,5°C na temperatura global, 5,6 vezes mais frequentes em um cenário de aumento de 2°C e 9,4 vezes mais frequentes com um aumento de 4°C na temperatura global. (SCHUMER e BOEHM, 2023). A Figura 2 traz um breve comparativo dos riscos do aumento das temperaturas globais.

Figura 2 - Comparativo dos riscos do aumento das temperaturas globais



Fonte: Schumer e Boehm (2023)

É crucial restringir tanto a ultrapassagem do limite de 1,5°C em termos de tempo quanto de magnitude para garantir um futuro seguro e habitável. O objetivo é manter o aumento da temperatura o mais próximo possível ou abaixo de 1,5°C. Mesmo que haja uma ultrapassagem desse limite até o final do GEE para evitar um aquecimento ainda mais intenso e os impactos adversos associados a esse aumento permanece inalterada. (SCHUMER e BOEHM, 2023).

2.1.1 Os desafios da transição energética e descarbonização catarinense

O estado de SC se destaca de forma única no panorama nacional. Conforme constatado no Relatório de Balanço Energético Nacional (2023), aproximadamente 31,57% da energia produzida em SC é gerada por termelétricas e 25,41% da eletricidade catarinense tem como fonte energética o carvão mineral. No ano de 2022, a região carbonífera situada ao sul do estado foi responsável pela produção de 2.941 toneladas de carvão mineral, representando cerca de metade da produção nacional desse recurso.

A mineração de carvão na região sul de SC ao longo de mais de muitas décadas resultou em expressivos danos ambientais, motivando inúmeras ações por parte do Ministério Público visando restauração dos locais degradados, compensação dos residentes afetados e aprimoramento da segurança estrutural dos pontos de extração do minério. Os municípios situados na região carbonífera de SC se destacam por serem os principais emissores de GEE do estado. Para alcançar a neutralidade das emissões até 2050, é imprescindível que o estado busque alternativas viáveis para o setor, levando em consideração não apenas a geração de energia elétrica, mas também os diversos impactos sociais, econômicos e ambientais associados ao processo de descarbonização.

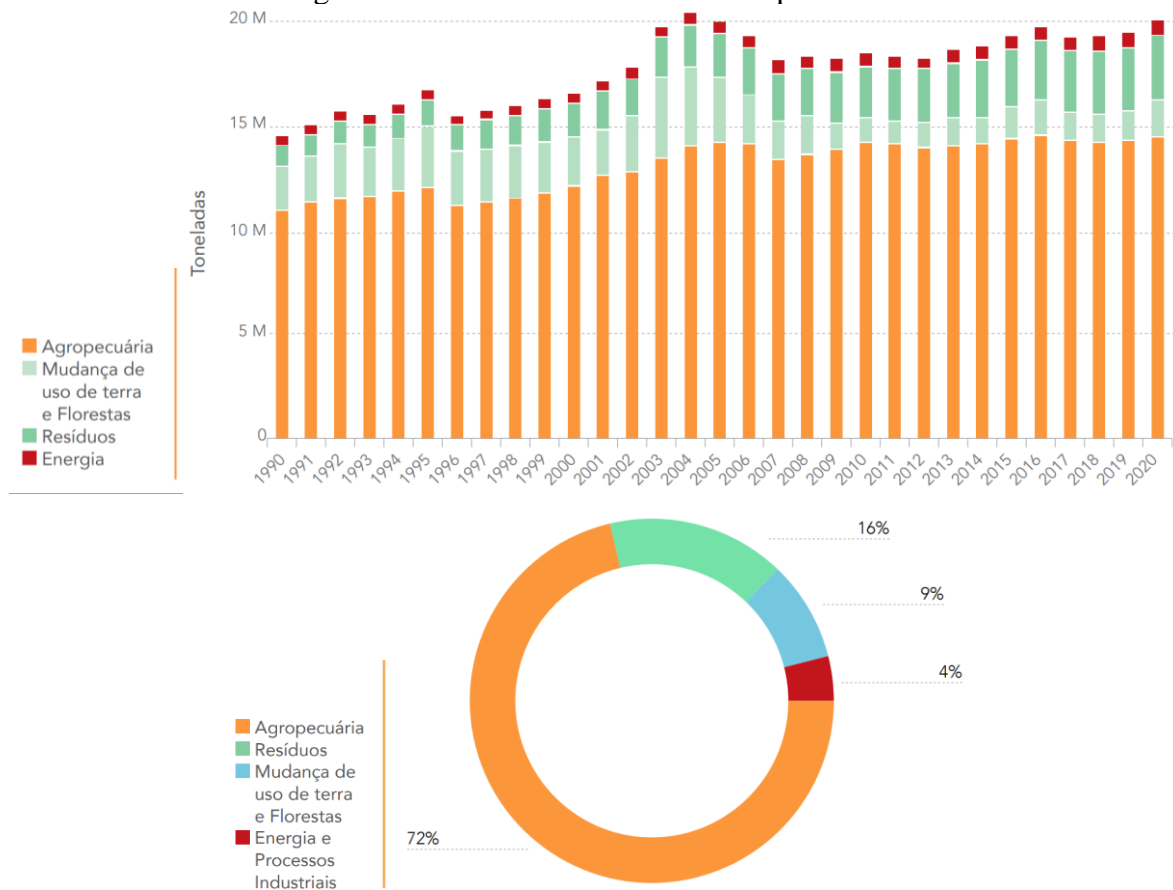
Por outro lado, a agropecuária também contribui para a geração de passivos ambientais em SC. Embora ocupe a vigésima posição em extensão territorial entre os estados brasileiros, representando aproximadamente 1,1% do território nacional, o estado é constantemente destaque na produção agropecuária do país. Análises mostram que o Valor da Produção Agropecuária (VPA) catarinense de 2020 foi de R\$40,9 bilhões, sendo o maior da história, superando o recorde anterior, alcançado em 2017 (EPAGRI/CEPA, 2021), sendo o estado responsável por liderar o ranking nacional de produção de carne suína, concentrando 27,02% dos abates e 27,13% do peso total das carcaças em 2019 (EPAGRI/CEPA, 2021).

A pecuária é reconhecida como uma atividade de elevado impacto ambiental, devido, entre outros fatores, à sua contribuição significativa para a emissão de gases poluentes, odores e considerável quantidade de resíduos produzidos. Em virtude disso, sua relevância substancial na concepção econômica de SC tem feito desta uma das principais fontes de emissão de GEE no estado, sobretudo devido aos extensos rebanhos de bovinos, suínos e aves existentes.

Dentre os principais GEE que a pecuária é responsável por produzir, destaca-se o gás metano (CH₄), que apresenta potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o CO₂ e tempo de vida na atmosfera de 9 a 15 anos. (MACHADO et al., 2011). Ainda segundo Machado

et al. (2011), a produção de CH₄ resulta da fermentação anaeróbica da matéria orgânica em ambientes alagados, fermentação entérica, tratamento anaeróbio de resíduos animais e queima de biomassa. Segundo o Observatório do Clima (2022), o CH₄ é atualmente o principal GEE emitido pelo setor agropecuário, e suas fontes de emissão podem ser classificadas conforme as atividades produtivas de pecuária e agricultura. Na pecuária, as emissões do CH₄ provêm principalmente dos rebanhos e do manejo dos dejetos animais, contabilizadas pelos subsetores de fermentação entérica e gestão dos dejetos, respectivamente. No ano de 2020, o setor agropecuário brasileiro, foi responsável por emitir um total de 14,54 milhões de toneladas de CH₄ (14,54 MtCH₄), representando 71,8% das emissões nacionais desse gás (Figura 3) e um aumento de 1,4% em comparação ao ano anterior. (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022)

Figura 3 - Emissões de CH₄ no Brasil por Setor.

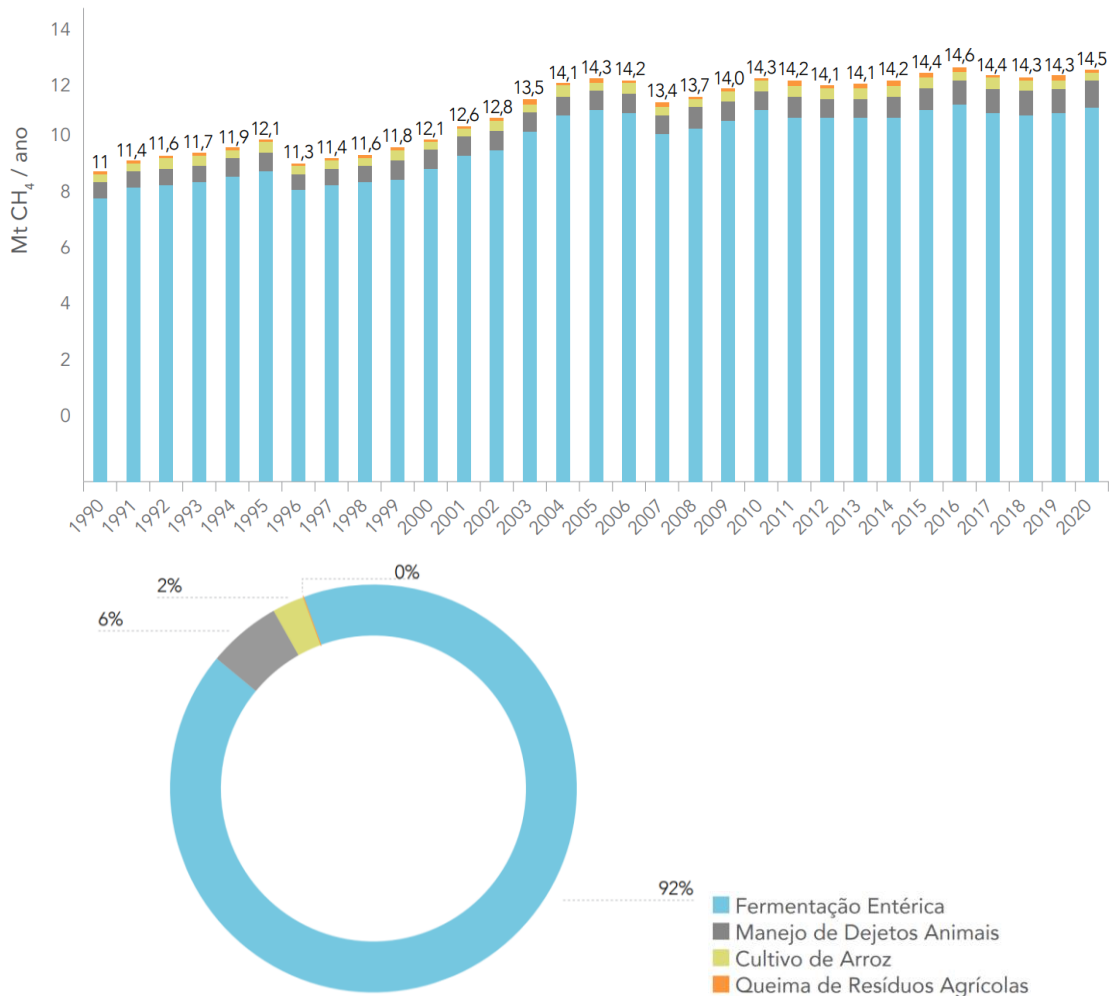


Fonte: Observatório do Clima (2022)

O manejo dos dejetos animais, ainda decorrente da atividade pecuária, foi o segundo maior emissor de CH₄ no ano de 2020, conservando esta posição historicamente atrás apenas da fermentação entérico dos rebanhos (Figura 4). Neste mesmo ano, manejo dos dejetos animais

alcançou sua maior emissão, totalizando 0,85 MtCH₄ e representando 5,8% das emissões totais do setor agropecuário. O rebanho de suínos destacou-se como a principal fonte de emissão do gás neste setor econômico, contribuindo com 0,39 MtCH₄, equivalente a 45,6% das emissões observadas. (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2022)

Figura 4 - Emissão de CH₄ na agropecuária.



Fonte: Observatório do Clima (2022)

O desmatamento para expansão de áreas agrícolas, o uso excessivo de agrotóxicos e fertilizantes químicos, e a má gestão dos resíduos da produção animal são algumas das práticas que podem resultar em degradação ambiental, perda de biodiversidade e contaminação dos recursos hídricos. Além disso, a intensificação da produção agropecuária pode aumentar a pressão sobre os ecossistemas naturais, aumentando significativamente a emissão de GEE.

2.2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO

A utilização do H_2 como meio para armazenamento de energia não é uma concepção inédita, nem mesmo recente na história. A primeira vez que esse elemento, amplamente discutido na contemporaneidade, foi registrado remonta a 1671, quando Robert Boyle descreveu sua experiência intitulada 'New Experiments Touching the Relation Betwixt Flame and Air'. Nessa pesquisa, Boyle obteve um gás inflamável como resultado da dissolução do ferro em ácidos diluídos (CASTRO et al., 2023).

Aproximadamente um século mais tarde, coube ao físico e químico franco-britânico Henry Cavendish a coleta desse gás e a descrição da experiência para a Real Sociedade de Londres. Cavendish identificou dois gases, os quais nomeou como "ar inflamável" e "ar sustentador da vida", que se combinavam com a colaboração de uma centelha elétrica para produzir água. A nomenclatura dos gases utilizados (hidrogênio e oxigênio) foi atribuída posteriormente pelo químico francês Antoine Lavoisier no ano de 1785, ao replicar a experiência anterior de Henry Cavendish (CASTRO et al., 2023).

A primeira produção de H_2 por eletrólise da água ocorreu em 1800 por Nicholson e Carlisle e sua liquefação foi obtida por James Dewar em 1889. Em 1800, os ingleses Nicholson e Carlisle utilizaram pela primeira vez a eletrólise da água para produzir o H_2 , sendo sua liquefação obtida por James Dewar em 1898. Em 1839, um cientista britânico, Sir William Robert Grove, desenvolveu a primeira célula de combustível movida a H_2 (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2019), antecipando o que se tornaria futuramente o principal dispositivo para conversão deste fluido em energia elétrica.

O átomo do H_2 , elemento químico representado pela letra H, é constituído por apenas um próton e um elétron, distinguindo-se dos demais elementos. Devido à sua natureza eletropositiva, é comumente posicionado no início do grupo I (metais alcalinos). No entanto, em determinadas circunstâncias, seu comportamento assemelha-se ao dos halogênios, aceitando um segundo elétron e formando um íon mono negativo (MORAES, 2022). O H_2 molecular é composto por dois átomos que estão unidos, compartilhando seus dois elétrons entre si por meio de uma ligação covalente.

O H_2 é atualmente intensa base de debates e pesquisa, sendo amplamente reconhecido como um potencial combustível limpo e economicamente viável para a economia do futuro. Esse reconhecimento é fundamentado em sua natureza própria, sendo o elemento químico inodoro, inflamável e incolor mais abundante no universo, (constituindo mais de 90% de todos

os átomos) e devido à sua reatividade, só existe na Terra em compostos como a água e em materiais orgânicos (OSMAN et al., 2022).

É considerado pela literatura científica como o elemento mais leve, com peso molecular de $2,016 \text{ g.mol}^{-1}$, apresentando o mais elevado teor energético conhecido (poder calorífico ou valor calorífico) entre todos os combustíveis (ABE et al., 2019). O H_2 é também reconhecido por sua notável capacidade de armazenar energia. Cálculos demonstraram que a energia contida em 1 kg de H_2 é aproximadamente 120 MJ (=33,33 kWh), excedendo assim o dobro da maioria dos combustíveis convencionais (ABE et al., 2019). A Tabela 1 demonstra um comparativo da carga energética do H_2 e de outros combustíveis alternativos.

A carga energética do H_2 para o valor de aquecimento mais elevado é de $141,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a 298 K, sendo o valor de aquecimento mais baixo do hidrogénio de 120 MJ.kg^{-1} a 298 K, o que é muito superior ao da maioria dos combustíveis apresentados na Tabela 1, como por exemplo a gasolina convencional ($46,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a 298 K para valor de aquecimento mais elevado). No entanto, o H_2 líquido possui uma densidade energética por volume menor do que a apresentada em combustíveis de hidrocarbonetos, como a gasolina mencionada anteriormente, por um fator de quatro (ou seja, o hidrogénio tem densidade de 8 MJ.L^{-1} , enquanto a gasolina tem uma densidade de 32 MJ.L^{-1}) (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2019). Desta forma, tem-se no H_2 gasoso uma ótima densidade energética por peso, mas uma baixa densidade energética por volume em relação aos hidrocarbonetos.

Tabela 1 - Comparativo do conteúdo energético de algumas fontes energéticas.

Combustível	Conteúdo energético (MJ.Kg^{-1})	
	Menor valor de aquecimento	Maior valor de aquecimento
Hidrogénio gasoso	119.96	141.88
Hidrogénio líquido	120.04	141.77
Gás natural	47.13	52.21
Gás natural liquefeito (GNL)	48.62	55.19
Gás de destilação (em refinarias)	46.89	50.94
Petróleo bruto	42.68	45.53
Gás de petróleo liquefeito	46.60	50.14
Gasolina convencional	43.44	46.52
Gasolina reformulada ou com baixo teor de enxofre	42.35	45.42
Gasóleo convencional	42.78	45.76
Gasóleo com baixo teor de enxofre	42.60	45.56
Carvão (base húmida)	22.73	23.96
Carvão betuminoso (base húmida)	26.12	27.26

Carvão de coque (base húmida)	28.60	29.86
Metanol	20.09	22.88
Etanol	26.95	29.84

Fonte: Adaptado de Abe et al. (2019)

2.3 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO E SEU PAPEL NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

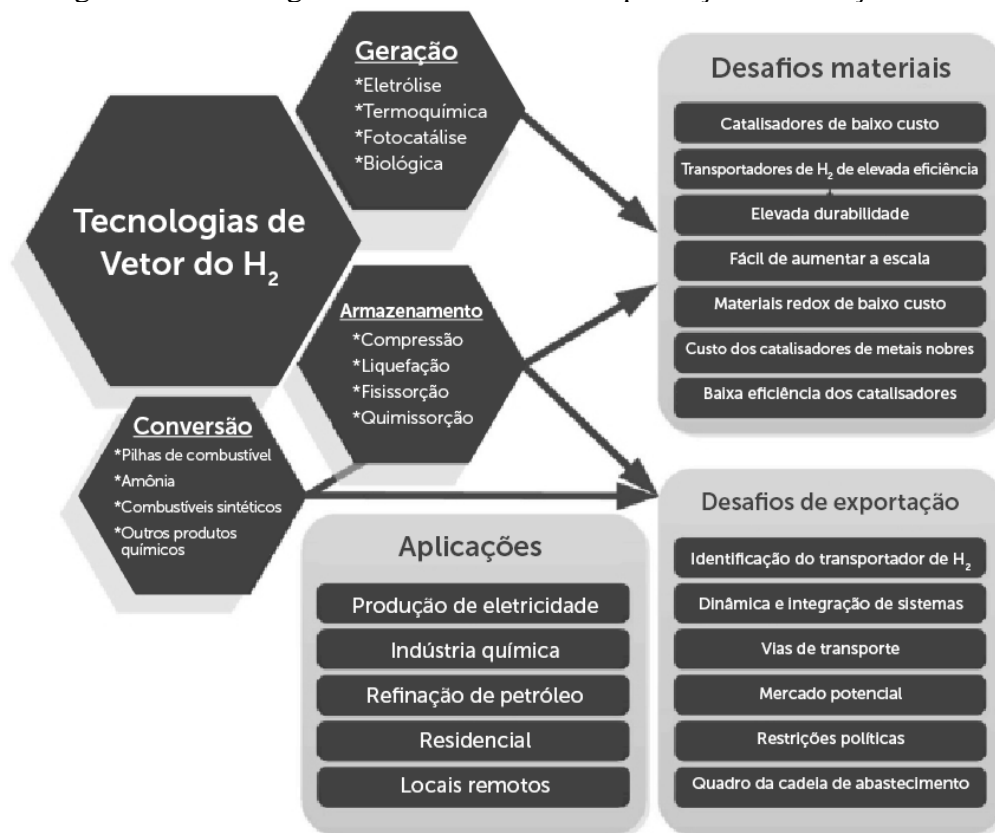
Transitando em um momento crucial da história, as sociedades humanas se encontram diante de enormes desafios ambientais e energéticos sem precedentes. Se medidas sérias não forem tomadas para mitigar esses desafios, a qualidade de vida no planeta será insuportável tanto do ponto de vista econômico quanto da saúde pública, devido à prevalência de problemas crônicos de saúde que emanam da contaminação perigosa do ar (ABE et al., 2019). Atualmente, há um reconhecimento crescente, por parte da comunidade científica e engenheiros, da urgência em reavaliar e substituir o modelo vigente de dependência dos combustíveis fósseis, visando a adoção de fontes de energia ambientalmente limpas, acessíveis e sustentáveis como solução para os novos desafios globais que se apresentam.

Em virtude de suas características excepcionais, o H_2 emerge como uma opção ideal e promissora para servir como um portador de energia sustentável num futuro próximo. A concepção hipotética de um sistema no qual o hidrogênio desempenha o papel principal como vetor energético é referida como “Economia do Hidrogênio” ou “Sistema de Energia do Hidrogênio” (ABE et al., 2019). O propósito central de uma economia baseada em H_2 é a produção majoritária desse elemento a partir de fontes energéticas amplamente disponíveis, com o intuito de ser empregado nos setores industrial, residencial, comercial e de transporte.

Todavia, a utilização do H_2 como um vetor energético não deve ser considerada em si como o objetivo final, mas sim como um vetor em torno do qual devem ser construídas infraestruturas significativas, especialmente para o transporte de longa distância e exportação. O H_2 é atrativo devido às suas propriedades, podendo ser utilizado em um sistema energético totalmente neutro em termos de carbono. Entretanto, sua produção continua a ser ainda mais custosa do que as atuais vias de produção a partir de combustíveis fósseis, e o armazenamento e transporte para os usuários finais são também mais desafiadores e caros (ŁUKAJTIS et al., 2018). Desta maneira, é fundamental considerar processos tecnológicos, socioeconômicos e ambientalmente viáveis e benignos para a produção de H_2 , visando estabelecer uma economia baseada nesse elemento para os futuros sistemas energéticos.

Para que a "economia do hidrogênio" seja efetivamente exequível, é de suma importância amplo investimento em pesquisas, visando superar obstáculos tecnológicos. Além disso, são essenciais inovações políticas que incentivem a exportação de energia com emissões de carbono nulas (ŁUKAJTIS et al., 2018). Ainda segundo Łukajtis et al (2018), os desafios no desenvolvimento desta economia podem ser categorizados em três questões centrais: produção/geração, armazenamento/transporte e conversão. Na Figura 5 são pormenorizados os desafios técnico-econômicos propostos pelo autor.

Figura 5 - Tecnologias de base e desafios na produção e utilização de H₂.



Fonte: Adaptado de Abdin et al (2018)

A transição para uma economia baseada no H₂ se constitui num processo de grande complexidade, pois, em muitos países do globo, a indústria dos combustíveis fósseis precisará passar por uma profunda reestruturação para viabilizar a mudança para uma sociedade com usos de recursos mais sustentáveis (ŁUKAJTIS et al., 2018). Todas as opções e vias tecnológicas, sejam elas renováveis ou não renováveis, disponíveis para transição energética do H₂, devem considerar o impacto das mudanças climáticas nos setores produtivos, a disponibilidade de matérias-primas necessárias para a produção de energia verde e dispositivos tecnológicos, além

da capacidade de cada país de inovar, desenvolver e integrar cadeias de valor em torno do H₂ “verde” (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023).

2.3.1 Perspectivas para a economia do H₂ em Santa Catarina

O Brasil figura entre os países mais bem posicionados na produção de H₂ de baixa emissão de carbono. (BRASIL, 2022). Ainda segundo o Ministério de Minas e Energia do Brasil (2002), este cenário é favorecido pela composição predominante de fontes renováveis na matriz elétrica nacional, juntamente com os custos reduzidos na geração de energia via eólica *onshore* e solar fotovoltaica. Em conjunto com o constante desenvolvimento da infraestrutura de transmissão de energia, esses fatores posicionam o Brasil de maneira proeminente em projeções internacionais para a produção econômica de H₂ com baixa emissão de carbono, com os menores custos associados do mundo (BRASIL, 2022).

Possuindo um histórico habitual de investimentos públicos na área de tecnologia, apoiado por iniciativas de órgãos governamentais como o Ministério da Ciência e Tecnologia e o Ministério de Minas e Energia, o Brasil através da concepção do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂), busca impulsionar investimento em pesquisa e desenvolvimento do H₂, posicionando este tema entre os assuntos de maior prioridade para investimentos em pesquisa e desenvolvimento no país (BRASIL, 2022). A Figura 6 revela os principais marcos temporais da estratégia brasileira para o desenvolvimento da economia do H₂ presente no PNH₂.

Figura 6 - Marcos temporais da estratégia brasileira para a economia do hidrogênio.

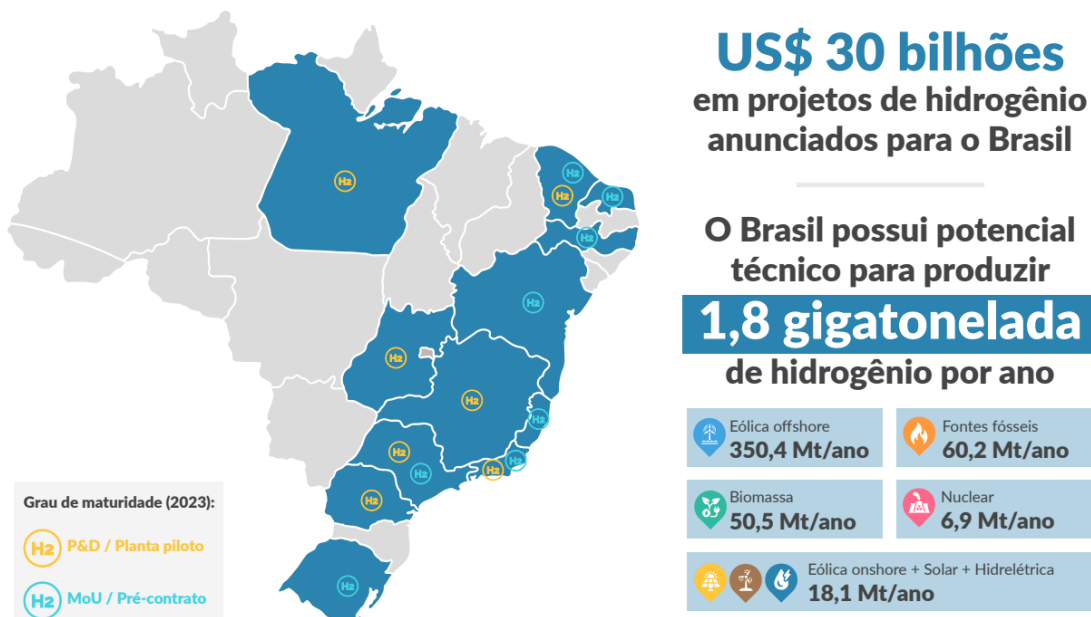


Fonte: Brasil - Ministério de Minas e Energia do Brasil (2022)

A variedade de recursos energéticos no Brasil proporciona várias possibilidades para impulsionar a economia do hidrogênio utilizando distintas vias tecnológicas. Segundo o Plano

Decenal de Expansão de Energia 2031 (BRASIL, 2022), estima-se que o Brasil tenha um potencial técnico para produzir até 1,8 gigatoneladas de hidrogênio por ano, incluindo fontes energéticas que ainda precisam de avanços tecnológicos para serem comercialmente viáveis. Levando em conta as tecnologias que já estão em operação no Brasil e aquelas que já são economicamente viáveis em outros países, o potencial técnico brasileiro para produção de H₂ é avaliado em mais de 480 megatoneladas por ano (BRASIL 2022)

Figura 7 - Potencial técnico de produção de H₂ no Brasil com projetos de anunciados.



Fonte: Brasil - Ministério de Minas e Energia do Brasil (2022)

Como podemos observar na Figura 7, SC ainda se encontra fora dos projetos de H₂ anunciados para o Brasil. A ausência de programas governamentais e de investimentos direcionados para pesquisa, desenvolvimento e implementação de tecnologias relacionadas ao H₂ pode ter desestimulado o surgimento de projetos nessa área no estado. A falta de uma infraestrutura adequada para armazenamento, distribuição e utilização de H₂ também pode ser um obstáculo significativo.

A inauguração da primeira usina de H₂V (Hidrogênio Verde) em Santa Catarina, em meados do ano de 2023, marcou um importante marco no desenvolvimento da tecnologia de H₂ no estado e no Brasil como um todo. Esta iniciativa foi realizada pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em colaboração com parceiros da Alemanha, representando um esforço conjunto de cooperação científica e tecnológica entre os dois países (SETIC/UFSC, 2023).

A economia do H₂ em SC apresenta perspectivas promissoras, beneficiando-se dos recursos naturais disponíveis e do potencial inovador do estado. Mediante investimentos estratégicos e implementação de políticas públicas adequadas, o estado tem o potencial de se destacar como um centro de excelência na produção e aplicação do H₂, desempenhando um papel crucial na transição em direção a uma economia mais sustentável e resistente.

O estado catarinense abriga instituições de pesquisa e desenvolvimento tecnológico reconhecidas em âmbito nacional, as quais têm o potencial de contribuir significativamente para o progresso das tecnologias associadas ao H₂. Investimentos direcionados à pesquisa e inovação têm o poder de estimular o desenvolvimento de soluções tecnológicas avançadas, elevando a competitividade do setor.

2.3.2 Aplicação do H₂ na mobilidade urbana

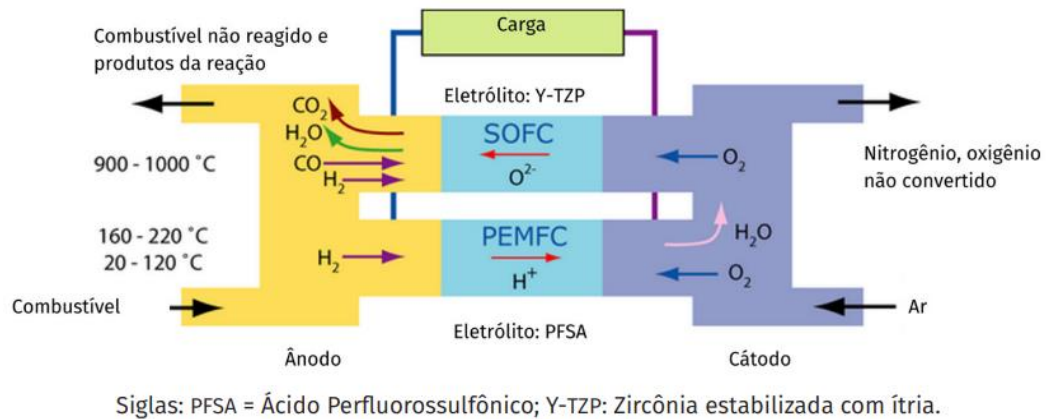
A discussão em torno da mobilidade urbana está passando por transformações significativas à medida que as preocupações ambientais e a busca por soluções energéticas mais limpas ganham notoriedade. Um dos primeiros segmentos estratégicos a serem impulsionados no mercado de hidrogênio é o da mobilidade, que engloba a fabricação e a promoção do uso de veículos movidos a células a combustível (CASTRO et al., 2023).

Células a combustível (CAC) são dispositivos que possuem como princípio a capacidade de converter energia química, presente em combustíveis, em energia elétrica e calor, porém sem recorrer à combustão via reação eletroquímica. Seu funcionamento assemelha-se muito à descarga de uma bateria, possuindo internamente dois eletrodos: um negativo (ânodo) e um positivo (cátodo), os quais são separados por um meio condutor (eletrólito) (GABRIEL, 2020). No ânodo, ocorre a separação das moléculas de H₂ do combustível em prótons e elétrons. Enquanto os elétrons atravessam um circuito externo, gerando corrente elétrica, os prótons atravessam a membrana em direção ao cátodo. No cátodo, os prótons se recombinaem com os elétrons e com o oxigênio (fornecido diretamente ao cátodo), resultando na geração de água e calor como subprodutos da reação (GABRIEL, 2020).

Atualmente, encontra-se disponível, em maior ou menor escala de produção, diferentes tipos de CAC, cada uma com diferentes combinações de eletrólito-eletrodos buscando otimizar sua operação para diferentes contextos. As CAC mais comuns são as SOFC (Células a Combustível de Óxido Sólido) e as PEMFC (Células a Combustível de Membrana Polimérica)

(GABRIEL, 2020). A Figura 8 ilustra o processo descrito para uma CAC do tipo PEMFC e SOFC que utiliza H_2 como combustível.

Figura 8 - Representação esquemática de células de tipo PEMFC e SOFC.



Fonte: Castro et al. (2023)

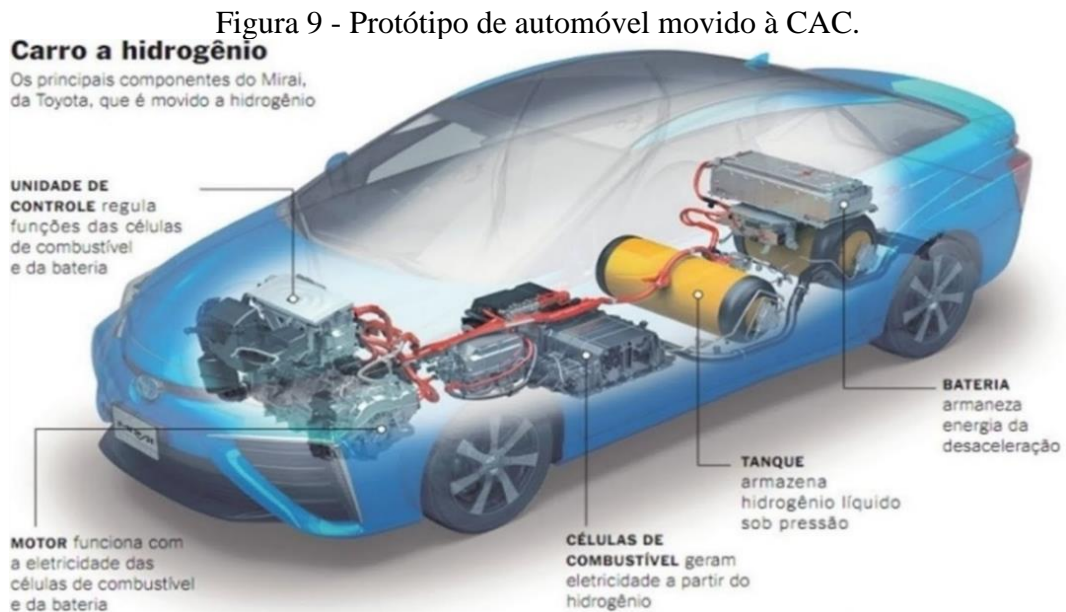
CAC produzem praticamente zero emissões de CO e NO_x durante seu processo de conversão de energia química em elétrica, com emissões reduzidas de CO_2 em comparação com outras máquinas térmicas. Além disso, são notavelmente silenciosas em operação devido à ausência de partes móveis, o que resulta em menor necessidade de manutenção devido ao menor desgaste mecânico em comparação com máquinas térmicas tradicionais. (GABRIEL, 2020).

Quanto à eficiência, algumas CAC alcançam eficiências elétricas de até 55%, podendo atingir valores próximos a 90% quando considerada a cogeração de calor. São também altamente escaláveis (CAC unitárias podem ser compiladas para formar uma pilha de CAC unitárias), permitindo sua utilização em sistemas que vão desde aplicações portáteis até sistemas de geração de vários megawatts. (GABRIEL, 2020). Além disso, possuem alta capacidade de integração em sistemas de armazenamento de energia, visto que o combustível, uma vez reservado externamente, só é consumido quando a CAC é demandada, tornando-as ideais para utilização em situações críticas, geradores de emergência e outras aplicações associadas a armazenamento de longo prazo. (GABRIEL, 2020).

A propulsão para qualquer classe de veículo a hidrogênio baseia-se em um conjunto de subsistemas que compreende: um tanque de hidrogênio pressurizado ou um sistema interno de produção de hidrogênio a partir da reforma de um combustível capaz de produzir hidrogênio; uma célula a combustível que transforma a energia contida no hidrogênio em energia elétrica; um banco de baterias; e, motores elétricos que tracionam o veículo. Como em qualquer outro sistema de propulsão veicular, há necessidade de uma eletrônica embarcada de controle que integra os subsistemas mencionados. O papel da célula a combustível é manter o banco de baterias com

energia suficiente para acionar os motores elétricos. Dessa forma, o veículo não necessita de paralisações para carregamento das baterias, dependendo apenas do dimensionamento do tanque de hidrogênio ou do combustível a ser reformado para definir a sua autonomia. (CASTRO et al, 2023, p. 217).

As CAC têm potencial para serem aplicadas em diversos aspectos da mobilidade urbana. Isso inclui o transporte de passageiros como os veículos automotores, ônibus e serviços de transporte compartilhado, onde oferecem uma opção de transporte limpa e eficiente, contribuindo significativamente com a qualidade do ar nos centros urbanos. Além disso, podem ser utilizadas no transporte de cargas, como caminhões e vans, proporcionando uma alternativa de baixa emissão para entregas e logística urbana. Ademais, empresas e instituições podem integrar veículos movidos a CAC em suas frotas corporativas, ajudando a reduzir as emissões de carbono associadas às operações e proporcionando economia de custos a longo prazo. É possível observar na Figura 9 um protótipo de veículo automotivos movido à CAC.



Fonte: Engenharia 360, 2022.

2.3.3 Aplicação do H₂ na Indústria

O processo de refino do petróleo e a fabricação de fertilizantes nitrogenados são duas das atividades industriais que, em escala global, mais consomem H₂. Os fertilizantes nitrogenados, em particular, necessitam da amônia anidra (NH₃), que é produzida através da reação entre o H₂ e o nitrogênio disponível no ambiente. Portanto, a fabricação de amônia

demanda grandes volumes de H₂, sendo este obtido principalmente através da SMR (CASTRO et al., 2023).

No Brasil, dentre os nichos que se evidenciam como grandes consumidores do H₂, encontra-se o ramo de produção de amônia e refino de petróleo. Contudo, as potencialidades de emprego do H₂ também se estendem a outros ramos industriais, como o de cimento, alimentos e óleos, produção siderúrgica, mineração e de vidro, para mencionar alguns dos mais significativos (CASTRO et al., 2023).

Grandes empresas como a Petrobras, Fosfertil, Braskem e Proquigel são responsáveis pela produção nacional de fertilizantes nitrogenados. Todavia, o país, em especial o agronegócio, ainda é muito dependente da importação de fertilizantes, especialmente os nitrogenados, importando cerca de 60% do volume requerido (CASTRO et al., 2023). Outro agravante, diz respeito à logística de transporte, que desempenha um papel crucial no mercado de fertilizantes.

2.4 MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DAS ROTAS DE PRODUÇÃO DO H₂

Devido à motivação popular impulsionada pelas metas de descarbonização, as diversas modalidades de produção ou obtenção de H₂ frequentemente abordadas na literatura, foram categorizadas em estruturas cromáticas com base na matéria-prima principal utilizada e no processo de produção. Nesse contexto, do ponto de vista técnico, segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, (2021) seria mais apropriado distinguir as diferentes maneiras de obtenção do H₂ por meio de um índice que reflita a pegada de carbono associada à sua produção. Porém, usualmente tem-se buscado diferenciar os processos de produção através do uso de jargões relacionados à distinção de cores. Dada a variação nas definições da classificação do H₂ por cores de acordo com as referências em estudo, os critérios adotados nem sempre são uniformes, e diferentes publicações frequentemente atribuem cores específicas para descrever o H₂ obtido por processos distintos (EPE, 2021).

Até a data desta pesquisa, não foi identificada na literatura uma taxonomia de rótulos definitiva e robusta para o H₂ produzido por diferentes tecnologias, nem jargões de mercado estabelecidos para todas as rotas disponíveis para estudo. Portanto, de acordo com a proposta da Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021), sugere-se atribuir a cor musgo ao H₂ produzido a partir de biomassa e biocombustíveis, com ou sem CCUS (captura, utilização e

armazenamento de carbono), por meio de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica, com variações de tons de verde que podem variar de 'amarronzado', em casos de alterações significativas do uso do solo, a 'esverdeado', em situações de carbono nulo ou negativo. A Figura 10 apresenta a classificação adotada neste estudo, apresentando a maioria das rotas de produção de H₂.

Figura 10 - Classificação do H₂ em uma estrutura cromática.

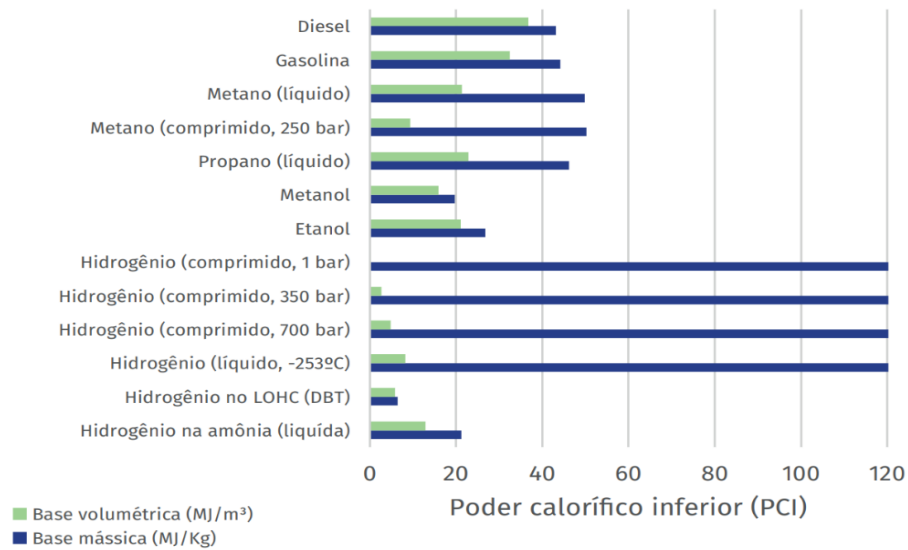
Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
□	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021).

2.5 LOGÍSTICA DE ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DO H₂

A atual mudança de perspectivas do uso de fontes de energia fósseis e finitas para os meios renováveis e intermitentes, está tornando inequívoca a necessidade de implementação de métodos inovadores para armazenamento do potencial energia gerada, garantindo equilíbrio entre oferta e demanda. Voltando as atenções para o foco desta pesquisa, o tema mais urgente e desafiador quanto ao armazenamento de H₂ diz respeito ao desenvolvimento de mecanismos de armazenagem seguros, confiáveis, eficientes e eficazes, tendo em vista a baixa densidade volumétrica de energia do H₂, apesar da sua elevada densidade gravimétrica (CASTRO et al., 2023). Para exemplificar o importante desafio proposto anteriormente, é possível observar na Figura 11 um breve paralelo das densidades volumétrica e gravimétrica de alguns dos diversos combustíveis conhecidos e utilizados na contemporaneidade

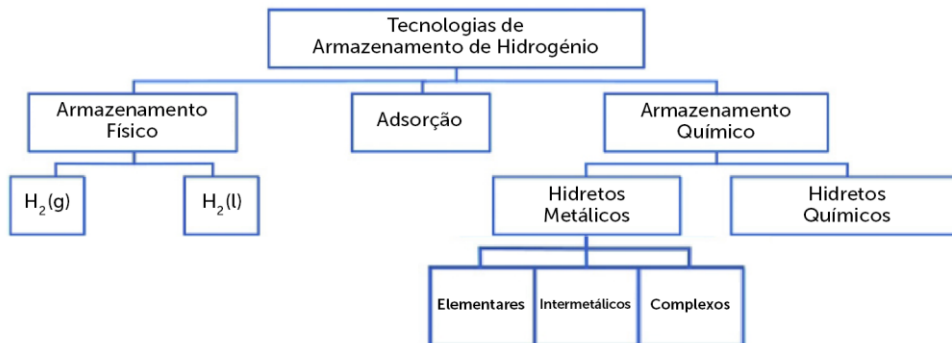
Figura 11 - Comparativo entre densidade volumétrica e gravimétrica de energias dos combustíveis e carreadores de H₂.



Fonte: Castro et al. (2023)

Segundo Anderson e Grönkvist (2019), o H₂ pode ser armazenado de diferentes formas, de acordo com as tecnologias de produção, logística de transporte/distribuição e do uso final existentes. É possível ver na Figura 12 adaptada dos mesmos autores um breve resumo das tecnologias existentes de armazenamento atual

Figura 12 - Tecnologias de armazenamento de H₂.



Fonte: Adaptado de Anderson e Grönkvist (2019)

O H₂ pode ser armazenado no estado gasoso, líquido ou em compostos químicos por longos períodos. A escolha entre recipientes de pressão e outros meios de armazenamento depende da estabilidade dos materiais, das necessidades móveis ou estacionárias do dispositivo, da quantidade de H₂ a ser armazenada, das considerações de segurança estabelecidas, entre outros fatores de suma importância (ANDERSON e GRÖNKVIST, 2019). As principais

características, segundo Nikolaidis e Poullikkas (2017) dos cinco métodos básicos que permitem o armazenamento reversível de H₂ estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Métodos básicos de armazenamento de hidrogênio.

Método de armazenamento	ρ_m (wt%)	ρ_v (kg/m³)	T (°C)	P (Mpa)
H ₂ gasoso a alta pressão	13	40	ambiente	77
Líquido criogênico	-	70.8	-252.87	atmosférica
Adsorvido em nanotubos de carbono	10.8	41	-196.15	6
Adsorvido para formar hidretos	3	150	ambiente	atmosférica
Adsorvido para formar hidretos complexos	18	150	> 100	atmosférica

Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

2.5.1 H₂ comprimido

O armazenamento de H₂ gasoso (GH₂) comprimido à alta pressão é uma das técnicas mais comuns, aprimoradas e amplamente utilizadas devido à sua praticidade e eficiência (WANGHON, 2018). O GH₂ é comumente armazenado em: i) em tanques pressurizados, ou vasos de pressão, construídos com a capacidade de resistir às altas pressões e evitar vazamentos ou reações químicas indesejadas; ii) cilindros, ou recipientes portáteis menores, de alta pressão e frequentemente utilizados para aplicações que exigem mobilidade; iii) cavernas ou cavidade geológicas subterrâneas, exigindo medidas de segurança rigorosas e monitoramento contínuo das condições do meio (CASTRO et al., 2023).

Independentemente do método escolhido, é de suma importância considerar a eficiência energética e os custos associados ao processo de compressão e armazenamento de H₂. Para o setor de transporte, é preferível que o armazenamento tenha baixo peso, baixo custo e alta densidade, e, para as aplicações estacionárias, grande escala e baixo custo (CASTRO et al., 2023). O armazenamento do GH₂ (Figura 13) comprimido oferece vantagens e desvantagens, que devem ser consideradas ao avaliar a viabilidade e eficácia desse método. Como pontos positivos pode-se destacar: i) tecnologia madura; ii) rápida taxa de enchimento; iii) simplicidade da tecnologia. Entre os pontos negativos, citam-se: i) baixa densidade volumétrica de energia; ii) necessidade de eletricidade para compressão, com valor estimado entre 0,7 e 1,0 kWh.kg⁻¹ de H₂ (CASTRO et al., 2023). Analisando de maneira pragmática o último item elencado, à medida que a sociedade procura por abordagens mais sustentáveis e ecologicamente corretas

na utilização de recursos, o consumo elevado de energia durante a fase inicial do processo de compressão destaca a necessidade de explorar novas soluções para o armazenamento.

O desafio atual é reduzir substancialmente as dimensões volumétricas e o peso dos cilindros, enquanto em paralelo, aumenta-se a capacidade de armazenamento. Estas alterações deverão implicar num aumento significativo na pressão interna do sistema (JUNGES, 2019). Desta forma, os tanques de armazenamento de GH₂ têm evoluído muito com novos materiais utilizados como plásticos e fibra de carbono ultra resistentes, que chegam a ser 5 vezes mais leves que os cilindros metálicos (JUNGES, 2019).

Figura 13 - Tanque de armazenamento de H₂.



Fonte: Agência EPBR, 2024

2.5.2 H₂ liquefeito

O armazenamento de hidrogênio liquefeito (LH₂) é uma das abordagens mais comuns para lidar quando se têm como desafio armazenar maiores quantidades de H₂ de forma segura e eficiente, buscando como resultado final maior autonomia energética e economia no transporte, evitando, a necessidade das altas pressões exigidas no armazenamento do GH₂.

A liquefação do H₂ é possível com técnicas de criogenia mantendo-o abaixo de -253°C, consumindo de 30 a 40% da energia obtível do H₂ armazenado (JUNGES, 2019), ou então cerca de 12,5 a 15,5 kWh por kg de H₂ (CASTRO et al., 2023). o que o converte em um líquido altamente denso e de baixo volume em comparação com sua forma gasosa, exigindo tanques isolados termicamente para evitar trocas de calor, tornando esta tecnologia intensiva em capital e em energia (CASTRO et al., 2023).

O transporte de LH₂, ou seja, na forma liquefeita, torna-se viável em situações quando há uma demanda considerável e estabilidade, porém, insuficiente para investimento em

infraestrutura de dutos. Configura-se como escolha ideal para exportação de H_2 por via marítima (CASTRO et al., 2023).

2.5.3 Carreadores de H_2

O conceito desta tecnologia, ao contrário dos métodos tradicionais de armazenamento, que envolvem a compressão ou liquefação do H_2 , visa o emprego de substâncias ou materiais sólidos como suporte para armazenar e o liberar no local do uso final de maneira controlada. É um processo considerado muito seguro, visto que a incidência de alta pressão no sistema ocorre somente durante a mistura dos elementos, podendo a estrutura com H_2 ser mantida, posteriormente, sob pressão ambiente (WANGHON, 2018).

Existem várias classes de materiais que têm sido investigadas para essa finalidade, incluindo hidretos metálicos (Figura 14), onde o H_2 se mistura ao metal formando uma estrutura sólida, materiais porosos, materiais de armazenamento de H_2 baseados em carbono, entre outros (ABE ET AL., 2019). Esses materiais têm a capacidade de absorver e reter H_2 em sua estrutura cristalina ou porosa, semelhante ao caso de uma esponja absorvendo água, por meio de reações químicas reversíveis ou não reversíveis. É possível enumerar dois tipos de substâncias transportadoras: i) não reversíveis, quando o portador não é liberado sem a necessidade de uma outra reação química (exemplos são o metanol, NH_3 e tolueno/metilcicloexano (MCH)); ii) reversíveis, quando após a liberação o portador retorna ao processo de armazenamento. (CASTRO et al., 2023).

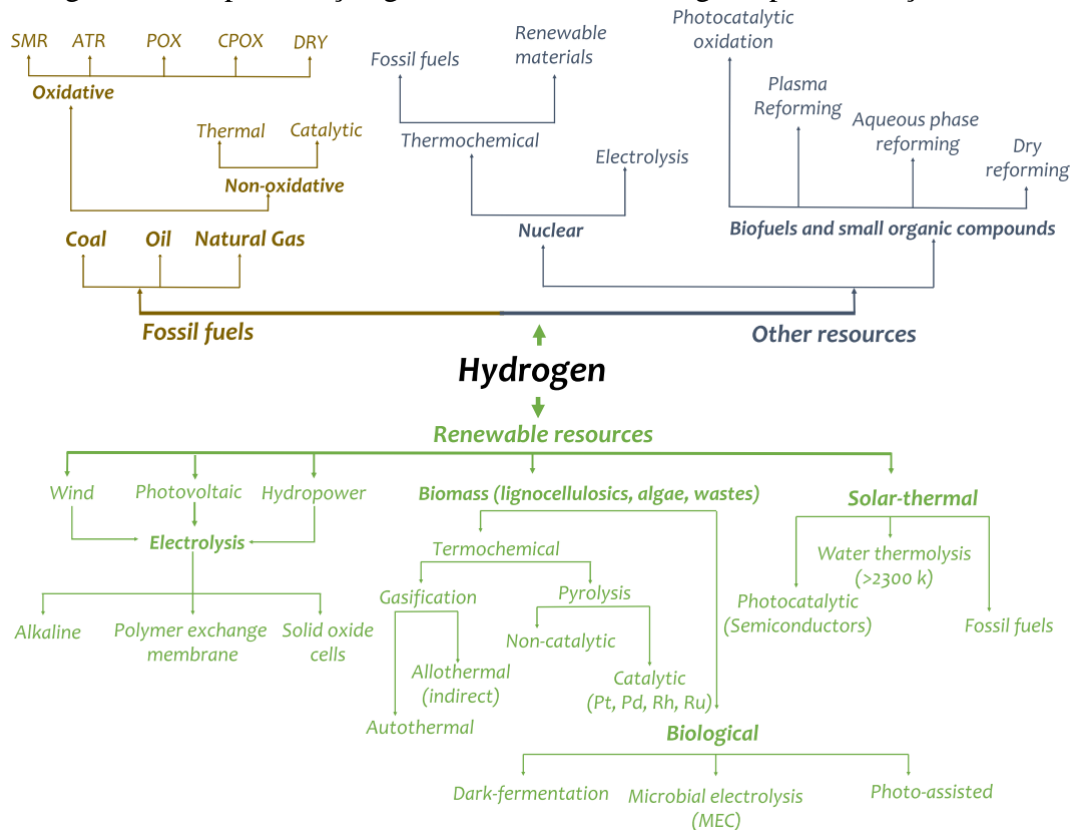


Fonte: Adaptado de Abe et al. (2019)

2.6 PROCESSOS E ROTAS TECNOLÓGICAS DE OBTENÇÃO DO H₂

Este tópico tem como objetivo demonstrar a conclusão de uma extensa revisão de literatura nacional e internacional acerca das diferentes vias tecnológicas existentes (Figura 15) para obtenção do H₂, abrangendo aspectos técnicos e ambientais.

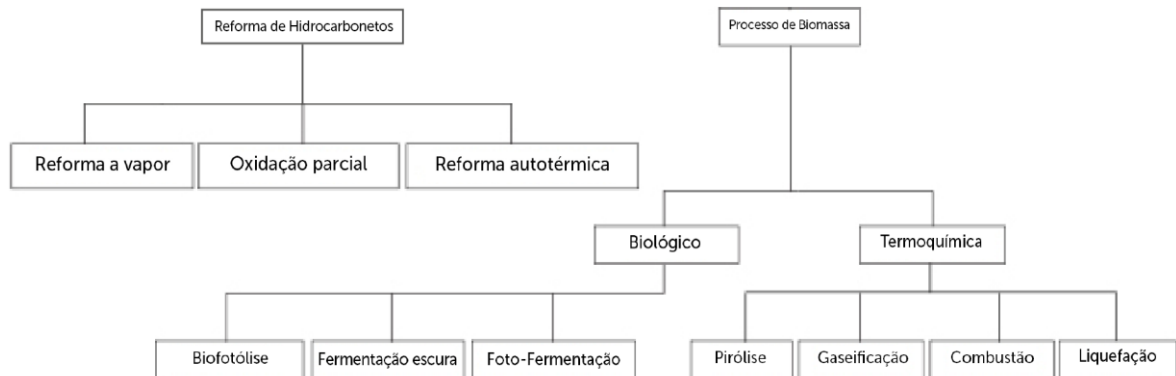
Figura 15 - Representação gráfica das rotas tecnológicas para obtenção de H₂



Fonte: Garcia, Avendaño e Medrano (2023)

Como é possível observar na Figura 15, o H₂ pode ser produzido direta ou indiretamente a partir de recursos renováveis e não renováveis, incluindo métodos eletrolíticos e biológicos, evidenciando um campo de estudo extremamente diversificado que envolve várias técnicas, cada uma com suas vantagens e desvantagens (GARCIA, AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). Todavia, como evidenciado anteriormente, o presente estudo atentou-se a desenvolver conhecimento acerca apenas das rotas tecnológicas que envolvam a reforma de hidrocarbonetos, como o biogás e biometano provenientes da digestão anaeróbia, ou a adoção da biomassa dos dejetos suínos como fonte biológica para produção de gás síntese (Figura 16).

Figura 16 – Rotas tecnológicas de interesse para o presente estudo.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

A primeira classificação, reforma de hidrocarbonetos que envolvam transformação de fontes como o biogás ou biometano, deverá compreender uma tecnologia madura e amplamente estudada conhecida como reforma do metano a vapor (SMR), e outras tecnologias mais emergentes como a oxidação parcial (POX), a oxidação parcial catalítica (CPOX) e a reforma autotérmica (ATR)

A segunda categoria abarca métodos, com aplicações e estudos bem recentes, para a produção de H_2 a partir da biomassa. Ao utilizar biomassa como matéria-prima, esses métodos podem ser subdivididos em duas subcategorias amplas: processos termoquímicos e processos biológicos. A tecnologia termoquímica compreende principalmente pirólise, gaseificação, combustão e liquefação, enquanto os principais métodos biológicos incluem biofotólise direta e indireta, fermentação escura e foto-fermentação. Visando maior entendimento das diferentes rotas tecnológicas disponíveis para produção de gás síntese, a presente pesquisa oferece uma visão geral dos principais processos, com posterior análise comparativa para examinar os aspectos técnicos e econômicos. Os resultados correspondentes estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparativo entre os diferentes processos de produção de H₂.

Processo	Eficiência (%)	Principais vantagens	Principais desvantagens
SR	74–85	Tecnologia mais desenvolvida, infra-estruturas existentes.	Subproduto do CO ₂ , dependência dos combustíveis fósseis.
POX	60–75	Tecnologia comprovada, infra-estruturas existentes.	Subproduto do CO ₂ , dependência dos combustíveis fósseis.
ATR	60–75	Tecnologia comprovada, infra-estrutura existente.	Subproduto do CO ₂ , dependência dos combustíveis fósseis.
CHs pyrolysis	–	Processo em etapas reduzidas e sem emissões.	Subproduto do carbono, dependência dos combustíveis fósseis.
Biomass pyrolysis	35–50	Matéria-prima neutra em termos de CO ₂ , abundante e barata.	Formação de alcatrão, teor variável de H ₂ devido à disponibilidade sazonal e às impurezas da matéria-prima.
Biomass gasification	–	Matéria-prima neutra em termos de CO ₂ , abundante e barata.	Formação de alcatrão, teor variável de H ₂ devido à disponibilidade sazonal e às impurezas da matéria-prima.
Bio-photolysis	10	Consumo de CO ₂ , O ₂ é o único subproduto, funcionamento em condições moderadas.	Formação de alcatrão, teor variável de H ₂ devido à disponibilidade sazonal e às impurezas da matéria-prima.
Dark fermentation	60–80	Neutro em termos de CO ₂ , simples, pode produzir H ₂ sem luz, contribui para a reciclagem de resíduos, sem limitação de O ₂ .	Necessidade de luz solar, baixas taxas e rendimentos de H ₂ , necessidade de um grande volume de reator, sensibilidade ao O ₂ , custo elevado da matéria-prima.
Photofermentation	0.1	CO ₂ -neutro, contribui para a reciclagem de resíduos, pode utilizar diferentes resíduos orgânicos e águas residuais.	Requer a remoção de S, baixas taxas e rendimentos de H ₂ , baixa eficiência de conversão, necessidade de um grande volume de reator.
Electrolysis	40–60	Sem poluição com fontes renováveis, tecnologia comprovada, infra-estrutura existente, matéria-prima abundante, O ₂ é o único subproduto, contribui para a integração das fontes de energia renováveis como opção de armazenamento de eletricidade.	Requer luz solar, baixas taxas e rendimentos de H ₂ , baixa eficiência de conversão, necessidade de grande volume de reator, sensibilidade ao O ₂ .
Thermolysis	20–45	Limpo e sustentável, matéria-prima abundante, o O ₂ é o único subproduto.	Baixa eficiência global, elevados custos de capital.
Photo-electrolysis	0.06	Sem emissões, matéria-prima abundante, o O ₂ é o único subproduto.	Toxicidade dos elementos, problemas de corrosão, custos de capital elevados.
			Necessita de luz solar, baixa eficiência de conversão, material fotocatalítico não eficaz.

Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullickas (2017)

2.6.1 Produção de H₂ a partir da reforma de hidrocarbonetos

Atualmente existem diferentes tecnologias responsáveis pela produção de H₂ utilizando-se de combustíveis fósseis (como a gasolina, hidrocarbonetos, metanol ou etanol), sendo as principais rotas conhecidas a reforma e a pirólise de hidrocarbonetos. Estas rotas tecnológicas para produção do gás síntese são as mais desenvolvidas e utilizadas globalmente, satisfazendo a quase totalidade da procura por produção de H₂ (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017).

O processamento do CH₄ encontrado no gás natural é a tecnologia mais comum para produção comercial de H₂ através de combustíveis fósseis, correspondendo a uma fatia de 48% da produção total, frente aos 30% por óleos pesados e nafta e 18% do carvão (KALAMARAS e EFSTATHIOU, 2013; NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017). Ainda que exista um debate incessante sobre o fim da utilização dos combustíveis fósseis na produção energética, estes ainda mantêm um papel dominante no abastecimento mundial de H₂, uma vez que os custos de produção estão fortemente correlacionados com os preços dos combustíveis, que ainda se mantêm a níveis aceitáveis (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017).

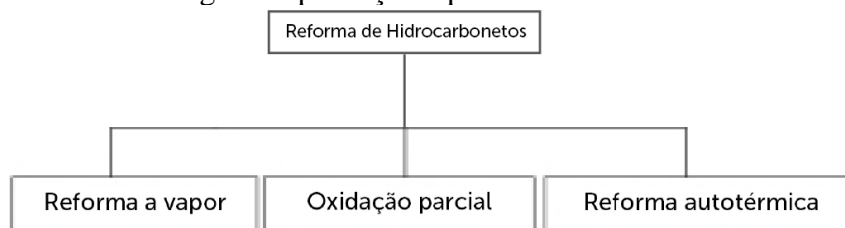
O H₂ "musgo", proveniente de biomassa e biocombustíveis, como o biogás, representa uma opção promissora de produção de H₂ renovável, potencialmente com uma pegada de carbono negativa quando combinado com técnicas de CCS (captura e armazenamento de carbono). O H₂ derivado do biogás, pode ser uma alternativa ambiental e economicamente mais

viável do que o H₂ verde eletrolítico, uma vez que utiliza uma variedade de substratos orgânicos, como resíduos urbanos e industriais, ou ainda resíduos provenientes de atividades agropecuárias, constituindo uma fonte de energia renovável (BNDES, 2022).

O biogás, por ter uma rica composição de CH₄ e CO₂, demonstra ampla versatilidade para ser utilizado nas rotas PtX (conversão de energia renovável, em combustíveis líquidos ou gasosos). Essas rotas possibilitam a transformação do biogás em gás síntese, composto essencialmente por CO e H₂, por meio de processos de reforma. Neste processo, é necessário um pré-tratamento para remover o sulfeto de hidrogênio (H₂S), umidade e outras impurezas. Em seguida, o biogás é submetido à reforma, originando o gás de síntese. Por fim, o gás resultante deste processo é submetido a um tratamento por adsorção para assim realizar a separação de impurezas contidas, produzindo uma corrente final de gás composta essencialmente por H₂ (BNDES, 2022).

O benefício de combinar o biogás produzido a partir da digestão anaeróbia e os processos de reforma com CCUS ou CCS para produzir H₂ é que este é 100% renovável com mínimas, ou até mesmo zero, emissões de GEE. Além disso, o CO₂ é capturado durante o processo de produção de H₂ através da implementação de tal integração (HAJIZADEH et al., 2022). Na Figura 17 é possível observar as tecnologias de produção do H₂ e sua matéria-prima associada. A primeira categoria que abrange a reforma de hidrocarbonetos inclui os processos de SMR, POX (e CPOX) e ATR.

Figura 17 - Tecnologias de produção a partir da reforma de hidrocarbonetos.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

2.6.1.1 Fundamentos da Digestão Anaeróbia

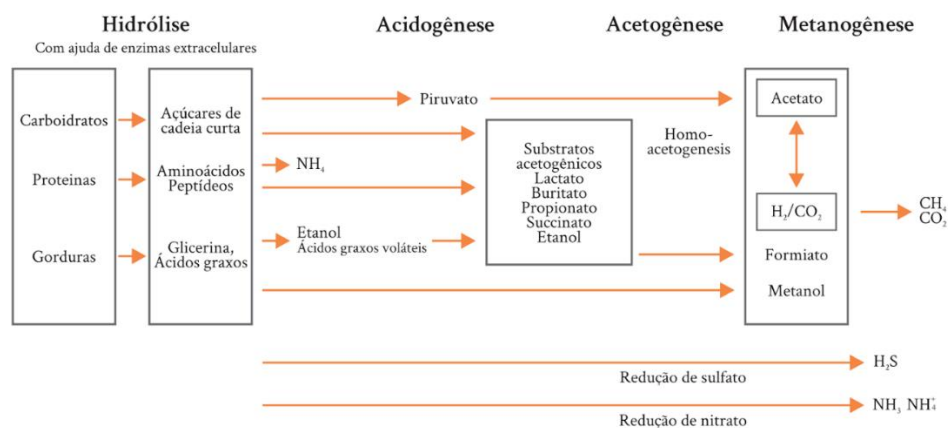
Digestores anaeróbios têm sido amplamente utilizados para o processamento de diversos tipos de resíduos sólidos como o lodo proveniente das ETEs, resíduos oriundos da agropecuária como os dejetos de animais e os resíduos urbanos. A digestão anaeróbia é apontada, segundo Chernicharo (2016), como um ecossistema no qual diferentes conjuntos de

microrganismos operam de forma interativa para transformar matéria orgânica complexa em CH_4 , CO_2 , água, H_2S e amônia, ao mesmo tempo em que geram novas células bacterianas.

Em sistemas de digestão anaeróbio, observa-se que a porção predominante do material orgânico biodegradável existente nos dejetos é transformada principalmente em CH_4 , representando percentualmente cerca de 50% a 70% (CHERNICHARO, 2016). Esse CH_4 é então extraído da fase líquida e liberado do reator na forma gasosa. Somente uma reduzida fração da carga orgânica passa por conversão em biomassa microbiana, representando percentualmente cerca de 5% a 15%. Esse processo resulta na formação do lodo excedente do sistema (CHERNICHARO, 2016).

É oportuno considerar a digestão anaeróbia como um sistema ecológico meticulosamente equilibrado, compreendendo múltiplos processos metabólicos que se seguem em fases sequenciais. Este sistema depende, no mínimo, de três grupos fisiológicos distintos de microrganismos: bactérias fermentativas (ou acidogênicas); bactérias sintróficas (ou acetogênicas); e microrganismos metanogênicos (CHERNICHARO, 2016). O processo de digestão anaeróbia compreende uma sequência de fases bioquímicas para a transformação de matéria orgânica presente dentro do reator. Esse processo se desdobra em quatro fases distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. É possível observar na Figura 18 as rotas metabólicas e fases do processo de digestão da carga orgânica.

Figura 18 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.



Fonte: Kunz; Steinmetz; Amaral (2019) apud Deublein e Steinhauser (2011)

Hidrólise

A decomposição de compostos com expressiva massa molecular, como proteínas, lipídios e polissacarídeos, em substâncias orgânicas mais simples e solúveis ocorre na etapa da hidrólise. Esse procedimento é facilitado pela atuação de enzimas extracelulares excretadas

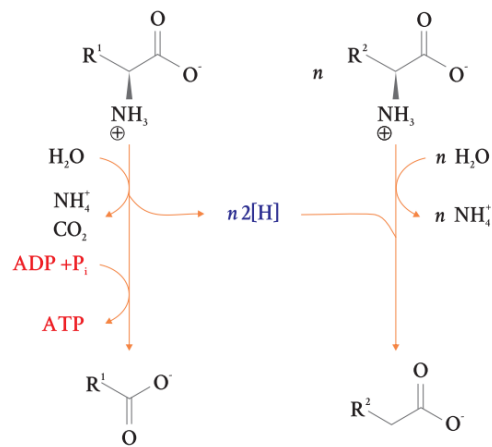
pelas bactérias hidrolíticas (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL; 2019). A relevância da hidrólise na taxa de degradação está correlacionada com as características do substrato em questão, ou seja, quando a matéria orgânica se apresenta complexa e de difícil degradação, esta etapa pode ser considerada como um fator limitante da velocidade da digestão anaeróbia, influenciando significativamente a velocidade global de degradação (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL; 2019). O tempo necessário para a realização da hidrólise alterna conforme as particularidades do substrato, sendo breve para carboidratos e prolongado para proteínas e lipídios.

Acidogênese

Os componentes elementares produzidos durante a fase anterior são empregados como substratos por diversas bactérias anaeróbias e facultativas, sendo decompostos na etapa acidogênica em ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas contendo de 1 a 5 átomos de carbono, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL; 2019). Ainda segundo Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), nesta etapa é de suma importância destacar que a pressão parcial de hidrogênio exerce um impacto direto sobre o estado de oxidação dos produtos, resultando em produtos com maior teor de carbono caso seja excessivamente alta.

Durante a etapa de acidogênese, os carboidratos, como a glicose, sofrem degradação em piruvato. Este composto é convertido em ácido láctico por Lactobacillales e em etanol através da ação de leveduras. Os ácidos graxos são decompostos, por exemplo, pela Acetobacter por meio da β -oxidação. Portanto, os ácidos graxos devem se ligar à coenzima A, e a oxidação acontece progressivamente com a liberação sequencial de duas unidades de carbono na forma de acetato (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL; 2019). Todavia, por meio da reação de Stickland (Figura 19), os aminoácidos são decompostos em pares pelo Clostridium botulinum, na qual um aminoácido atua como doador de elétrons e outro comoceptor. (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL; 2019). Por meio desta reação, tem-se a produção de amônia, acetato, CO₂ e sulfeto de H₂.

Figura 19 - Reação de Stickland, onde um par de aminoácidos é degradado, formando acetato, amônia e CO₂.



Fonte: Kunz; Steinmetz; Amaral (2019) apud Deublein e Steinhauser (2011)

Acetogênese

A fase seguinte e terceira etapa da digestão anaeróbia é conduzida pelas bactérias sintróficas acetogênicas, sendo caracterizada por reações químicas endotérmicas. Estas bactérias, como o próprio nome indica, constituem uma relação sintrófica com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Ácidos de estrutura longa são transformados nesta etapa em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono, com produção simultânea de hidrogênio e dióxido de carbono.

Para Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), as bactérias homoacetogênicas controlam o equilíbrio da reação para o consumo de H₂ e CO₂, resultando na produção de acetato. Para que a constituição de ácidos de cadeia curta seja favorável em termos termodinâmicos, é necessário que isso ocorra em conjunto com o consumo de GH₂ pelos microrganismos metanogênicos. Desta forma, a contínua cooperação entre microrganismos de diferentes grupos microbianos permite que ambos prosperem, garantindo a efetividade da produção de acetato a partir dos ácidos orgânicos (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL; 2019).

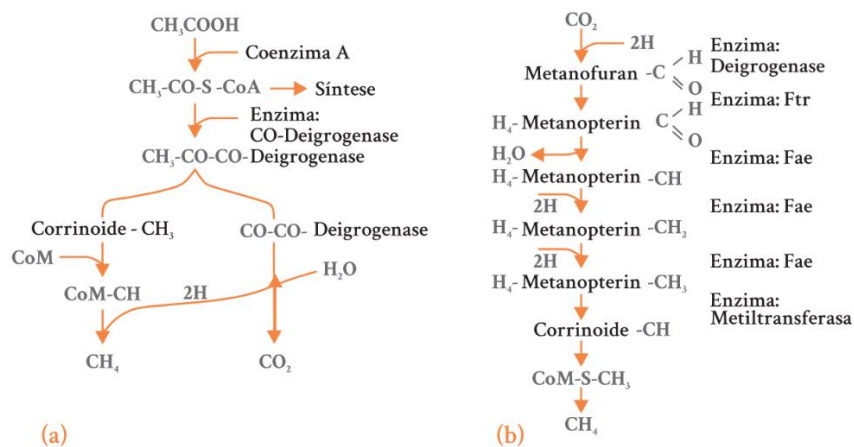
Metanogênese

A fase conclusiva de digestão anaeróbia, conhecida como metanogênese, acontece em ambientes estritamente anaeróbios. Nesse contexto, o carbono presente na biomassa é transformado em CH₄ e CO₂ por meio da atividade biológica das arqueas metanogênicas. As arqueas metanogênicas são categorizadas conforme suas rotas metabólicas, que podem ser acetoclásticas ou hidrogenotróficas (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Apesar de serem poucas as espécies de metanogênicas acetoclásticas capazes de sintetizar o gás metano a partir do acetato, estas são frequentemente os microrganismos hegemônicos na digestão anaeróbia, contribuindo com cerca de 60 a 70% da produção total de metano derivada do grupo metil do ácido acético (CHERNICHARO, 2016). As arqueas metanogênicas acetoclásticas pertencem principalmente aos gêneros *Methanosarcina* e *Methanosaeta*.

Ainda segundo Chernicharo (2016), diferentemente das acetoclásticas, praticamente todas as espécies identificadas de arqueas metanogênicas hidrogenotróficas têm a capacidade de gerar metano usando H_2 e CO_2 , o que conduz a uma liberação de energia mais significativa. As hidrogenotróficas mais comumente encontradas em reatores incluem *Methanobacterium*, *Methanoculleus*, *Methanospirillum*, *Methanocorpusculum* e *Methanobrevibacter* (CHERNICHARO, 2016). Importante ressaltar que ambas as reações descritas acima são de característica exotérmica. As rotas para a concepção de CH_4 via acetato ou CO_2 estão representadas na Figura 20.

Figura 20 - (a) Formação de metano pelo acetato; (b) formação de CH_4 pelo CO_2 .



Fonte: Kunz; Steinmetz; Amaral (2019) apud Deublein e Steinhauser (2011)

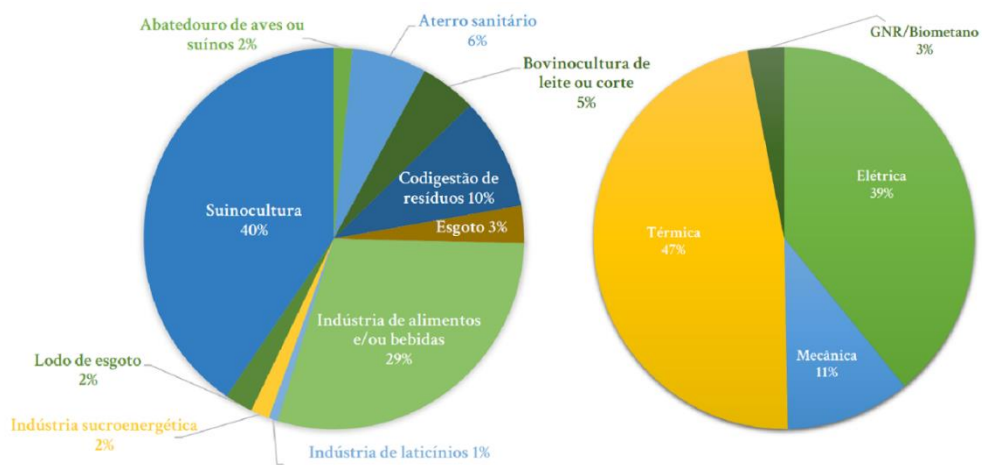
2.6.1.2 Biogás e Biometano

O produto gasoso obtido durante o processo de digestão anaeróbia da biomassa residual, usualmente realizado em equipamentos como os biodigestores, é denominado biogás. Sua composição estrutural é formada basicamente por CH_4 , CO_2 e pequenas concentrações de nitrogênio, oxigênio e H_2S , além de traços de hidrocarbonetos voláteis (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). A produção do biogás a partir da biomassa representa uma

promissora alternativa aos combustíveis fósseis por ser uma fonte de energia renovável atrativa normalmente utilizada para a produção combinada de calor e eletricidade em pequena e média escala (ASHRAFI et al., 2008). Sua aplicação inclui como exemplos o uso direto em sistemas de aquecimento como caldeiras ou aquecedores, na cogeração para produção de eletricidade ou, até mesmo, mediante processos de purificação, na sua conversão em biometano.

Há pelo menos 40 anos, o uso energético do biogás tem sido uma prática no Brasil, tendo sido integrado no modelo da "revolução verde" ocorrida nos anos 70 (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Nos últimos anos, o biogás tem ganhado bastante destaque como fonte de energia nacional, especialmente impulsionado pelo incentivo do mercado de créditos de carbono, que busca reduzir as emissões de CH₄, um componente do biogás que contribui para o efeito estufa (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). A Figura 21 traz um breve panorama nacional dos principais substratos utilizados na biodigestão anaeróbia, além da produção para energia térmica, elétrica, mecânica e produção de biometano/GNV.

Figura 21- Distribuição de substratos utilizados na biodigestão anaeróbia (esquerda) e aplicação energética do uso do biogás (direita) nas usinas brasileiras em operação.



Fonte: Kunz; Steinmetz; Amaral (2019)

A constituição global do biogás (Tabela 4) gerado durante o processo de digestão anaeróbia varia muito dependendo das condições ambientais específicas presentes dentro do reator. Em reatores que operam de forma estável, a composição do biogás produzido tende a manter uma uniformidade razoável (CHERNICHARO, 2016). No entanto, a proporção de CO₂ em relação ao CH₄ pode apresentar variações significativas dependendo de fatores como: i) características do composto orgânico a ser degradado; ii) composição e complexidade do substrato; iii) existência de substâncias inibidoras; iv) interação entre substrato e

microrganismos; v) temperatura e acidez do meio; vi) e potencial de oxidação-redução (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). No processo de digestão de esgotos domésticos, por exemplo, as proporções típicas de CH₄ e CO₂ no biogás são: CH₄: 70 a 80%; CO₂: 20 a 30% (CHERNICHARO, 2016).

Tabela 4 - Composição típica do biogás.

Composição (%)						
	Águas residuais municipais	Resíduos sólidos urbanos	Vinhaças de cana-de-açúcar	Efluente de óleo de palma	Aterro sanitário	Faixa típica
CH₄	50 - 77	50 - 60	50 - 60	50 - 70	30 - 65	50 - 75
CO₂	19 - 45	40 - 50	40 - 50	30 - 40	25 - 47	35 - 55
Oxigênio	0.0 - 2.9	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1 - 5	0.0 - 1.0
Nitrogênio	0.0 - 7.1	0.0 - 5	-	-	1 - 17	0 - 10
H₂	0.0 - 0.01	-	-	-	-	0.01 - 5
H₂S	0.0 - 4800	0.0 - 1300	0.0 - 1300	0.0 - 1300	30 - 500	100 - 30000
Amônia	0.0 - 3.5	-	-	-	2.1 - 380	0.0 - 500
CO	0.0 - 0.01	-	-	-	0.0 - 0.32	0.0 - 0.1
Siloxanos	0.0 - 0.820	-	-	-	0.0 - 24	0.0 - 120

Fonte: Adaptado de Garcia, Avendaño e Medrano (2023)

Outra característica importante do biogás é que à medida que a concentração de CH₄ aumenta no biogás, sua capacidade calorífica também aumenta, enquanto sua densidade diminui. O poder calorífico do biogás contendo cerca de 70% de CH₄ é aproximadamente 23.380 kJ/m³ (6,5 kW/m³) (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). A qualidade de pureza e o teor de CH₄ são os principais elementos a se ponderar em relação ao poder calorífico do biogás. Os principais elementos que prejudicam a eficiência energética do biogás incluem o H₂S, o CO₂ e a NH₃. Na Tabela 5, é possível observar uma breve correlação entre as principais impurezas encontradas no biogás e seus problemas associados.

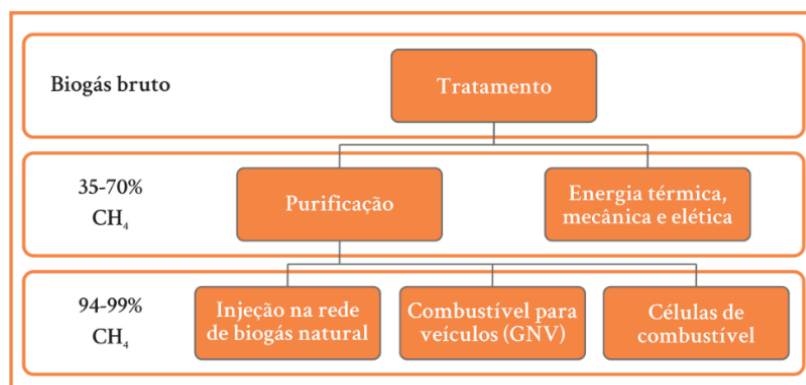
Tabela 5 - Principais impurezas encontradas no biogás.

Contaminante	Problemas
Água	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores pela formação de ácidos com H_2S, NH_3 e CO_2 • Acumulação de água nos dutos • Condensação ou congelamento por pressão
Material particulado	<ul style="list-style-type: none"> • Entupimento pela acumulação em compressores, tanques de combustíveis e motores
Oxigênio	<ul style="list-style-type: none"> • Perigo de misturas explosivas pela elevada concentração de O_2 no biogás
Amônia	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão pela dissolução em água
H_2S	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores • Concentrações tóxicas no biogás ($> 5 \text{ cm}^3.\text{m}^{-3}$) • Formação de SO_x pela combustão
CO_2	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo valor energético
Siloxanos	<ul style="list-style-type: none"> • Formação de SiO_2 e quartzo microcristalino pela combustão • Deposição em velas de ignição, válvulas e cilindros
(Não gerados por resíduos agrícolas) Halogênios	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosão em motores de combustão

Fonte: Adaptado de Kunz; Steinmetz; Amaral (2019)

Nesse cenário, é vital implementar tecnologias de tratamento do biogás (Figura 22) para gerar um combustível de alta qualidade, que possa ser facilmente convertido em energia. Segundo Kunz, Steinmetz & Amaral (2019), no momento presente, os processos de tratamento e purificação do biogás têm dois objetivos principais: ajustar o valor calorífico e remover os contaminantes que comprometem a qualidade e a vida útil dos componentes do sistema; e purificar o biogás e concentrar o biometano para sua integração em redes de distribuição

Figura 22 - Etapas de tratamento e purificação do biogás para concentração do biometano.



Fonte: Kunz; Steinmetz; Amaral (2019)

O valor global do mercado de biogás é estimado em cerca de 26 bilhões de dólares, e projeta-se que alcance os 32 bilhões de dólares até 2027. Em 2018, aproximadamente 60×10^3 m³ de biogás (equivalente a 35 Mtoe) foram produzidos, com os maiores produtores sendo a Europa (54%), a Ásia (30%) e as Américas (14%). Essa capacidade de produção representa cerca de 6% do potencial total de geração de biogás (730 Mtoe) a partir de culturas, biomassa, esterco animal, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e águas residuais (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023).

Nos últimos anos, diversos estudos abordando os processos de reforma do biogás e seu interessante potencial para criação de soluções com maior valor agregado têm sido publicados. Através da reforma a vapor do biogás, pode ser produzido um gás de síntese rico em H₂ do qual os motores a gás amplamente se beneficiam em termos de eficiência e menores emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), se comparado com a combustão direta do biogás bruto (ASHRAFI et al., 2008)

2.6.1.3 Reforma do metano a vapor (SMR)

A reforma a vapor de hidrocarbonetos para obtenção de gás síntese remonta a 1924 e é atualmente o processo mais utilizado a nível industrial para a síntese de H₂ devido à sua elevada eficiência, maturidade tecnológica e baixo custo de operação e produção do gás síntese (KALAMARAS e EFSTATHIOU, 2013). O CH₄ possui uma estrutura molecular tetraédrica com quatro ligações equivalentes (C-H), tornando-o desta forma uma molécula muito pouco reativa; logo, sua conversão em H₂ ocorre mediante altas temperaturas para assegurar assim uma alta eficiência de conversão. A eficiência da reação de reforma é influenciada principalmente pela temperatura, pela pressão do sistema e pela relação vapor/carbono (GARCIA, AVENDAÑO; MEDRANO, 2023).

Esta rota tecnológica envolve basicamente uma conversão catalítica do hidrocarboneto e do vapor em H₂ e óxidos de carbono, e consiste basicamente nas etapas de: i) pré-tratamento da matéria-prima; ii) reação do CH₄ com a água (Equação 1); iii) reação de transferência água-gás (WGS), que é reversível e ligeiramente exotérmica (Equação 2); iv) metanação ou purificação do produto obtido. (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). Ainda segundo Garcia, Avendaño e Medrano (2023), é importante acentuar que a reação do CH₄ com a água sugere uma relação vapor/carbono igual a 1, porém na prática, esta relação pode variar entre 2,5 e 3,0 para minimizar a formação de carbono no catalisador (Equação 3 – 5)

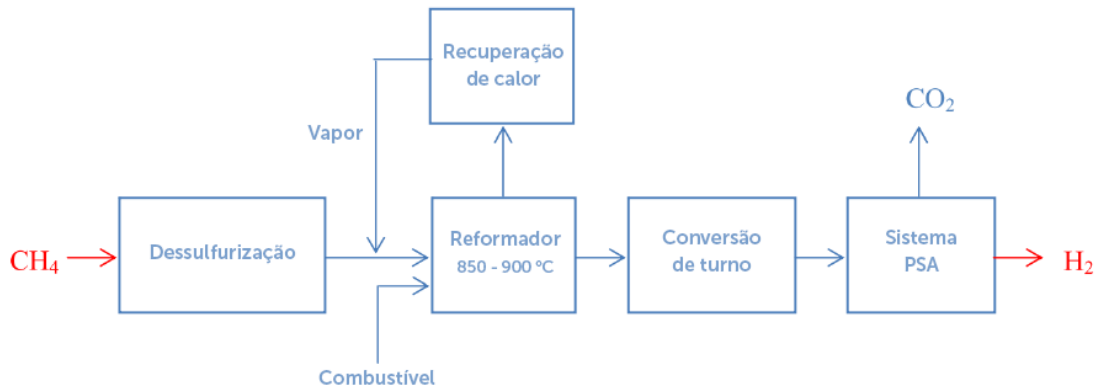


Durante a etapa inicial, a matéria-prima é combinada com vapor e alimentada em um reator catalítico em forma de tubo. Neste processo, é gerado o gás de síntese (uma combinação de H_2 e CO) com uma reduzida proporção de CO_2 (KALAMARAS e EFSTATHIOU, 2013). Nesta etapa é realizada adição de oxigênio para atingir a temperatura ideal da reação e assim realizar a queima de uma fração da matéria-prima dentro do reator.

Na etapa seguinte, o gás do produto, já resfriado, é conduzido a um conversor catalítico de CO , onde ocorre a conversão predominantemente, por meio de vapor, do CO em CO_2 e H_2 . Visando prevenir a desativação do catalisador empregado neste processo tecnológico, a matéria-prima derivada de hidrocarbonetos deve ser livre de compostos que contenham enxofre (KALAMARAS e EFSTATHIOU, 2013).

Apresentando uma eficácia de conversão situada entre 74% a 85%, SMR é o procedimento mais prevalente e avançado empregado para a produção em larga escala de H_2 (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017), seja devido à sua alta eficiência quanto à abundância de CH_4 disponível a partir de reservas de gás natural ou de biogás. No entanto, é importante destacar que o processo requer cuidados ambientais e de segurança, especialmente em relação ao manejo de produtos de reação e emissões de CO_2 , que é um subproduto indesejado do processo (CASTRO et al., 2023). Sob uma perspectiva ambiental, a efetivação plena do uso do H_2 produzido através da reforma a vapor está intrinsecamente ligada à captura do CO_2 produzido nas reações, através de sistemas de CCS, complementados por sistemas de monitoramento e verificação para assegurar a máxima eficácia na captura. (CASTRO et al., 2023). A Figura 23 apresenta um breve fluxograma da produção de H_2 a partir do CH_4 .

Figura 23 - Diagrama de fluxo do processo de SMR.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

O fato de o processo de reforma de hidrocarbonetos operar com temperaturas relativamente baixas, quando comparada às outras tecnologias de reforma, possuir uma alta eficiência de conversão e ter capacidade de ser uma tecnologia que pode ser adotada em uma variedade de fontes de poluição, incluindo resíduos sólidos urbanos e subprodutos da indústria alimentícia e agropecuária, configuram amplas vantagens desta tecnologia (CASTRO et al., 2023). Ademais, a reforma do biogás também emerge como uma alternativa relevante, desde que medidas adequadas sejam tomadas para remover as impurezas presentes no gás, que podem variar de acordo com o tipo de biodigestor empregado, a origem da biomassa e processo de biodigestão anaeróbica utilizado (CASTRO et al., 2023).

O uso de modelos matemáticos indica que a Reforma Catalítica do Biogás (SBR) pode alcançar eficiências energéticas de até 75%, semelhante à eficiência obtida durante o processo de SMR. No entanto, os custos operacionais (SBR: 0,14 US\$.kWh⁻¹ contra SMR: 0,08 US\$.kWh⁻¹) e a pegada de carbono (20 kg CO₂-eqv.kg⁻¹ H₂) apontam para a necessidade de aprimorar as etapas críticas do sistema de produção de H₂ (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). A Tabela 6 traz um breve resumo com dados extraídos de literatura do processo de SMR para obtenção de gás síntese.

Tabela 6 - Resumo do processo de SMR para a síntese de H₂ a partir do CH₄.

Condição operacional	Eficiência (%)	Razão H ₂ :CO	Custo (USD.Kg ⁻¹ H ₂)	Características principais
T = 700-1100 °C P =	75-85	3:1	1.00 ^[1] 1.50 ^[2]	Processo intensivo em energia. A SMR é normalmente limitada pela transferência de massa e calor. É amplamente utilizado para a produção de H ₂ . A intensificação reduz os

3-25 bar				custos e melhora a utilização de energia. Degradação do catalisador devido a pontos quentes. A adsorção de CO ₂ pode retardar a acumulação de carbono na superfície do catalisador. Dependendo da composição da matéria-prima, algumas etapas de purificação devem ser efetuadas.
----------	--	--	--	--

Nota: [1] Sem CCS. [2] Com CCS

Fonte: Adaptado de Garcia; Avendaño; Medrano (2023)

2.6.1.4 Oxidação parcial (POX) e oxidação parcial catalítica (CPOX)

A rota de produção de H₂ através da reforma por POX e CPOX são métodos eficientes e foram concebidos com o intuito de serem empregados em CAC veiculares e em algumas aplicações comerciais de menor escala, especialmente em aplicações onde a geração de calor também é desejada. Estes processos são apropriados tanto para a reforma de CH₄ quanto para a de biogás, contudo são especialmente indicados para frações de óleo pesado, cujo tratamento subsequente e utilização apresentam desafios significativos. (CASTRO et al., 2023).

Entre as principais vantagens da POX estão: i) o sistema de reação é mais compacto; ii) pode utilizar hidrocarbonetos gasosos, líquidos e carvão como matéria-prima; iii) não gera óxidos de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x) devido a fatores operacionais. No entanto, o processo apresenta desvantagens: i) maior consumo de energia; ii) altas temperaturas de operação podem levar à coqueificação, hotspots e sinterização do catalisador; iii) as unidades de produção e purificação de O₂ aumentam os custos de instalação e operação do processo (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). Ainda de acordo com Garcia, Avendaño e Medrano (2023), as Equações (1), (2) e (6 – 11) representam as possíveis reações na POX que ocorrem durante a produção de gás de síntese. Para fins práticos, todas as reações que envolvem O₂ devem consideradas irreversíveis.



O processo POX é considerado não catalítico, no qual a matéria-prima é gaseificada na presença de oxigênio, em ambientes de alta temperatura (1300–1500 °C) e pressão (variando entre 3-8 MPa). A mistura gasosa formada pela POX contém CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, H₂S e oxissulfeto de carbono (COS). (KALAMARAS e EFSTATHIOU, 2013). Os investimentos necessários para realizar a instalação de oxigênio e cobrir gastos suplementares relacionados às etapas de dessulfuração fazem com que essa instalação demande um alto investimento inicial (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017).

A CPOX utiliza um catalisador para aumentar a eficiência e reduzir o consumo de energia do processo. Em teoria, pode ser realizada a pressões e temperaturas moderadamente baixas (700-1000 °C). Ao contrário da POX e da ATR, a reação é catalítica e, portanto, ocorre sem utilização de chama. Devido às características da mistura de combustível e oxidante, é necessário, por questões de segurança, limitar a temperatura da reação, especialmente em pressões elevadas (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). Segundo Garcia, Avendaño e Medrano (2023), as principais reações observadas durante a CPOX do CH₄ incluem as Equações (2), (3), (6 - 13).



Em comparação com a SMR, o processo de POX e CPOX produz uma quantidade mais expressiva de CO, o qual necessita ser posteriormente convertido em H₂ e CO₂. O fato de possuir uma eficiência de conversão térmica menor em comparação com outros métodos, variando entre 60% e 75%, e a operação em altas temperaturas dificulta sua aplicação em reformadores compactos e de menor porte (CASTRO et al., 2023). A Tabela 7 traz um breve resumo com dados de literatura do processo de POX e CPOX para obtenção de gás síntese.

Tabela 7 - Resumo do processo de POX e CPOX para a síntese de H₂ a partir do CH₄.

Processo	Condição operacional	Eficiência (%)	Razão H ₂ :CO	Custo (USD/kg H ₂)	Características principais
POX	T = 1000-1500 °C P = ~ 1 bar	60-75	2:1	~ 1	A produção de gás de síntese através da via POX é uma tecnologia estabelecida. Os pontos quentes têm um efeito negativo na estabilidade do

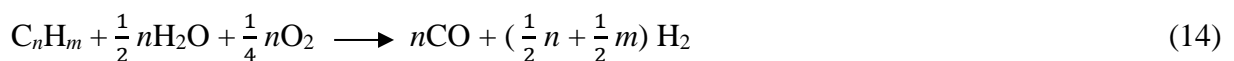
CPOX	T = 700-1100 °C P = 3-25 bar	60-75	2:1	~ 1	catalisador. Os reatores POX têm um arranque rápido. Custo elevado do oxigênio puro e da fase de purificação. Desenvolvido para lidar com uma variedade de fontes de hidrocarbonetos. O nível de enxofre deve ser baixo.
------	---	-------	-----	-----	--

Fonte: Adaptado de Garcia; Avendaño; Medrano (2023)

2.6.1.5 Reforma autotérmica (ATR)

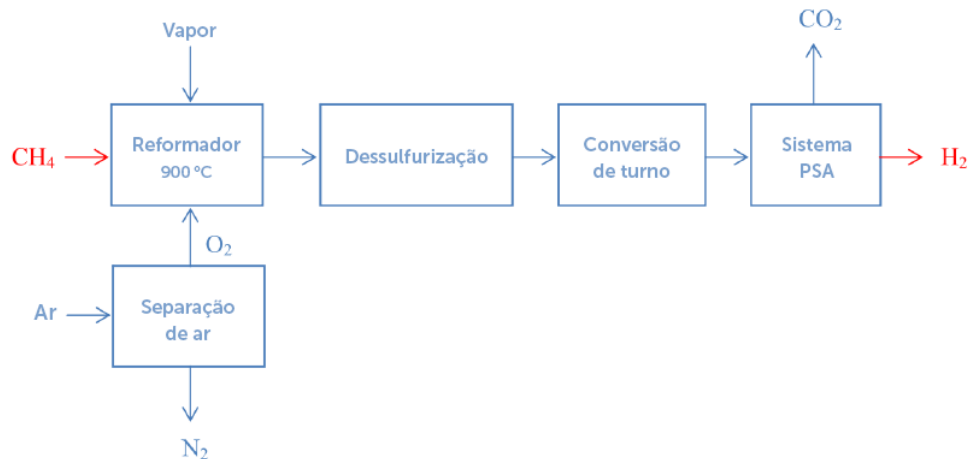
A ATR foi desenvolvida entre as décadas de 1930 e 1950 para a síntese de amônia, combinando dois processos em um único reator: a SMR e a POX, ou a POX e a reforma a seco (DR). Esta rota tecnológica envolve a introdução de vapor no processo de CPOX, correspondendo a uma combinação de processo endotérmico (SMR, DR) com a reforma por POX com O₂ (processo exotérmico), fazendo com que as reações de reforma e de oxidação ocorram simultaneamente, permitindo assim o ajuste na relação H₂/CO, alterando a proporção H₂O/O₂ na alimentação e diminuindo a necessidade energética do ATR (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023).

O processo de ATR para a produção de gás de síntese é constituído basicamente por um queimador, uma câmara de combustão e um leito catalítico. Quando a reação de reforma e a de combustão ocorrem simultaneamente no leito catalítico, o reator resultante é consideravelmente mais compacto, tornando-o um atrativo para aplicações em CAC (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). Por outro lado, quando as reações acontecem em seções distintas, como POX seguido de SMR, esses sistemas são mais apropriados para a produção de combustíveis líquidos (GARCIA; AVENDAÑO; MEDRANO, 2023). De acordo com Nikolaidis e Poullikkas (2017), ATR pode ser representada na Equação 14 a seguir.



A integração das rotas mencionadas anteriormente torna esse procedimento muito atrativo, tanto pela alta concentração de H₂ no produto reformado quanto pela utilização do calor residual na POX. Esse arranjo de tecnologias resulta em uma operação mais versátil do reformador, mantendo a composição do gás de síntese similar àquela do processo de POX (entre 60% e 75%). (CASTRO et al., 2023). Na Figura 24 é possível observar o fluxo de processos da ATR do CH₄.

Figura 24 - Diagrama de fluxo do processo de ATR.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

Para a ATR do CH₄, a eficiência é comparável à do POX (cerca de 60-75%) e ligeiramente inferior à da SMR, sendo os custos de investimento cerca de 15-25% e 50% inferiores aos da SMR e da gaseificação do carvão, respectivamente (KALAMARAS e EFSTATHIOU, 2013; NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017). A

Tabela 8 traz um breve resumo com dados extraídos de literatura do processo de ATR para obtenção de gás síntese.

Tabela 8 - Resumo do processo de ATR para a síntese de H₂ a partir do CH₄.

Condições operacionais	Eficiência (%)	Razão H ₂ :CO	Custo (USD/kg H ₂)	Características principais
T = 1100-2000 °C P = 80 bar H ₂ O:CH ₄ = 0.5-3.5 O ₂ :CH ₄ = 0.4-0.6	60-75	1.1:2.1	1.90-2.5 ^[1] 5.32 ^[2]	O ATR funciona idealmente num ponto termo neutro, não consumindo nem libertando energia externa. Este processo pode ter um rápido arranque. Elevado custo do catalisador à base de metais nobres. O ATR combina as características desejáveis do SMR e do POX. Tem uma concepção compacta. Degradação do catalisador devido a pontos quentes. A adsorção de CO ₂ pode retardar a acumulação de carbono na superfície do catalisador.

Nota: [1] Produção de H₂ (100 Nm³ H₂/h) a partir de biogás. [2] Produção de H₂ (50 Nm³ H₂/h) a partir do biogás.

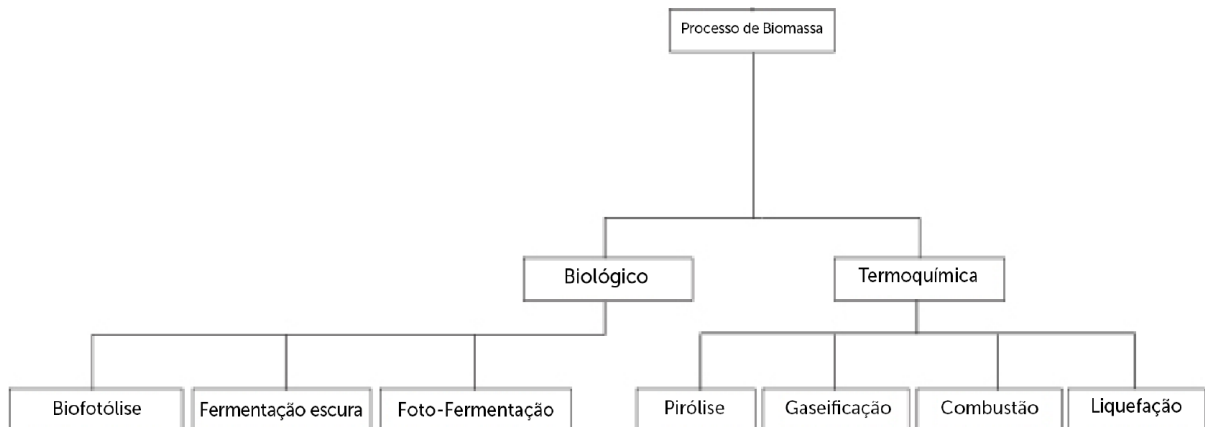
Fonte: Adaptado de Garcia; Avendaño; Medrano (2023)

2.6.2 Produção de H₂ a partir de fontes renováveis como a biomassa

A despeito dos hidrocarbonetos, especialmente aqueles de fontes fósseis, configurem atualmente a principal fonte de matéria-prima para a produção de H₂, a demanda por intensificar a integração de tecnologias renováveis torna inevitável o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas para produção deste gás síntese. Com os atuais recursos de combustíveis fósseis em declínio e a crescente preocupação com o aquecimento global e os efeitos recentes das emissões de GEE, a participação de tecnologias renováveis aumentará no futuro próximo, sendo previsto que a longo prazo elas prevaleçam frente às tecnologias convencionais (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017).

Há diversas rotas tecnológicas já disponíveis, em menor ou maior escala, para geração de H₂ a partir de fontes renováveis, incluindo métodos baseados em biomassa. No tópico subsequente, é apresentada uma breve descrição de algumas tecnologias que utilizam biomassa, além de discutir abordagens relacionadas a esse recurso. Na Figura 25 é possível observar as tecnologias de produção do H₂ e sua matéria-prima associada.

Figura 25 - Representação gráfica das rotas tecnológicas para obtenção de H₂ a partir de fontes renováveis.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

A biomassa é uma fonte versátil e renovável de energia primária derivada de matéria prima vegetal e animal, tais como culturas energéticas e seus resíduos, madeira de florestas e resíduos florestais, resíduos industriais, resíduos animais e urbanos e uma série de outros materiais (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017). Além disso, o uso da biomassa pode ajudar a reduzir as emissões de GEE, especialmente quando os resíduos da agroindústria e da agropecuária são a matéria prima utilizada.

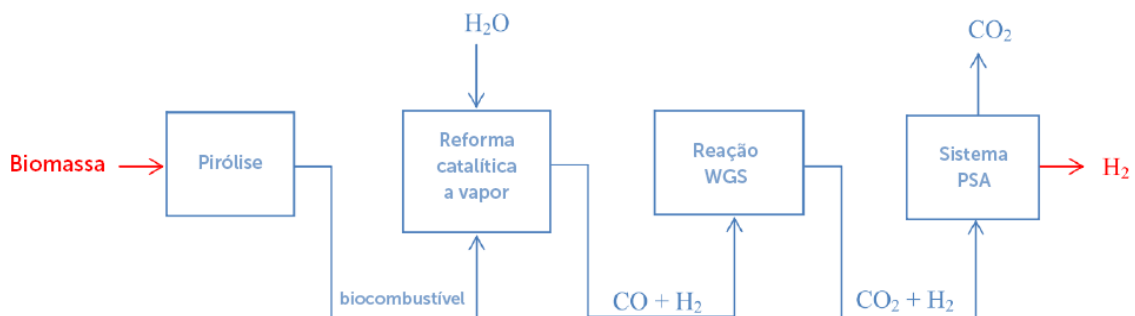
Os métodos termoquímicos e biológicos são as duas rotas principais para a produção de H_2 a partir da biomassa (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017). Embora mais benéficos para o ambiente e menos intensivos na utilização de energia, uma vez que funcionam sob condições amenas, os processos biológicos proporcionam taxas e rendimentos baixos de H_2 , dependendo das matérias-primas utilizadas. Por outro lado, os processos termoquímicos são caracterizados por serem abundantemente veloz, proporcionando taxas e rendimentos mais elevado de H_2 , com destaques à gaseificação, que surge como uma opção promissora com base em considerações econômicas e ambientais (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017).

2.6.2.1 Processos Termoquímicos

Os processos termoquímicos constituem uma técnica realizada a altas temperaturas e grande flexibilidade de utilização de matéria-prima, através da qual a biomassa pode ser transformada em H_2 e gases ricos em H_2 . A produção de gás rico em H_2 a partir do gás de síntese de H_2 obtido por esses processos é um passo efetivo para um clima com emissão zero de gases com efeito de estufa, necessário para desenvolvimento sustentável (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017).

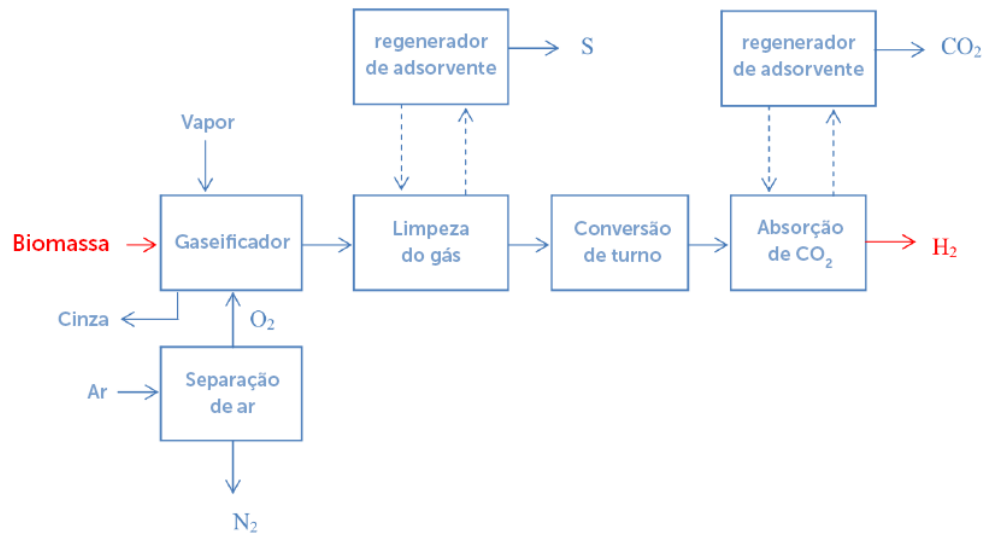
A tecnologia termoquímica envolve os processos de pirólise, gaseificação, combustão e liquefação, com maior destaque para os dois primeiros métodos citados. Ambos processos produzem, entre outros produtos gasosos, CO e CH_4 , que podem ser processados para a produção de mais H_2 através da reforma a vapor e reação WGS (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017). Na Figura 26 e Figura 27 é possível observar um breve diagrama de fluxo do processo de pirólise e gaseificação da biomassa.

Figura 26 - Diagrama de fluxo do processo de pirólise da biomassa.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

Figura 27 - Diagrama de fluxo do processo de gaseificação de biomassa.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

Além dessas abordagens, a combustão e a liquefação são dois processos menos favoráveis. Enquanto a primeira apresenta uma baixa eficiência na produção de H_2 e emite subprodutos poluentes, a segunda requer condições operacionais complexas, alcançando pressões de operação de 5-20 MPa na ausência de ar (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017).

2.6.2.2 Processos biológicos

As pesquisas e a aplicação de plantas que envolvam a produção biológica de H_2 utilizando-se a biomassa como matéria-prima, tem experimentado um aumento significativo recente em virtude do crescente interesse no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, na redução e reciclagem de recursos e resíduos (aproveitando uma ampla gama de materiais residuais como fonte primária) e diminuição de emissões de GEE.

Operando em temperatura e pressão ambiente, característica esta que resulta em um baixo consumo energético (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017), os principais processos biológicos utilizados para a produção do H_2 são a biofotólise direta e indireta, a fermentação escura e a foto-fermentação.

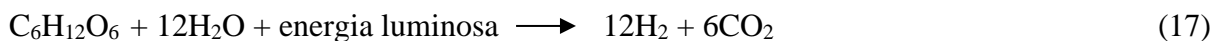
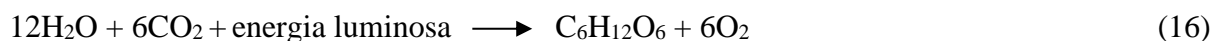
A biofotólise é um processo promissor na produção de H_2 que utiliza microrganismos fotossintéticos como algas e cianobactérias, para gerar H_2 a partir da água durante a fotossíntese. Este processo biológico envolve a modificação genética desses microrganismos para aumentar

sua capacidade de produzir H₂, introduzindo enzimas específicas que facilitam a decomposição da água em H₂ e oxigênio.

Na biofotólise direta, organismos como algas verdes realizam a quebra das moléculas de H₂O em íons de H₂ e oxigênio através do processo de fotossíntese. Os íons de H₂ assim produzidos são então convertidos em GH₂ pela ação da enzima hidrogenase. No entanto, é importante controlar o teor de oxigênio durante esse processo, uma vez que a enzima hidrogenase é altamente sensível ao oxigênio, requerendo um nível baixo, inferior a 0,1% (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017). Além disso, é relevante mencionar que, à intensidade máxima de luz solar, cerca de 90% dos fótons captados pelo aparato fotossintético (clorofila e outros pigmentos), não são aproveitados diretamente no processo de fotossíntese. Em vez disso, esses fótons são dissipados na forma de calor ou fluorescência (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017). Ainda de acordo com Nikolaidis e Poullikkas (2017), a conversão de H₂O em H₂ pelas algas verdes pode ser representada pela Equação 15.

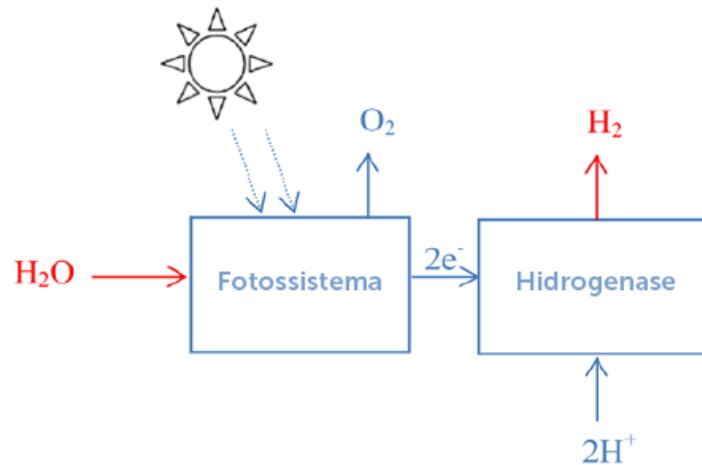


Já na biofotólise indireta, o H₂ é produzido pelas enzimas hidrogenase e nitrogenase e a taxa de produção é comparável à produção baseada na hidrogenase por algas verdes (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017). Nesta abordagem é requerida uma etapa adicional, onde os produtos orgânicos da fotossíntese são utilizados como substrato por microrganismos fermentativos para produzir H₂. Segundo Nikolaidis e Poullikkas (2017), a reação geral de formação de H₂ a partir de H₂O por cianobactérias ou algas azuis-verdes pode ser representada pelas Equações 16 e 17.



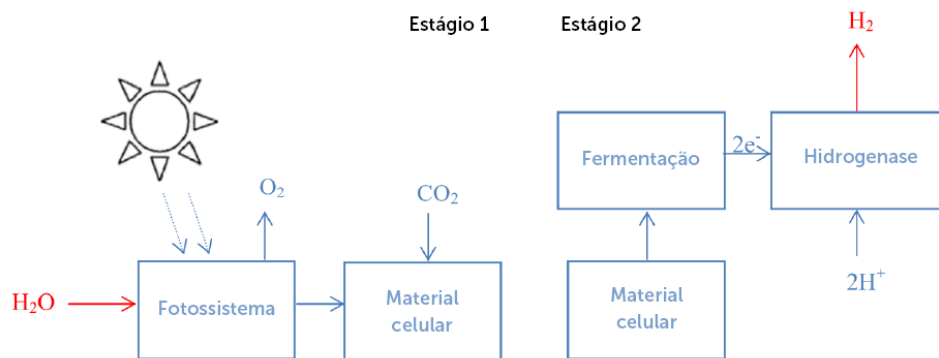
A biofotólise apresenta diversas vantagens, incluindo a utilização da luz solar, uma fonte de energia renovável, e a capacidade de utilizar água como matéria-prima, que é abundante e acessível, contribuindo significativamente para a redução dos impactos ambientais. Na Figura 28 e Figura 29 é possível observar um diagrama de fluxo para os processos tecnológicos biofotólise direta e indireta respectivamente.

Figura 28 - Diagrama de fluxo do processo de biofotólise direta.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

Figura 29 - Diagrama de fluxo do processo de biofotólise indireta.



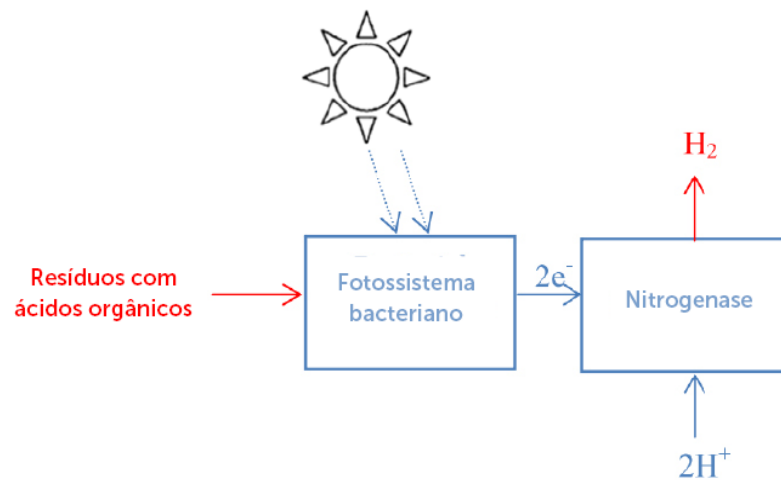
Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

Já as rotas tecnológicas fermentativas de resíduos orgânicos, como a fermentação escura e a foto-fermentação, são processos bioquímicos que ocorrem tanto com, quanto sem a presença de oxigênio, promovendo transformações microbianas em matérias-primas orgânicas (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017). Esses processos resultam na produção de álcoois, acetona, H₂ e CO₂ em quantidades mínimas. Essas abordagens são atrativas para a produção de bio-hidrogênio, uma vez que utilizam materiais residuais, proporcionando uma produção de energia de baixo custo com tratamento simultâneo de resíduos (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS; 2017).

A foto-fermentação é um processo no qual ácidos orgânicos são convertidos em H₂ e CO₂ através da fotossíntese, com a participação de bactérias anaeróbias como *Rhodobacter*, *Rhodobium*, *Rhodospseudomonas* e *Rhodospirillum* (ŁUKAJTIS et al., 2018). Durante esse processo, o H₂ é produzido pela redução do nitrogênio molecular na presença da nitrogenase,

que também reduz os prótons em H_2 molecular. O oxigênio, como inibidor da nitrogenase, não é formado nestas conversões. A eficiência de rendimento na produção de H_2 na foto-fermentação é semelhante à observada no processo de biofotólise e é influenciada por fatores como: tipo de microrganismos presentes e meios utilizados, da concepção do foto-fermentador e da intensidade da luz (ŁUKAJTIS et al., 2018). Na Figura 30 é possível observar um diagrama de fluxo simplificado do processo.

Figura 30 - Diagrama de fluxo do processo de foto-fermentação.

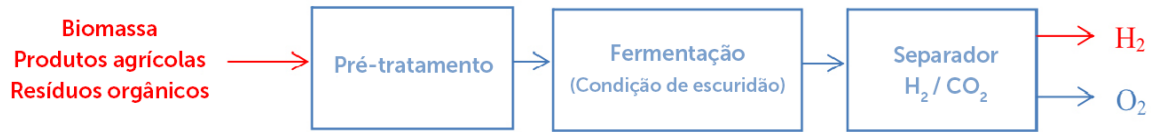


Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

Já na fermentação escura, bactérias anaeróbias convertem substratos em condições de ausência de luz, justificando a nomenclatura escolhida para esta rota tecnológica (ŁUKAJTIS et al., 2018). O H_2 desempenha um papel fundamental no metabolismo de muitos microorganismos anaeróbios, que podem utilizar moléculas de H_2 energeticamente ricas quando estas se encontram disponíveis. Esses microorganismos utilizam os elétrons da oxidação do H_2 para então produzir energia (ŁUKAJTIS et al., 2018).

Quando na ausência de aceptores externos de elétrons disponíveis, os organismos acumulam um excesso de elétrons gerados nos processos metabólicos, como resultado da redução de prótons, produzindo moléculas de H_2 . A principal enzima que regula o metabolismo do H_2 é a hidrogenase. As duas hidrogenases básicas, com sítios ativos e origens filogenéticas distintas, são a [FeFe]-hidrogenase e a [NiFe]-hidrogenase (ŁUKAJTIS et al., 2018). Na Figura 31 é possível observar um diagrama de fluxo do processo de fermentação escura. Já na Tabela 9 tem-se uma breve síntese dos sistemas responsáveis por produzir o bio-hidrogênio.

Figura 31 - Diagrama de fluxo do processo de fermentação escura.



Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

Tabela 9 - Taxa de síntese de H₂ e volume do bio-reator necessário para uma célula de combustível de eletrólitos de polímero (PEMFC), de 5 kW

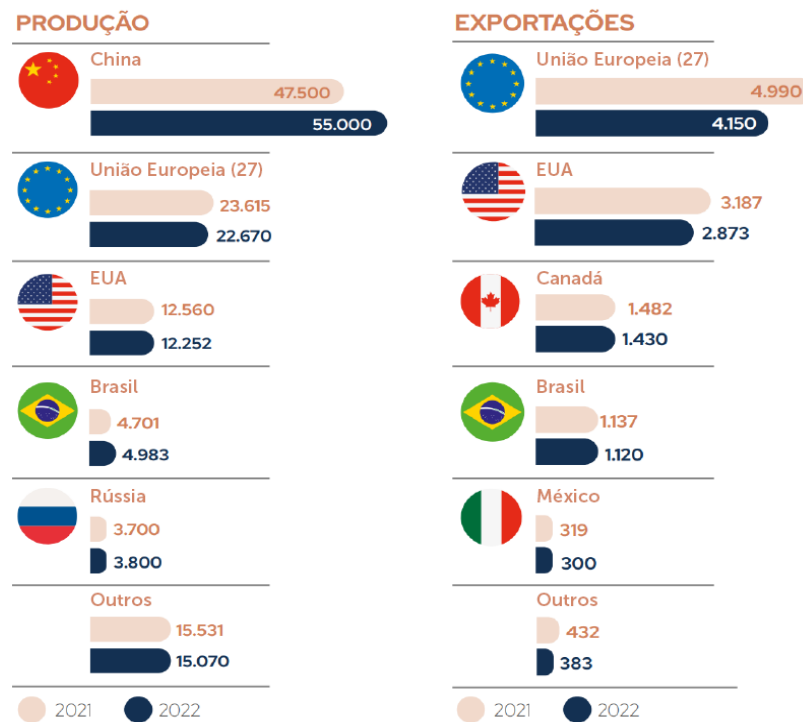
Sistema de bio-hidrogênio	Taxa de síntese de H ₂ (mmol H ₂ /h)	Volume do bio-reator (m ³)
Biofotólise direta	0.07	1707
Biofotólise indireta	0.355	337
Fermentação escura	8.2 – 121	1 – 14.75
Foto-Fermentação	0.16	747

Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017)

2.7 ASPECTOS DA SUINOCULTURA NO BRASIL E EM SANTA CATARINA

O Brasil ocupa uma posição de destaque como um dos principais produtores e exportadores globais de proteína animal. Dentro desse cenário, a suinocultura se evidencia como uma atividade de grande importância econômica, particularmente na região Sul do país, contribuindo significativamente para a geração de renda no meio rural (BARROS et al., 2019). O panorama da suinocultura brasileira em relação ao cenário global revela um setor robusto e em constante crescimento. O Brasil, destacando-se pela sua competitividade e qualidade do produto, é um dos principais produtores e exportadores mundiais de carne suína, ocupando a quarta posição mundial em ambos critérios no ano de 2022 (ABPA, 2023). Na Figura 32 é possível observar a importância nacional frente às outras grandes potências mundiais.

Figura 32 - Produção e exportação no mercado mundial de carne suína (por mil toneladas) nos anos de 2021 e 2022.



Fonte: Adaptado de Associação brasileira de proteína animal - Abpa (2023)

No âmbito das exportações, o Brasil se destaca como um dos principais players globais. As exportações de carne suína brasileira têm aumentado significativamente nos últimos anos, impulsionadas pela abertura de novos mercados internacionais e pela competitividade do produto brasileiro em termos de qualidade e preço. Países como China, Hong Kong e Filipinas são importantes destinos das exportações brasileiras de carne suína, correspondendo a 41,73%, 8,88% e 7,19% respectivamente da produção total nacional no ano de 2022 (ABPA, 2023). A suinocultura brasileira tem registrado um crescimento consistente ao longo dos anos (Figura 33), impulsionado pela demanda interna e externa, além de investimentos em tecnologia e melhorias genéticas nos rebanhos.

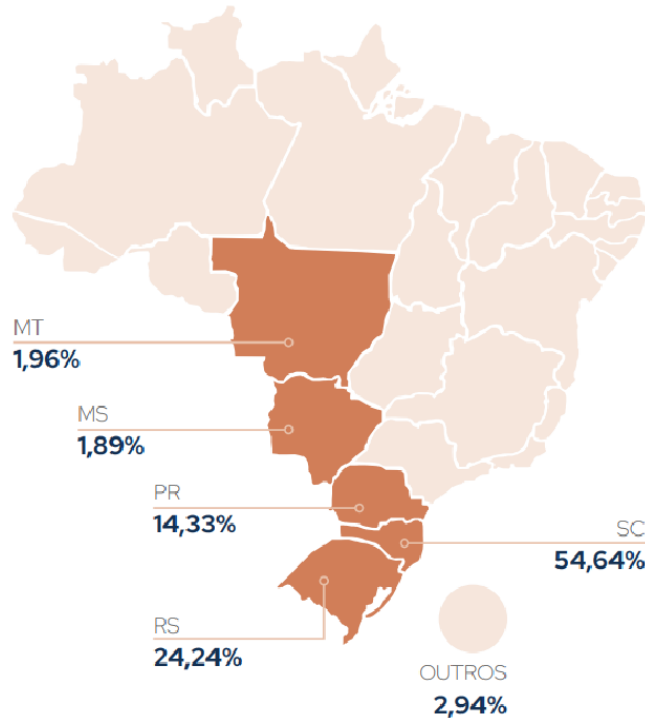
Figura 33 - Recorte temporal da produção brasileira de carne suína por milhões de toneladas (direita) e alojamento de matrizes por cabeças (esquerda).

2012	2.417.572	2012	3,488
2013	2.144.305	2013	3,411
2014	2.100.936	2014	3,471
2015	2.100.301	2015	3,643
2016	2.067.704	2016	3,731
2017	2.019.501	2017	3,758
2018	2.039.356	2018	3,974
2019	2.017.645	2019	3,983
2020	1.970.611	2020	4,436
2021	2.015.000	2021	4,701
2022	2.067.749	2022	4,983

Fonte: Associação brasileira de proteína animal - Abpa (2023)

Santa Catarina desempenha um papel crucial na exportação de suínos em relação às outras unidades federativas do Brasil, contribuindo com 54,64% de toda produção suinícola nacional (Figura 34). Como um dos principais exportadores de carne suína do país, o estado catarinense contribui de maneira substancial para a balança comercial brasileira e para a projeção internacional do setor agroindustrial brasileiro.

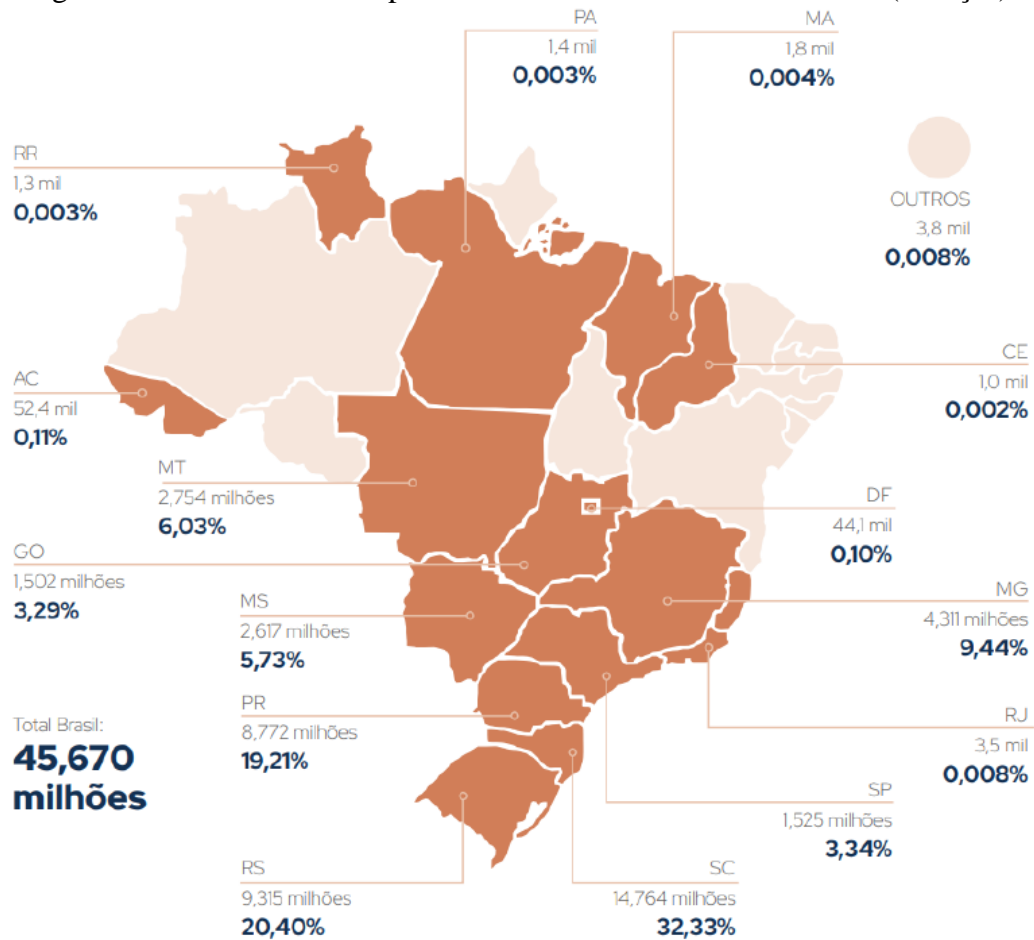
Figura 34 - Exportações de carne suína por unidade federativa no ano de 2022.



Fonte: Associação brasileira de proteína animal - Abpa (2023)

Em relação ao número de abate de suínos, SC se destaca também como líder nacional (Figura 35). O estado possui um parque agroindustrial consolidado e altamente eficiente, com uma significativa concentração de agroindústrias dedicadas à produção de carne suína. Isso se deve, em parte, às condições favoráveis oferecidas pelo clima e pelo relevo do estado, que são propícios para a atividade suinícola.

Figura 35 - Abate de suínos por unidade federativa no ano de 2022 (cabeças).



Fonte: Associação brasileira de proteína animal - Abpa (2023)

Reconhecida nacionalmente como local de origem de algumas das agroindústrias mais tradicionais na cadeia de produção de suínos no Brasil, o estado de SC tem na suinocultura sua principal atividade econômica no setor do agronegócio. Em escala nacional, o estado responde por cerca de 24% das matrizes alojadas, 33% das granjas existentes e 26% da produção de carne suína do Brasil (ABCs, 2016), justificando de maneira substancial sua importância estratégica para o abastecimento interno e exportação de carne suína., bem como na geração de empregos e economia regional.

O estado de SC também se destaca pelo fornecimento de material genético, atendendo não apenas às demandas locais, mas também suprindo produtores por todo o território nacional, sendo diretamente responsável por 45% da movimentação interestadual de reprodutores em 2015, além de ser referência nacional no fornecimento de sêmen (ABCS, 2016). A Tabela 10 demonstra a importante participação da suinocultura catarinense no contexto nacional.

Tabela 10 - Representatividade catarinense na produção nacional de carne suína.

Variáveis ^[1]	Brasil	SC	Participação (%)
Número de matrizes (unid.)	1.720.225	420.488	24%
Número de granjas UPL, UPD ou CC (unid.)	3.101	1.022	33%
Número de crechários (unid.)	699	417	60%
Capacidade dos crechários (espaços)	1.497.840	801.057	53%
Número de Wean to Finish (unid.)	77	38	49%
Capacidade das Wean to Finish (espaços)	204.128	45.106	22%
Número de terminações (unid.)	13.991	5.736	41%
Capacidade das terminações (espaços)	11.257.370	3.722.664	33%
Cabeças abatidas (mil unidades)	40.717	10.299	25%
Produção de carne (mil unidades)	3.604	923	26%

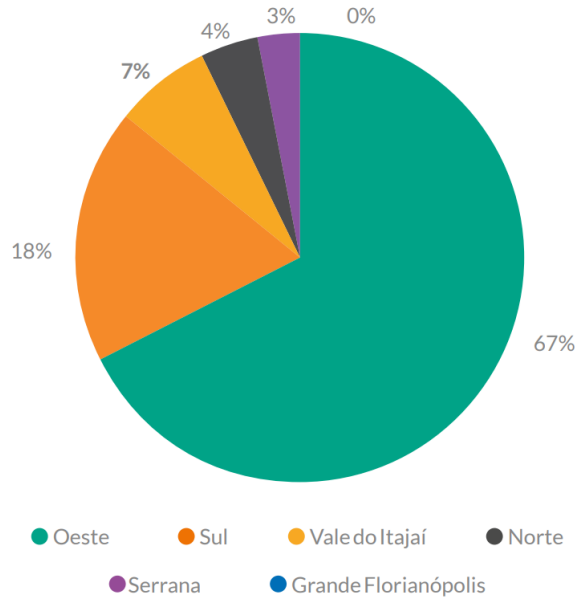
Nota: [1] Inclui somente dados de granjas e rebanhos tecnificados/industriais.

Fonte: Associação brasileira dos criadores de suínos - ABCS (2016)

A disposição segundo modelos de produção nacional de carne suína é estratificada da seguinte forma: 16% correspondem a suinocultores independentes, 45% são produtores integrados e 39% são produtores cooperados (ABCS, 2016). Observando a Tabela 10, observa-se a ampla representatividade e predominância de sistemas especializados de produção, como crechários, *Wean to Finish* (modelo de produção integrado que visa criar eficiência ao longo de todo o ciclo de vida do suíno) e terminações no estado catarinense, reafirmando a predominância dos sistemas de produção de suínos integrados e cooperados, que em conjunto representam aproximadamente 84% das matrizes do estado (ABCS, 2016).

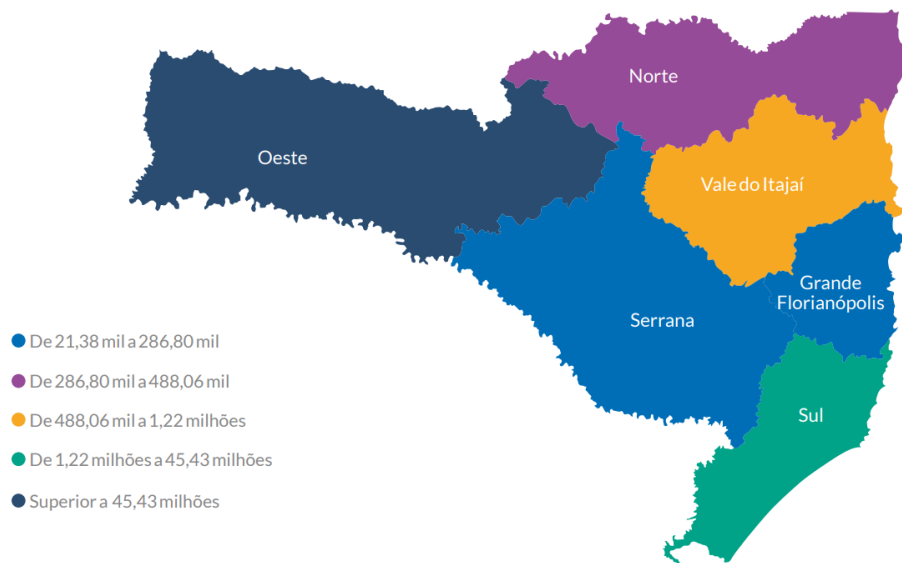
Em especial, a região oeste de SC mantém sua posição como a principal área produtora de suínos do estado, abrigando aproximadamente 70% do rebanho catarinense (ABCS, 2016). Foi no oeste catarinense que surgiram renomadas empresas como Perdigão, Seara e Sadia, durante a primeira metade do século XX, além da hoje considerada como a maior cooperativa da cadeia de suínos do Brasil, a Cooperativa Central Aurora Alimentos com origem no final dos anos 1960 e que possui 13 cooperativas filiadas (ABCS, 2016). As Figura 36 e Figura 37 demonstram como é a distribuição do rebanho entre as mesorregiões catarinenses.

Figura 36 - Distribuição do rebanho suinícola entre as mesorregiões de SC (efetivo em cabeças).



Fonte: Associação brasileira dos criadores de suínos - ABCS (2016)

Figura 37 - Distribuição do rebanho suinícola catarinense por mesorregiões catarinenses. (efetivo em cabeças).



Fonte: Associação brasileira dos criadores de suínos - ABCS (2016)

2.7.1 Caracterização dos dejetos suínos

Quando se analisa os diversos GEE e os meios de produção destes, conclui-se que a agropecuária é uma fonte significativa de emissão de CH₄, CO₂ e N₂O, sendo o conhecimento

dos mecanismos de síntese deste GEE e os fatores que afetam sua produção de suma importância para caracterizar os impactos ambientais. Relatórios recentes têm indicado a produção suinícola como uma importante fonte emissora de GEE, sendo diretamente responsável por 9% destas emissões. Dentro desse percentual, 16% é associado à produção de metano devido ao manejo inadequado dos dejetos (GERBER et al., 2013 apud MAPA, 2016). Esses impactos podem ser em grande parte mitigados pela adoção de técnicas de processamento dos dejetos, como a biodigestão. A biodigestão é um processo fermentativo anaeróbio controlado que resulta na formação de uma massa microbiologicamente estável e na produção de gases como subprodutos (ABCS, 2016).

Como evidenciado no capítulo anterior, o estado de SC atualmente lidera o ranking nacional de produção de carne suína, tendo como grande característica a criação destes animais com alto grau de confinamento, acarretando em uma produção significativa de dejetos. Análises sugerem que apenas 15% das propriedades implementam práticas de manejo que incluem valorização e tratamento dos resíduos produzidos, sendo que a maioria dos produtores ainda realizam seus descartes diretamente no meio natural, causando degradação dos recursos hídricos (BELLI et al, 2000). Além disso, parte das tecnologias utilizadas para o tratamento dos resíduos não é adequada em termos de projeto, construção e operação.

Desta forma, compreender as características dos dejetos produzidos pela suinocultura catarinense para promover um planejamento eficaz de sistemas de tratamento, bem como para avaliar os impactos adversos resultantes de práticas inadequadas de manejo e disposição dos resíduos da atividade produtiva torna-se evidente. As características dos dejetos podem ser expressas em propriedades físicas, químicas e biológicas e, também, ser obtidas por meio de medidas qualitativas e quantitativas (ABCS, 2016).

Todavia, determinar com precisão a carga e o volume de dejetos gerados é uma tarefa desafiadora devido à inerente variabilidade existente entre os criadores, a escala de produção de cada propriedade rural e o nível tecnológico aplicado. A carga representa um dos principais critérios na escolha e dimensionamento de sistemas de tratamento, e está diretamente relacionada à produção de urina e fezes dos animais. O cálculo em função do peso vivo dos indivíduos é um dos métodos empíricos mais seguros para estimar a carga de elementos emitida pelo rebanho (OLIVEIRA, 2007).

A composição final dos nutrientes presentes nos dejetos suínos varia conforme a idade dos animais, condições climáticas, o tipo de alimentação ministrado nos criadouros, métodos de coleta e armazenamento dos resíduos, e o teor de umidade. Dentre os principais elementos

poluentes presentes nos dejetos suínos destacam-se o nitrogênio, o fósforo, e alguns microminerais como zinco e cobre (ABCS, 2016). A presença de um padrão de uniformidade nutricional e genético entre o rebanho suinícola catarinense possibilita estimar o peso total de um rebanho em aproximadamente 202 kg por matriz para as Unidades Produtoras de Leitões (UPL), 68 kg por cabeça para as Unidades Produtoras de Terminados (UPT), e 612 kg por matriz para aquelas em regime de Unidade Produtora de Suínos em Ciclo Completo (UCC) (OLIVEIRA, 2007).

É possível ponderar através da Tabela 11 a quantidade (kg/dia) dos principais elementos poluentes presentes nos dejetos suínos com base em uma propriedade rural com médio nível tecnológico. Segundo Oliveira (2007), para determinar a quantidade total de um elemento liberado por uma UPL ou uma UCC, é necessário multiplicar os valores listados na Tabela 11 pelo número de matrizes, e para as UPT por suínos alojados, respectivamente.

Tabela 11 - Quantidade (kg/dia) de elementos poluentes e coliformes fecais (colônias) expresso por matriz ⁽¹⁾ e suíno alojado ⁽²⁾.

	ST	DBO5	N	P	K	CF
UPL ⁽¹⁾	0,99	0,33	0,067	0,024	0,042	3,64 x 10 ¹²
UPT ⁽²⁾	0,43	0,23	0,029	0,011	0,015	1,22 x 10 ¹²
UCC ⁽¹⁾	3,59	1,72	0,240	0,090	0,132	11,5 x 10 ¹³

Fonte: Oliveira (2007)

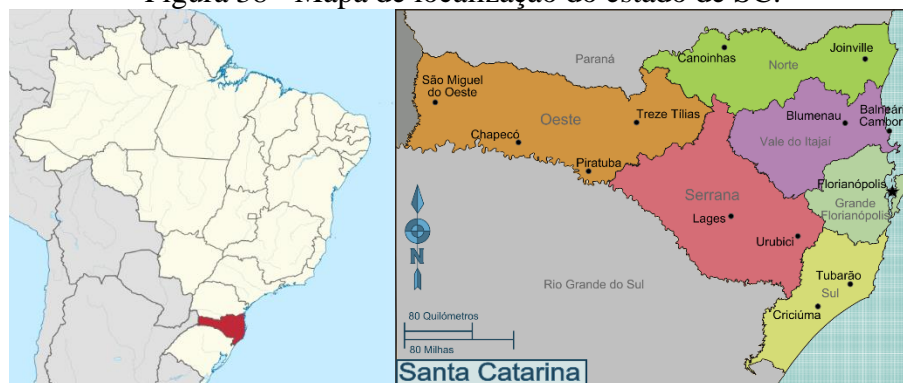
3 METODOLOGIA

Utilizou-se a revisão bibliográfica como método primordial de investigação, envolvendo uma avaliação sistemática e crítica da literatura científica relevante ao tema em estudo. A pesquisa bibliográfica abordada neste trabalho versa sobre a Energia produzida pelo H₂, em especial do H₂ produzido por via do biogás, do biometano e da biomassa, recursos que são exemplos de como a matéria orgânica pode ser aproveitada para produzir energia de forma sustentável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e ajudando a mitigar as mudanças climáticas.

Objetivando a compreensão dos fundamentos tecnológicos e a análise de sua evolução, foi imprescindível examinar cuidadosamente os principais artigos científicos, obras literárias, documentos governamentais e recursos online sobre o assunto, contribuindo significativamente para uma compreensão aprofundada do estado atual do conhecimento na área. Esta revisão desempenhou um papel crucial na construção de uma base teórica sólida, respaldada por evidências científicas robustas.

A delimitação do presente projeto teve por foco o território brasileiro, em especial o estado de SC (Figura 38), sendo os procedimentos metodológicos de pesquisa escolhidos: a pesquisa bibliográfica, a pesquisa documental e um breve estudo de caso envolvendo umas das promissoras tecnologias apresentadas (SMR).

Figura 38 - Mapa de localização do estado de SC.



Fonte: Wikipedia (2024)

O procedimento de pesquisa bibliográfica se configurou principalmente por meio de uma investigação feita em fontes teóricas, tidas como fontes secundárias, o que significa que são materiais com análise e interpretação de terceiros. As fontes secundárias encontram-se em livros, anais de congressos, trabalhos acadêmicos e periódicos (científicos e de notícias). A

presente pesquisa foi conduzida em sua essência por uma pesquisa bibliográfica que compreenda de 2000 a 2023. Para aumentar as chances de encontrar documentos relevantes, o termo "hidrogênio" foi pesquisado em títulos, resumos e palavras-chave. Seguiu-se um protocolo de pesquisa que inclui as etapas: i) montagem (identificação e obtenção dos documentos de interesse), ii) arranjo e organização (triagem dos estudos), e iii) avaliação (valoração e relato).

Devido ao grande volume de documentos disponíveis, selecionou-se e analisou-se informações preliminares. Foram consideradas a priori publicações relacionadas à produção de H_2 a partir de hidrocarbonetos (biogás) e biomassa. A segunda triagem organizou as informações conforme tópicos relevantes para o estudo: métodos de reforma de hidrocarbonetos e produção de H_2 a partir de fontes renováveis como a biomassa. No que se refere ao desempenho ambiental dos processos, utilizou-se como palavras-chave cada um dos processos produtivos, além dos termos avaliação do ciclo de vida e pegada ambiental. Durante as rodadas de seleção, foram excluídos documentos duplicados, os que não estavam totalmente disponíveis, e resumos foram revisados para verificar sua relevância.

O estudo de caso, como método de pesquisa, concentrou-se na investigação de uma circunstância singular, utilizando como base fontes de evidência teóricas. Desta forma, para obtenção dos resultados esperados, foi realizado um levantamento bibliográfico detalhado sobre a atual produção de biogás e biometano no estado de SC, identificando suas fontes primárias, distribuição geográfica e potencial de produção. Além disso, foram coletados dados sobre as tecnologias de reforma do biogás e biometano para a produção de H_2 .

Realizada a escolha da rota tecnológica apropriada para produção de gás síntese, e com base nos dados levantados, foi realizada uma análise do potencial de produção de H_2 a partir da reforma do biogás em SC. Foram considerados fatores como disponibilidade de biomassa, capacidade instalada de unidades produtoras de suínos e viabilidade econômica das tecnologias de reforma. Tem-se como meta que esta pesquisa apresente uma avaliação do potencial de geração de H_2 em SC através da conversão do biogás, bem como breve análise dos benefícios advindos de sua utilização com vista à descarbonização e redução de emissões de GEE em setores cruciais da economia. Os resultados alcançados poderão ser valiosos para direcionar estratégias e planos de crescimento sustentável na região, bem como o fomento de novas pesquisas que abordem a temática.

3.1 METODOLOGIAS PARA ESTIMAR O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DE SC

Primeiramente, para realizar os cálculos de potencial de produção de biogás no estado de SC, foi conduzida uma extensa pesquisa bibliográfica sobre as metodologias disponíveis em literatura com base nos rebanhos de animais, em especial o rebanho suinícola. A partir do estudo proposto por Mito et al. (2018), selecionou-se duas metodologias robustas para a concepção desta etapa do trabalho. A primeira metodologia foi criada pelo Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás-ER para estimar a produção de biogás, tendo como base os parâmetros da metodologia proposta pelo IPCC (MITO et. al, 2018). Destaca-se que nesta aplicação foram incluídos dados sobre o peso dos animais presentes no rebanho, a fração diária de confinamento dos animais nas propriedades rurais, a fração anual de permanência destes (Equação 19), além de cálculo para a produção total de dejetos do rebanho (Equação 18). Na Tabela 12 é possível observar os valores dos parâmetros aplicados nesta metodologia.

$$PDDS = \Sigma(N^{\circ} \times PE) \quad (18)$$

Onde:

PDDS: Produção diária de dejetos suínos ($m^3_{\text{dejetos}} \cdot \text{dia}^{-1}$);

N^o: Número de elementos do rebanho animal (cabeças);

PE: produção específica de dejetos por cabeça da categoria animal ($m^3_{\text{dejetos}} \cdot \text{cab}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$).

$$PDB = N^{\circ} \times \left(\frac{PM}{PP}\right) \times FDC \times SV_{\text{padrão}} \times \left(\frac{FCM \times B_0 \times F_b}{CH_4}\right) \quad (19)$$

Onde:

PDB: Produção diária de biogás ($m^3 \cdot \text{dia}^{-1}$);

N^o: Número de elementos do rebanho animal (cabeças);

PM: Peso médio (kg);

PP: Peso padrão (kg);

FDC: Fração diária de confinamento - entre 0 e 1 (adimensional);

SV: Sólidos voláteis ($\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{cab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$);

FCM: Fator de conversão de CH₄ para a linha de base do sistema (adimensional);

B₀: Capacidade de produção de CH₄ pelo dejetos ($m^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$);

F_b: Fator de correção de incerteza (adimensional);

CH₄: Porcentagem de CH₄ no biogás.

Tabela 12 - Valores da metodologia da CIBiogás-ER para os parâmetros.

Rebanho	SV (kg_{SV}.cab⁻¹.ano⁻¹)	FCM (%)	B₀ (m³_{CH₄}.kg_{SV}⁻¹)	F_b	%CH₄
Suínos	0,3	0,78	0,29	0,94	60

Fonte: Mito et al. (2018).

Para a metodologia proposta pela CIBiogás-ER, adotou-se para o parâmetro FDC o valor 0,9 em virtude do alto grau de confinamento do rebanho suínola. Para os parâmetros PM e PP, adotou respectivamente os valores 90 kg e 120 kg, peso usual em que ocorre o encaminhamento dos suínos das unidades de crescimento e terminação (UCT) para o abate (MITO et. al, 2018).

A segunda metodologia escolhida teve como base a proposta teórica de Kunz e Oliveira, que define uma relação direta para estimar o potencial teórico de produção de CH₄, utilizando um cálculo simples que envolve a capacidade máxima de produção de CH₄ e sólidos voláteis (B₀ e SV) (Equação 21), em conjunto com o volume diário de dejetos produzidos (Equação 20) (MITO et. al, 2018). Na Tabela 13 é possível observar os valores dos parâmetros aplicados nesta metodologia.

$$Q = N^{\circ} \times PD \quad (20)$$

Onde:

Q: Volume total de dejetos suínos produzidos (m³.dia⁻¹);

N^o: Número de elementos do rebanho animal (cabeças);

PD: Volume de dejetos suínos produzidos por animal (m³_{animal}.dia⁻¹).

$$PrM = B_0 \times SV \times Q \quad (21)$$

Onde:

PrM: Produção diária de CH₄ (m³_{CH₄}.dia⁻¹);

B₀: Capacidade máxima teórica de produção de CH₄ pelo dejetos m³_{CH₄}.kg_{SV}⁻¹;

SV: Concentração de sólidos voláteis gsv.L^{-1} ;

Q: Volume dejetos produzidos ao dia ($\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$).

Tabela 13 – Valores da metodologia proposta por Kunz para terminação de suínos.

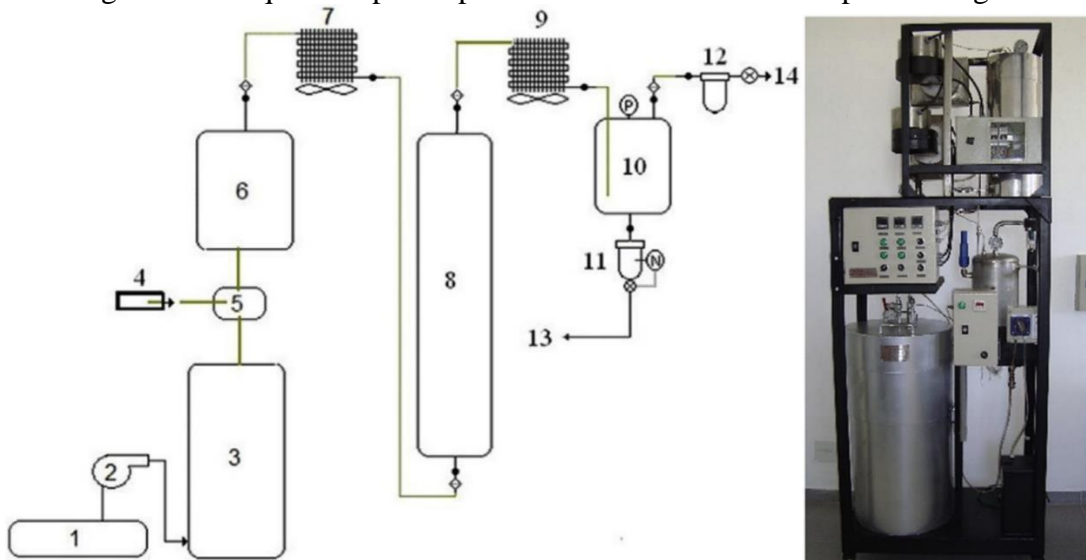
Rebanho	SV (gsv.L^{-1})	B_0 ($\text{m}^3\text{CH}_4.\text{kgsv}^{-1}$)	PD ($\text{L}_{\text{animal}}.\text{dia}^{-1}$)
Suínos	53,1	0,45	4,46

Fonte: Mito et al. (2018).

3.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE H_2 A PARTIR DO BIOGÁS ESTIMADO

Neste estudo de caso, empregou-se um reformador de biogás que não tolera a presença de H_2S e impurezas, exigindo a purificação do biogás antes do processo final de reforma. O ciclo de reforma do biogás com suas etapas está demonstrado nas Figura 39 e Figura 40.

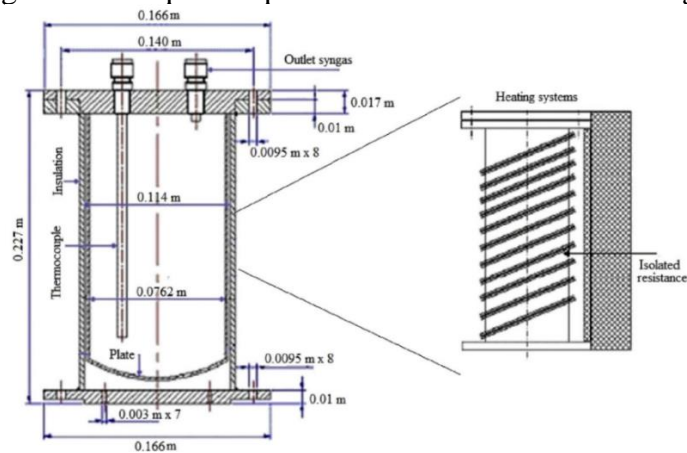
Figura 39 - Esquema e protótipo do sistema de reforma a vapor do biogás.



(1) Tanque para água destilada; (2) Bomba doseadora; (3) Vaporizador; (4) Sistema de injeção de biogás (5) Câmara de mistura biogás/vapor; (6) Reformador; (7) Sistema de arrefecimento; (8) Reator de transferência água-gás; (9) Sistema de arrefecimento; (10) Tanque tampão com manômetro para controle da pressão do gás de síntese; (11) Purificador eletrônico; (12) Filtro coalescente; (13) Saída para o condensado; (14) Saída para o gás de síntese

Fonte: Tuna et al. (2018)

Figura 40 - Esquema aproximado do reformador de biogás



Fonte: Tuna et al. (2018)

O protótipo apresentado nas Figuras 39 e 40, foi projetado e construído no Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE - UNESP). De acordo com Tuna et al. (2018), a entrada da mistura biogás/vapor ocorre no fundo do reator através de pequenos orifícios dispostos ao longo da placa de suporte do reator, que possui 0,01 m de espessura. Para o isolamento térmico, foi utilizado um material refratário e fibra cerâmica. Com o intuito de controlar a temperatura e o tempo de contato entre o catalisador e a mistura, o reformador deve possuir as seguintes características: um diâmetro de 0,114 m entre a parede de isolamento e a externa do reformador, além de 0,0762 m de leito interno e uma placa de fundo perfurada com furos de 0,003 m, aproximadamente 30% de área livre (Figura 40) (TUNA et al., 2018).

Um termopar foi instalado para monitorar a temperatura e um escape foi posicionado para liberar o gás de síntese resultante das reações. O reator de transferência, consiste em um cilindro termicamente isolado que contém um leito embutido e uma placa perfurada que facilita a interação entre os catalisadores e o gás de síntese proveniente do reformador (TUNA et al., 2018). Esse gás de síntese, já resfriado, entra no reator de transferência pelo fundo. Diâmetro interno do reator de transferência é similar ao do reformador, mas seu comprimento é o dobro para favorecer a conversão de CO em CO₂ e aumentar produção de H₂ (TUNA et al., 2018).

O sistema de resfriamento para o gás de síntese, colocado após os processos de reforma e transferência, inclui um mecanismo de resfriamento por condução e convecção (9). Adiciona-se a isso um tanque buffer equipado com um manômetro para monitorar a pressão do gás de síntese (10), um purificador eletrônico (com uma pressão máxima operacional de 175 psi) para remover condensados (11), e um filtro coalescente destinado a extrair qualquer umidade

residual presente no gás de síntese (12). Completando o sistema, há duas saídas: uma para o condensado (13) e outra para o gás de síntese desumidificado (14) (TUNA et al., 2018).

A análise da reforma que se segue foi baseada em uma composição do biogás que contém 61,8% de CH₄, 34,4% de CO₂ e 3,8% de outros componentes, incluindo H₂S (BRAGA et. al, 2012). Dado que o biogás proveniente da degradação dos dejetos do rebanho suinícola passa por um processo de tratamento e purificação anterior ao processo de reforma, chegou-se a uma composição final de 64,2% de CH₄ e 35,8% de CO₂ (BRAGA et. al, 2012). A reforma do biogás foi considerada como sendo a SMR combinada com a DR, antes de passar pelo reator shift, conforme apresentado nas Equações 22 e 23.



Tendo como base 100g de biogás (64,2g de CH₄ e 35,8g de CO₂) e que todo o CO₂ presente reage na reforma a seco com estequiometria de 1:1, sabe-se que 13g de CH₄ também reagem na reforma a seco (BRAGA et. al, 2012). Portanto, dos 64,2g de CH₄, 51,2g reagem na reforma a vapor. Assim, a reação final do biogás é composta por 51,2% de reforma a vapor e 48,8% de reforma a seco, conforme indicado na Equação 24 (BRAGA et. al, 2012).

$$0,512 \text{ reforma a vapor global} + 0,488 \text{ reforma a seco} = \text{reforma final do biogás} \quad (24)$$

Para proceder com os cálculos de eficiência do processo final, foram analisadas as reações que ocorrem nos reatores de reforma e posteriormente no reator shift (Tabela 14), já que a eficiência final deve ser determinada com base na quantidade total de H₂ gerado.

Tabela 14 - Equações estequiométricas de reforma do biogás

Reforma a vapor (reator 1)	$0,512 \text{ CH}_4 + 0,512 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 0,512 \text{ CO} + 1,536 \text{ H}_2$
Reforma seco (reator 1)	$0,488 \text{ CH}_4 + 0,488 \text{ CO}_2 \rightarrow 0,976 \text{ CO} + 0,976 \text{ H}_2$
Reator Shift (reator 2)	$1,488 \text{ CO} + 1,488 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 1,488 \text{ CO}_2 + 1,488 \text{ H}_2$
Reforma a vapor global (reator 1 + reator 2)	$\text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{ H}_2\text{O}$

Fonte: Braga et. al (2012)

A fim de determinar a eficiência global da reforma a vapor do biogás, emprega-se a formulação da Equação 25 (BRAGA et. al, 2012).

$$\eta_R = \frac{(m_{H_2} \times h_{H_2})}{(m_{biogás} \times h_{biogás}) + (m_{H_2O} \times h_{H_2O})} \quad (25)$$

Onde:

η_R - Eficiência geral da reforma (%);

m - Massa do elemento (kg);

h - Entalpia do elemento (kJ/kmol);

De acordo com Braga et. al (2012), para calcular a eficiência do processo de reforma, foi essencial primeiro determinar as entalpias dos reagentes e dos produtos envolvidos (Tabela 15), para a seguir determinar os fluxos apresentados na Tabela 16. Ainda segundo Braga et. al (2012), o fluxo de H₂, vapor de H₂O e CH₄ calculados foram obtidos a partir da equação global da reforma a vapor. Utilizando as estequiometrias das reações de reforma (SMR e DR), se tornou viável calcular o total de biogás necessário para produzir 1 Nm³ de H₂.

Tabela 155 - Capacidades caloríficas e entalpia de formação

Fórmula	h (kJ/kg)
CH ₄	32215,16
H ₂	120909
CO ₂	0
H ₂ O (vapor a 750 °C)	4043,45

Fonte: Braga et. al (2012)

Tabela 16 - Valores de fluxos calculados

Fórmula	m (kg/s)
CH ₄	0,1798
H ₂	0,0899
CO ₂	0,2414
H ₂ O	0,4055

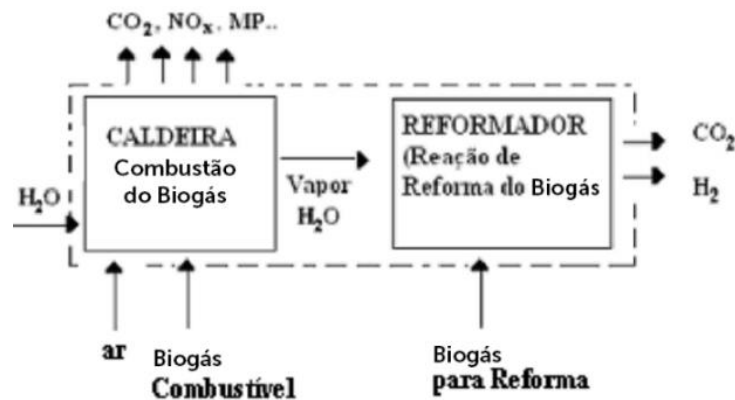
Fonte: Braga et. al (2012)

3.3 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DO PROCESSO DE REFORMA DO BIOGÁS

A eficiência ambiental, ou eficiência ecológica, é um estudo que preconiza a avaliação do nível de poluição associado a um processo de produção, considerando as emissões provenientes do combustível utilizado, permitindo assim, quantificar o impacto ambiental de diferentes métodos de produção. A eficiência ecológica estrutura uma régua de avaliação que vai de “0 ao 1”, sendo que o valor “0” indica um altíssimo impacto (100%), enquanto um valor de “1” representa um impacto ambiental de 0% ou não poluente. (BRAGA, 2010)

Para determinar a eficiência ambiental do estudo teórico descrito nos capítulos anteriores, foi adotado nesta etapa uma caldeira alimentada por biogás como gerador de vapor do processo (Figura 41), resultando assim em um conjunto mais adequado para aplicação em ambientes rurais. Esta implementação se deve ao fato de as caldeiras serem comumente empregadas atualmente, devido aos seus custos operacionais e de manutenção reduzidos, porém torna-se imprescindível investigar o impacto desta inserção tecnológica desse ciclo.

Figura 41 - Sistema de produção de H₂ via reforma de biogás.



Fonte: Adaptado de Braga (2010)

Para realizar a avaliação de eficiências das caldeiras adotou-se como parâmetro o processo de cogeração. Essa abordagem envolve a produção simultânea de energia térmica e mecânica, podendo ser empregada em geradores para gerar eletricidade ou em equipamentos rotativos, como motores ou compressores (FONSECA, 2009). O calor gerado pode ser utilizado diretamente em processos industriais ou indiretamente para aquecer água, produzir vapor ou ar quente em sistemas de secagem. Com o aproveitamento eficiente dessa energia térmica, a eficiência de uma central de cogeração pode alcançar até 70 - 90% (FONSECA, 2009).

4 RESULTADOS

O estado de SC, como evidenciado nos tópicos anteriores, destaca-se pelo seu forte setor agropecuário, que inclui uma produção intensiva de suínos, sendo um destaque nacional e mundial para o setor (ABCS, 2016). Esta intensa atividade gera uma quantidade significativa de resíduos orgânicos, que representam uma matéria-prima valiosa para a produção de biogás. Mediante políticas de incentivo adequadas e investimentos em tecnologia, o estado de SC tem um potencial considerável para se tornar um líder na produção de H₂ no Brasil, através do processo de reformação a vapor deste biogás produzido, representando uma oportunidade significativa para a transição energética do setor agropecuário catarinense.

A rota tecnológica, que envolve a conversão do biogás em H₂ e CO₂, é um método que pode ser amplamente utilizada devido à sua eficiência e escala industrial. No entanto, a eficiência ecológica deste processo é uma preocupação devido às emissões de CO₂ (BRAGA et al., 2012). Melhorias tecnológicas, como CCS e o uso de fontes de energia renováveis, são cruciais para mitigar os impactos ambientais do processo de reformação. Desta forma, o subsequente capítulo visa avaliar o potencial teórico de produção de H₂ para fins energéticos no estado de SC a partir da reforma do biogás proveniente da digestão anaeróbia dos resíduos biológicos do rebanho suinícola. Em paralelo a sua alta eficiência em termos de produção de H₂, esta rota tecnológica apresenta desafios ambientais significativos. A principal preocupação ecológica associada é a emissão de CO₂, um potente GEE. A partir desta premissa foi realizado também uma avaliação teórica da Eficiência Ecológica para elucidar se esta rota pode auxiliar na descarbonização do setor agropecuário catarinense e, por consequência, auxiliar no combate às mudanças climáticas.

4.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DE SANTA CATARINA

O estado de SC, como evidenciado nos tópicos anteriores, destaca-se pelo seu forte setor agropecuário, que inclui uma produção intensiva de suínos, sendo um destaque nacional e mundial para o setor (ABCS, 2016). Esta intensa atividade gera uma quantidade significativa de resíduos orgânicos, que representam uma matéria-prima valiosa para a produção de biogás. Este capítulo tem como objetivo apresentar uma estimativa do potencial de produção de biogás

no estado de Santa Catarina através das metodologias propostas pela CIBiogás-ER e por Kunz e Oliveira (MITO et. al, 2018).

O cálculo realizado para ambas metodologias levou em conta um total de 9.825.846 cabeças de suínos alojadas nas propriedades rurais do estado de SC no ano de 2022 (IBGE, 2023). O resultado para esta etapa do estudo encontra-se disponível na Tabela 17. Os resultados obtidos destacam o elevado potencial de produção de biogás em virtude da quantidade expressiva de dejetos suínos produzidos no estado.

Tabela 17 - Resultados obtidos de acordo com as metodologias propostas.

Metodologia	Plantel animal (cabeças)	Dejetos (m ³ .dia ⁻¹)	Volume médio de CH ₄ (m ³ .dia ⁻¹)
CIBiogás-ER	9.825.846	43.823,27	705.121,9
Kunz e Oliveira	9.825.846	43.823,27	1.047.157,1

Fonte: Próprio autor

4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Realizados os cálculos de potencial de produção de biogás no estado de Santa Catarina a partir dos dejetos suínos, procedeu-se com a formulação do potencial de produção de H₂ no estado. Utilizando-se da equação da eficiência geral da reforma (Equação 25), pôde-se extrair que a reforma do biogás para obtenção de H₂ possui uma eficiência teórica de 70%.

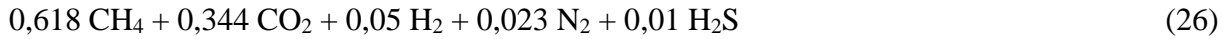
$$\eta_R = \frac{(m_{H_2} \times h_{H_2})}{(m_{biogás} \times h_{biogás}) + (m_{H_2O} \times h_{H_2O})} = 70\% \quad (25)$$

De acordo com Singh et al (2016), a SMR é aproximadamente 72% eficiente. Para Garcia, Avendaño e Medrano (2023) as rotas de SMR e SBR possuem uma eficiência de 75-85% (Tabela 6) e 75% respectivamente. Desta forma, o valor teórico encontrado no estudo apresenta robusto embasamento de acordo com a literatura adotada.

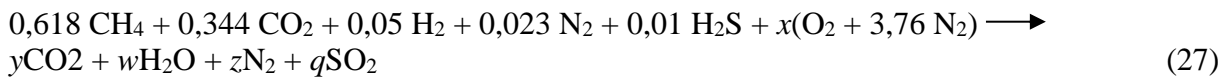
Logo, partindo do resultado de produção média diária de CH₄, 1.047.157,1 m³.dia⁻¹ segundo metodologia proposta por Kunz e Oliveira (MITO et. al, 2018) no estado SC, e da eficiência teórica de reforma (SMR) calculada (70%) neste tópico, é perfeitamente plausível aferir que o estado catarinense tem a capacidade de produzir 733.009,98 m³.dia⁻¹ de H₂.

4.3 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

Assumindo que a caldeira (Figura 41) utilize biogás para a queima sem processos de tratamento, seguiu-se a composição especificada na Equação 26 (BRAGA et. al, 2012).



Primeiramente, avaliou-se a combustão do biogás sem ar excedente (Equação 27), para permitir o cálculo dos coeficientes estequiométricos envolvidos (Equações 28 - 32) (BRAGA et. al, 2012).



$$y = 0,618 + 0,344 = 0,962 \quad (28)$$

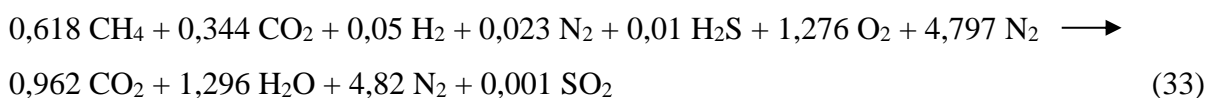
$$q = 0,01 \quad (29)$$

$$w = \frac{0,618 \times 4 + 0,05 \times 2 + 0,01 \times 2}{2} = 1,296 \quad (30)$$

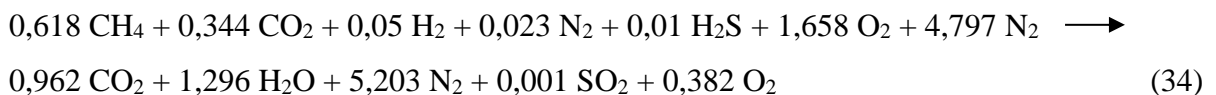
$$x = \frac{y \times 2 + w + q \times 2 - 0,344 \times 2}{2} = 1,276 \quad (31)$$

$$z = 0,023 + x \times 3,76 = 4,82 \quad (32)$$

Logo, é possível concluir a seguinte Equação (33) geral.



Para a combustão com um excedente de 30% de ar, a Equação (34) é a seguinte:



Para determinar a eficiência ecológica (ϵ), que avalia o impacto ambiental dos gases prejudiciais liberados na atmosfera resultantes da combustão de um combustível específico em comparação com a energia efetivamente gerada por uma usina termoelétrica, aplicam-se as Equações 35 – 37 (BRAGA et al., 2012).

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204 \times \eta (\text{sistema})}{\eta (\text{sistema}) + \Pi g} \times \ln(135 - \Pi g) \right]^{0.5} \quad (35)$$

$$\Pi g = \frac{(CO_2)_e}{PCI} \quad (36)$$

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 80(SO_2) + 50(NO_x) + 67 (MP) \quad (37)$$

Onde:

ε = Eficiência ecológica;

$(CO_2)_e$ – Dióxido de carbono equivalente ($kg_{poluente}/kg_{comb}$);

PCI – Poder Calorífico Inferior do Combustível (MJ/kg_{comb});

Πg – Indicador de poluição (kg_{comb}/MJ);

MP – Material Particulado.

Para estimar as emissões do processo de reforma a vapor do biogás, aplicou-se a equação global da reforma (Equação 37), identificando o CO_2 como a única emissão. Na Tabela 18 é possível observar as emissões de combustão do biogás realizado na caldeira. De acordo com Braga et al. (2012), para realizar os cálculos das emissões resultantes da combustão, recorreu-se ao software TCW (Thermochemical Information and Equilibrium Calculations). Este programa permitiu determinar todos os produtos resultantes da combustão, considerando um excesso de ar de 30% e baseando-se em sua composição.

Tabela 18 - Emissões de poluentes durante o processo de reforma do biogás.

Componentes	Combustão do Biogás (kg/kg de Biogás)	Reforma a vapor
CO ₂	0,2815	1,92
SO ₂	0,00231	-
NO _x	0,0000231	-
MP	-	-

Fonte: Braga et al. (2012).

Para aferir o poder calorífico inferior (PCI) teórico do biogás considerou-se uma composição de 65,8% de CH_4 , 34,2% de CO_2 , cujo valor é conhecido como 20.706 kJ/kg (SILVA et al., 2005). Partindo da premissa que o tipo de dejetos animal utilizado não influencia no cálculo de PCI do biogás, mas sim a concentração de CH_4 presente, preconizou-se a

utilização do dado extraído da literatura. Como é possível observar na Tabela 19 (ZANK et al., 2020), o valor adotado nesta etapa se mostrou consistente para este estudo.

Tabela 19 - Composição química e PCI.

Composição química	Poder Calorífico (Kcal/kg)	Poder Calorífico (KJ/kg)
10% CH ₄ e 90% CO ₂	465,43	1948,29
40% CH ₄ e 60% CO ₂	2333,85	9769,50
60% CH ₄ e 40% CO ₂	4229,98	17706,70
65% CH ₄ e 35% CO ₂	4831,14	20223,15
75% CH ₄ e 25% CO ₂	6253,01	26175,10
95% CH ₄ e 05% CO ₂	10469,60	43825,75
99% CH ₄ e 01% CO ₂	11661,02	48814,03

Fonte: Zank et al. (2020).

Com os dados pertinentes em vista, é possível concluir as seguintes deduções das Equações 36 e 37 que se seguem.

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)e}{PCI} = \frac{2,387 \text{ kg/kg}}{20,706 \text{ MJ/kg}} = 0,1152 \text{ MJ/ kg}_{\text{poluente}} \quad (36)$$

$$(CO_2)e = (CO_2) + 80(SO_2) + 50(NO_x) + 67 (MP) = 2,387 \text{ kg}_{\text{poluente}}/\text{kg}_{\text{comb}} \quad (37)$$

Desta forma, com a informação disponível de eficiência da caldeira (foi adotada uma média de 80%), foi avaliada através da Equação 38 (BRAGA et al., 2012) a eficiência global do sistema de reforma a vapor do biogás. Na Equações 35 é possível observar o resultado obtido de eficiência ecológica para este estudo teórico.

$$\eta_{\text{(sistema)}} = \eta_{\text{(caldeira)}} \times \eta_{\text{(reforma)}} \quad (38)$$

$$\eta_{\text{(sistema)}} = 0,80 \times 0,70 = 0,56$$

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204 \times \eta_{\text{(sistema)}}}{\eta_{\text{(sistema)}} + \Pi_g} \times \ln(135 - \Pi_g) \right]^{0,5} \quad (35)$$

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204 \times 0,56}{0,56 + 0,1152} \times \ln(135 - 0,1152) \right]^{0,5} = 0,91$$

A partir do resultado de 0,91 (91%), conclui-se que o método elaborado neste estudo demonstra uma eficiência ambiental excepcionalmente elevada, demonstrando que o processo

de combustão de biogás para a produção de energia renovável é altamente vantajoso do ponto de vista ambiental.

5 CONCLUSÃO

A crescente demanda energética mundial e a intensificação das exigências para a redução de emissões poluentes destacam a urgência por opções que se alinhem ao desenvolvimento sustentável. Desta forma, um novo foco emergiu na pauta global: promover mudanças ambientais e energéticas em diversas regiões do planeta para assegurar um futuro ecologicamente sustentável e verde. (OLIVEIRA, 2022). Tal perspectiva é corroborada pelo estabelecimento de estratégias nacionais, políticas governamentais e planejamentos tecnológicos em diversos países, um movimento que vem se intensificando nos últimos anos (BRASIL, 2022).

Todavia, a lacuna entre as aspirações e a realidade na luta contra as mudanças climáticas continua a ser significativa. O aumento das emissões de CO₂, a distribuição desigual de responsabilidades entre nações e os investimentos míopes em combustíveis fósseis elevam o risco de o mundo se distanciar ainda mais de um futuro sustentável (IRENA, 2019). Nesse contexto, o H₂ emerge como uma nova matriz energética promissora, oferecendo a oportunidade de substituir combustíveis fósseis e contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.

A utilização do H₂ como vetor energético apresenta diversas vantagens, incluindo a redução das emissões de GEE, a diversificação da matriz energética e a promoção do desenvolvimento sustentável. No entanto, a implementação em larga escala do uso do H₂ enfrenta desafios significativos, como o desenvolvimento de tecnologias de produção, armazenamento e distribuição eficientes e econômicas, bem como a criação de uma infraestrutura adequada (CASTRO et al., 2023). Além disso, é necessário garantir que a produção de H₂ seja realmente sustentável e não contribua para outros problemas ambientais, como a degradação dos ecossistemas ou o esgotamento de recursos naturais. O desenvolvimento da economia do hidrogênio ainda está em sua fase inicial, e seu êxito dependerá da colaboração entre os diferentes setores público e privado.

Todavia, como explicitado no estudo, a obtenção de H₂ através das reformas de hidrocarbonetos e da síntese através de biomassa, se configurou como uma peça chave na transição para um futuro energético sustentável, principalmente para setores que contribuam largamente com a emissão de GEE. Entretanto, é um equívoco pensar que seus benefícios são unicamente ambientais. Sem dúvida, a transição para fontes de energia renováveis reduz substancialmente a poluição e aprimoram a qualidade do ar, porém, a mudança de paradigma

gerada pela transição energética também representa uma significativa oportunidade em termos de prosperidade econômica, criação de empregos e progresso social das comunidades envolvidas.

A partir dos resultados alcançados, pode-se concluir que a reforma a vapor do biogás demonstrou ser uma tecnologia altamente eficiente (70%) e ecologicamente benéfica (0,91) para a produção de energia. Esse processo converte o biogás em H_2 e outros gases valiosos com uma elevada taxa de eficiência, aproveitando ao máximo o potencial energético do biogás. Além disso, a reforma a vapor do biogás contribui significativamente para a redução das emissões de GEE, promovendo uma alternativa mais limpa e sustentável em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais. Combinando a capacidade de transformar resíduos em recursos valiosos com um impacto ambiental reduzido, a reforma a vapor do biogás se destaca como uma solução promissora para enfrentar os desafios energéticos e ambientais do presente e do futuro.

Este estudo investigou uma visão geral da economia do H_2 , abordando seus desafios e oportunidades, e incluindo análises dos mais recentes relatórios sobre avanços tecnológicos, custos e políticas nacionais relacionadas ao H_2 . Resta saber se a civilização industrial, com todas as suas liberdades, reside em um curto intervalo histórico entre a restrição ecológica e a catástrofe ambiental. Isso será determinado pela habilidade da humanidade em descarbonizar sua economia o mais rápido possível (CECHIN, 2010).

Por fim, recomenda-se em futuros trabalhos o estudo mais aprofundado acerca das outras rotas tecnológicas evidenciadas neste projeto, com o intuito de traçar paralelos entre os diferentes processos de produção de H_2 . Outra recomendação seria a formulação de estudos empíricos com modelos de bancada para produção do gás síntese como forma de balizar os resultados teóricos obtidos anteriormente.

REFERÊNCIAS

- ABCS. Associação Brasileira dos Criadores de Suínos. **Mapeamento da suinocultura brasileira**. 1a.ed. Brasília: SEBRAE/ABCS, 2016.
- ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório anual de 2023**. Disponível em: <<https://abpa-br.org/abpa-relatorio-anual/>> Acesso em: 10 abril 2024.
- ABE, J. O.; POPOOLA, A. P. I.; AJENIFUJA, E.; POPOOLA, O. M. **Hydrogen Energy, Economy and Storage: Review and Recommendation**. International Journal of Hydrogen Energy, 2019.
- Alemanha e Canadá firmam acordo para compra de hidrogênio limpo**. Disponível em: <https://epbr.com.br/alemanha-e-canada-firmam-acordo-para-compra-de-hidrogenio-limpo/>. Acesso em: 30 maio 2024.
- ANDERSSON, J.; GRÖNKVIST, S. **Large-scale storage of hydrogen**. International Journal of Hydrogen Energy, 2019.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final**. 2a.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
- ASHRAFI, M.; PFEIFER, C.; PROLL, T.; HOFBAUER, H. **Experimental study of model biogas catalytic steam reforming: impact of sulfur on the deactivation and regeneration of Ni-based catalysts**. Energy & Fuels, Washington, v. 22, n. 6, 2008.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2023: **Ano base 2022**. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2023.
- BARROS, E. C.; NICOLOSO, R.; OLIVEIRA, P. A. V.; CORRÊA, J. C. **Potencial agrônômico dos dejetos de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019.
- BARTACEK, J.; ZABRANSKA, J.; LENS, P. N. L. **Developments and constraints in fermentative hydrogen production**. Biofuels Bioproducts & Biorefining, 2007.
- BNDES. **Hidrogênio de Baixo Carbono: Oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>> Acesso em: 20 abril 2024.
- BRAGA, L. B. **Análise Econômica do uso de Célula a Combustível para Acionamento de Ônibus Urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Campus Guaratinguetá, Brasil, 2010.
- BRAGA L. B; SILVEIRA, J. L; SILVA, M. E; TUNA, C. E; BOLOY, R. A. M. **Análises técnica, econômica e ecológica da reforma a vapor de biogás**. Departamento de Energia, Universidade Estadual Paulista - Campus Guaratinguetá, Brasil, 2012.

BRASIL. **Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional do Hidrogênio (2023-2025)**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>/ Acesso em: 10 maio 2024.

CASTRO, N.; BRAGA, S. L.; PRADELLE, F.; CHAVES, A. C.; CHANTRE, C. **A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. 1a.ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2023.

CHECHIN, A. **A natureza como limite da economia. A contribuição de Nicholas Georgescu-Roegen**. São Paulo: Senac; Edusp, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2a.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

Como funcionam os carros com célula a combustível hidrogênio? Disponível em: <https://engenharia360.com/carros-com-celula-a-combustivel-hidrogenio/>. Acesso em: 1 jun. 2024.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. **Hydrogen Production for Energy: An Overview**. International Journal of Hydrogen Energy, 2019.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. Wiley-VCH, 2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Distrito Federal, 2021.

FONSECA, A. R. **Eficiência energética e a queima de combustíveis limpos**. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, 2009.

GABRIEL, R. O. **Análises energética, econômica e ambiental de um micro-CHP com célula a combustível usando gás natural e painéis fotovoltaicos para aplicações residenciais e industriais**. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

GARCIA, D. P.; D.; AVENDAÑO, A. R.; MEDRANO, R. V. **Hydrogen from Natural Gas and Biogas: Building Bridges for a Sustainable Transition to a Green Economy**. Gas Science and Engineering, 2023.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3a.ed. São Paulo: EDUSP, 2012.

HALLENBECK, P. C.; GHOSH, D. **Advances in fermentative biohydrogen production: the way forward?** Trends Biotechnol, 2009.

HARARI, Y. N. **21 Lições para o Século XXI**. 1a.ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2018.

HARARI, Y. N. **Homo Deus: uma breve história do amanhã**. 1a.ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2016.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Global Energy Transformation – A Roadmap to 2050**, IRENA, Abu Dhabi, 2019

JUNGES, R. S. **Automação de reator de hidrogênio para alimentação de motogerador em geração distribuída**. Dissertação (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Brasil, 2019.

KALAMARAS, C. M.; EFSTATHIOU, A. M. **Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments**. Conference Papers in Energy, 2013.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

ŁUKAJTIS, R.; HOŁOWACZ, I.; KUCHARSKA, K.; GLINKA, M.; RYBARCZYK, P.; PRZYJAZNY, A.; KAMIŃSKI, M. **Hydrogen production from biomass using dark fermentation**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018.

MACHADO, F. S.; PEREIRA, L. G. R.; GUIMARÃES JR., R.; LOPES, F. C. F.; CARNEIRO, J. C.; CHAVES, A. V.; CAMPOS, M. M.; MORENZ, M. J. F. **Emissões de metano na pecuária: conceitos, métodos de avaliação e estratégias de mitigação**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2011.

MITO, J. Y. D. L.; et al. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Embrapa Suínos e Aves. Concórdia, 2018.

MORAES, L. L. **O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região**. Monografia - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil, 2022.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. A **Comparative Overview of Hydrogen Production Processes**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Desafios e oportunidades para redução das emissões de metano no brasil**, 2022.

OLIVEIRA, P. A. V. **Produção e manejo de dejetos de suínos**. Concórdia: Embrapa, 2003.

OLIVEIRA, R. C. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília, 2022.

OLIVEIRA, R. M. **Biosistemas integrados na suinocultura**. Instituto de Tecnologia do Paraná. Dossiê Técnico. 2007.

OSMAN, A. I.; MEHTA, N.; ELGARAHY, A. M.; HEFNY, M.; AL HINAI, A.; AL MUHTASEB, A. H.; ROONEY, D. W. **Hydrogen production, storage, utilization and environmental impacts: a review**. Environmental Chemistry Letters, 2022.

SCHUMER, C.; BOEHM, S. **10 Big Findings from the 2023 IPCC Report on Climate Change**. 2023. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/2023-ipcc-ar6-synthesis-report-climate-change-findings>. Acesso em: 5 maio 2024.

SCHUMER, C.; BOEHM, S.; FRANSEN, T.; HAUSKER, K.; DELLESKY, C. **6 Takeaways from the 2022 IPCC Climate Change Mitigation Report**. 2022. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/ipcc-report-2022-mitigation-climate-change>. Acesso em: 5 maio 2024.

SCHAFFER, J. V.; ALVES, H. J.; MARIN NETO, A. J.; LOPES, D. G.; KUGELMEIER, C. L.; SANTOS, G. R. **Potencial de produção de hidrogênio a partir da reforma catalítica do biogás na região oeste do Paraná**. Revista Tecnológica, v.23, p.119-129, 2014.

SETIC-UFSC. **UFSC inaugura primeira usina de hidrogênio verde de SC**. 2023. Disponível em: <https://noticias.ufsc.br/2023/08/ufsc-inaugura-primeira-usina-de-hidrogenio-verde-de-sc/>. Acesso em: 02 jun. 2024.

SILVA, F. M.; LOPES, A.; CASTRO NETO, P.; DABDOUB, M. J.; SALVADOR, N.; FURLANI, C. E. A.; **Desempenho de Motor Alimentado com Biodiesel Associado ao Biogás**. Revista Biodiesel: o novo combustível do Brasil, p. 361-365, 2005.

TUNA, C. E.; SILVEIRA, J. L.; DA SILVA, M. E.; BOLOY, R. M.; BRAGA, L. B.; PÉREZ, N. P. **Biogas Steam Reformer for Hydrogen Production: Evaluation of the Reformer Prototype and Catalysts**. Int. J. Hydrogen Energy; 2018.

WANGHON, A. J. L. **Energia do hidrogênio**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil - Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. (Ed.) **The biogas handbook: science, production and applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. **As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis**. Exacta, 18(3), p. 502-516, jul./set. 2020.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 97 p. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. **As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis**. Exacta, 18(3), p. 502-516, jul./set. 2020.