

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CAMPUS LITORAL NORTE
DEPARTAMENTO INTERDISCIPLINAR
ENGENHARIA DE GESTÃO DE ENERGIA

Guilherme Almeida da Silva

**Hidrogênio a partir do Biogás: possibilidade do armazenamento de
energia sustentável**

Tramandaí

2023

Guilherme Almeida da Silva

Hidrogênio a partir do Biogás: possibilidade do armazenamento de energia sustentável

Este trabalho foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da atividade de ensino “Trabalho de Conclusão de Curso”, do Departamento Interdisciplinar e aprovado em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Orientadora: Profa. Dra. Gabriela Pereira da Silva Maciel, UFRGS.

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Dr. Lucas Manique Raymundo, UFRGS.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Profa. Dra. Aline Cristiane Pan, UFRGS.

Doutora pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Profa. Dra. Juliana Klas, UFRGS.

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Coordenador Substituto COMGRAD-EGE: Prof. Dr. Amir Roberto De Toni Junior

HIDROGÊNIO A PARTIR DO BIOGÁS: POSSIBILIDADE DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL

Guilherme de Almeida da Silva¹ – nagui17@gmail.com
Gabriela Pereira da Silva Maciel¹ – gabriela.pereira@ufrgs.br

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento Interdisciplinar – Engenharia de Gestão de Energia.

Resumo. No Acordo de Paris, muitos países estabeleceram metas globais ambiciosas para estabilizar e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Uma das formas de atingir essas metas é a chamada transição energética, referida como a transição para tecnologias de energia renováveis e economicamente sustentáveis que auxiliam a mitigar as mudanças climáticas. O hidrogênio tem se mostrado uma solução promissora para países que desejam alinhar desenvolvimento e sustentabilidade, assim como diversificar sua matriz para garantir segurança energética. O hidrogênio vem sendo considerado um armazenador de energia de fonte renovável capaz de diminuir consideravelmente as emissões de CO₂ de alguns setores, pois, a matéria-prima pode ser armazenada e transportada para ser utilizado como fonte de energia ou reagente para produção de materiais. Este estudo revisa a literatura sobre o papel do biogás como combustível de transição para a produção de hidrogênio destacando seu potencial no gerenciamento e aproveitamento energético de resíduos. Neste estudo, se mostrou os efeitos positivos e negativos do uso dos processos da reforma do metano a partir do biogás para a geração de hidrogênio e verificou-se que as principais contribuições do biogás vêm de sua capacidade de melhorar o processo de gerenciamento de resíduos, gerar energia renovável e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, a reforma do biogás é um processo atraente para a produção de hidrogênio no Brasil, visto a utilização de resíduos como matéria-prima e frente a necessidade de implementar uma transição energética, com a utilização de energia renovável, desenvolvimento de processos de produção verdes e uso sustentável dos recursos naturais. O biogás tem um alto potencial para produção de hidrogênio barata e ambientalmente amigável, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, o qual tem um grande potencial de produção de biogás que está sendo desperdiçado. A reforma do biogás é um processo favorável para a produção de gás hidrogênio, bem como para reduzir a demanda do gás natural.

Palavras-chave: Hidrogênio, Biogás, Armazenamento de Energia Sustentável

Abstract. In the Paris Agreement, many countries set scopes global targets to stabilize and reduce greenhouse gas emissions. One way to achieve these goals is the called energy transition, referred to as the transition to environmentally and economically sustainable energy technologies that help mitigate climate change. Hydrogen has proven to be a promising solution for countries that wish to align development and sustainability, as well as diversify their energy sources to ensure energy security. Hydrogen has been considered a renewable source of energy capable of considerably reducing CO₂ emissions in some sectors, since the raw material can be stored and transported to be used as a source of energy or reagent for production of materials. This study reviews the literature on the role of biogas as a transitional fuel for hydrogen production, highlighting its potential in the management and using waste energy. In this study, the positive and negative effects of using methane reforming processes from biogas for hydrogen generation were shown, and it was found that the main contributions of biogas come from its ability to improve the waste management process, generate renewable energy, and reduce greenhouse gas emissions. Therefore, biogas reforming is an attractive process for hydrogen production in Brazil, given the use of waste as raw material and the need to implement an energy transition, with the use of renewable energy, development of green production and sustainable use of natural resources. Biogas has a high potential for cheap and environmentally friendly hydrogen production, especially in developing countries like Brazil, which has a huge biogas production potential that is being wasted. Biogas reforming is a favorable process for producing hydrogen gas as well as reducing the demand for natural gas.

Keywords: Hydrogen, Biogas, Sustainable Energy Storage

1. INTRODUÇÃO

As preocupações com as questões ambientais e a busca para realização de melhorias na relação da humanidade com o meio ambiente estão cada vez mais evidentes no nosso dia a dia. Na área de energia, a questão ambiental é um desafio, visto que no mundo a fonte energética mais utilizada, principalmente na esfera do transporte e indústrias, são os combustíveis fósseis [1].

A humanidade, atualmente, está presenciando um cenário de urgência climática provocado por aquecimento global, em que a temperatura da terra atingiu um aumento de 1°C desde a revolução industrial, e pode chegar a 1,5°C até 2030, o que provoca impactos na biodiversidade de plantas e produção de alimentos, animais, água, oceanos e eventos naturais. O efeito estufa acontece principalmente pela emissão de gases poluentes como metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂) [1],[2] e [3].

O Protocolo de Kyoto foi um acordo internacional, regido após muitos debates entre ambientalistas e chefes de estados, acerca do tema de redução dos gases que contribuem ao efeito estufa para mitigar os impactos climáticos e ambientais. Este protocolo entrou em vigor em 2005 com metas de utilização das fontes de energias renováveis, proteção do meio ambiente, valorização de agricultura sustentável, redução da poluição causada por meio de transporte e redução de metano liberado na atmosfera. O protocolo resultou em mecanismos para alcançar tais metas, são eles: o comércio internacional de emissões de gases do efeito estufa, o mecanismo de desenvolvimento limpo e a implementação conjunta entre os países de ações para conter as emissões de gases de efeito estufa. Após o fim do Protocolo de Kyoto, foi observado que embora esse acordo não obteve os resultados quantitativos esperados, houve uma diminuição das emissões de gases do efeito estufa e a utilização de novas fontes de energias renováveis foi alavancada, além de proporcionar novos debates climáticos globais em temas ambientais [2].

Em 2015, aconteceu o acordo de Paris que tem como principal objetivo impedir que a temperatura da Terra aumente entre 1,5 e 2 °C até o final do século. Segundo previsões, até o final do século a temperatura da Terra será em média 2,7°C maior do que a atual. Este acordo por sua vez possui também o objetivo de diminuição do aquecimento global pela diminuição das emissões de gases causadores do efeito estufa, propondo medidas energéticas sustentáveis, menores índices de desmatamento e a agricultura circular e familiar. Dessa forma, o Acordo de Paris objetiva manter o aumento da temperatura global média abaixo de 2°C, para tanto são necessárias ações de descarbonização do sistema energético mundial [3]. A descarbonização é o processo de redução de emissões líquidas de CO₂ à atmosfera através de aumentos de eficiência e utilização de fontes renováveis para geração de energia. São características de energia não renováveis a utilização de materiais ou substâncias que não se regeneram em tempo curto na Terra, tal como o petróleo que leva milhões de anos para se formar. Energia renovável é aquela que vem de recursos naturais que são naturalmente reabastecidos em tempos, como por exemplo, energia solar, eólica, biomassa, maremotriz e energia das ondas [4].

A energia é demandada na produção da vestimenta que usamos, na comida que comemos, no transporte, no trabalho, em casa e nos lugares em que vamos permeando em si todas as áreas da sociedade. Como a escolha do alimento que fornece a energia necessária para o nosso corpo é importante, o mesmo acontece com as escolhas de fonte de energia num organismo social que abrange diversas pessoas, a chamada sociedade. A sociedade, em séculos de aprendizado observou que existem formas de utilização, geração e transporte de energia mais eficientes. A partir dessa constatação, buscou alavancar melhores índices energéticos (aumentar a contribuição de energias renováveis para a matriz energética e eficiência energética na geração e utilização de energia) e amenizar problemáticas ambientais [3]. Existe atualmente, uma busca por uma matriz energética mais limpa corroborando com a geração de energia limpa, a chamada transição energética. A transição energética é referida como a transição para tecnologias que reduzam as emissões de gases do efeito estufa, como o uso de energias renováveis, que são ambientalmente e economicamente sustentáveis com maior eficiência energética que auxiliam a mitigar as mudanças climáticas [1]. A eficiência energética parte do pressuposto da menor utilização de energia para exercer a mesma atividade, ou utilizar menores recursos para execução da mesma atividade. Esse conceito de eficiência pode ser utilizado na geração de energia, na indústria, nas empresas agropecuárias, utilizando o processo de geração de energia através da biomassa quando não utilizada e principalmente a partir de resíduos [1].

No Brasil, a matriz elétrica é predominantemente renovável, mas a matriz energética ainda se baseia na utilização de combustíveis fósseis, principalmente no setor de transportes. Por isso, o país precisa avançar na transição energética da produção ao consumo. A produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis no Brasil corresponde a 82,9% enquanto na matriz elétrica mundial corresponde apenas a 28,6%, entretanto na matriz energética brasileira o uso de fontes renováveis de energia corresponde a 48,4%, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [5].

As ações para reduzir as emissões precisam ser para além da energia elétrica. O hidrogênio (H₂) tem muitas aplicações na área de geração de energia, pois pode ser usado em substituição aos combustíveis fósseis nos motores de combustão interna, na produção de calor, refrigeração e reconversão para a geração de energia elétrica [6]. O hidrogênio é considerado um vetor energético, possibilitando o armazenamento de energia e favorecendo o acoplamento aos setores de indústrias e transporte [7]. O hidrogênio como um combustível limpo tem a perspectiva de descarbonizar o suprimento global de energia, entretanto como a energia elétrica, o hidrogênio precisa ser obtido de alguma fonte de energia primária. Atualmente, mais de 95% do hidrogênio produzido mundialmente é derivado de combustíveis fósseis por meio da reforma do gás natural e da gaseificação do carvão [8]. Embora o gás natural possa ajudar na transição energética ao reduzir as emissões em comparação com o carvão, há outras implicações de longo prazo do investimento em gás natural que podem prejudicar o cumprimento das metas climáticas. Uma preocupação é que os investimentos em gás natural possam

prejudicar outros em fontes renováveis. Uma opção mais sustentável é a produção do hidrogênio a partir do biogás, o qual contém principalmente CH₄ (50% a 75%) [9], que é o principal componente do gás natural. Portanto, a tecnologia de reforma do gás natural pode ser aplicada para produzir hidrogênio a partir do biogás. O biogás pode ser produzido de maneira geograficamente distribuída e partir de fontes renováveis, como por exemplo, resíduos agrícolas, esterco, lixo orgânico, esgotos, entre outros materiais orgânicos [10]. As fontes renováveis são derivadas diretamente ou indiretamente de plantas, que removem CO₂ da atmosfera para crescerem, por isso o biogás é mais sustentável em relação ao gás natural. Em outras palavras, o gás natural, que é uma alimentação comumente usada para a produção de hidrogênio, pode ser substituído por biogás (um recurso renovável), como foi retratado por SCHOLZ (1993) na década de 90 [11].

A ONU (Organização das Nações Unidas) estipulou medidas para o desenvolvimento sustentável para 2030 e para tanto foram realizadas 17 metas de ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável). Fome zero e Agricultura Sustentável, Energia Limpa e Acessível, Consumo e produção responsável, Cidades e Comunidade Sustentável são exemplos de objetivos que mudam a forma de acesso à energia e alimentação. Levando em conta que a maior parte do biogás pode ser produzido no setor agropecuário, nas granjas e indústrias de alimentos, a energia gerada de forma limpa pode ser um ótimo acesso para cumprir tais objetivos da ONU, podendo além disso fomentar o mercado e criar tecnologias visando um modo de vida sustentável [12].

No Brasil, a transição para uma economia baseada em H₂ somente fará sentido se for pautada no H₂ renovável. No entanto, trata-se de um processo complexo visto que, as indústrias baseadas em combustíveis fósseis devem passar por uma profunda reestruturação para endossar a mudança para uma economia mais verde. A produção de hidrogênio a partir da reforma do biogás de resíduos é uma opção para reciclar o biogás, transformando gases poluentes (CH₄ e CO₂), em combustível e insumo para indústrias como petroquímica, siderúrgicas e de fertilizantes. Este trabalho tem como objetivo destacar o potencial do biogás como fonte de energia e matéria-prima renovável para a produção de hidrogênio, com a utilização de tecnologias consolidadas para a reforma do metano e uso da infraestrutura utilizada, atualmente, para o gás natural.

2. CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS E O POTENCIAL DE PRODUÇÃO NO BRASIL

2.1 Composição do Biogás

O Biogás é resultado da biodigestão ou digestão anaeróbica (processo biológico com a ausência de oxigênio) da matéria orgânica na presença de diversos organismos microbianos. Em linhas gerais, o processo de digestão anaeróbica possui 4 etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na biodigestão, materiais complexos são quebrados e transformados em compostos simples, resultando em uma mistura de metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, amônia e gás sulfídrico. Contudo, as características do biogás dependem da fonte de biomassa utilizada no processo de digestão anaeróbica. Em geral, o biogás é composto por 30-80 % de gás metano, 35-40 % de gás carbônico e possui traços de hidrogênio, oxigênio e gás sulfídrico. A Tab 1 mostra a composição do biogás de algumas fontes de biomassa com relação ao percentual de metano e dióxido de carbono e concentração de ácido sulfídrico [13].

Tabela 1 – Composição do Biogás – BNDES [13]

Fontes de biomassa	Composição do Biogás		
	CH ₄ - %	CO ₂ - %	H ₂ S - ppm*
Amidonaria (mandioca)	54,3	44,9	97,0
Bovinocultura leiteira	59,6	39,1	329,3
Misto (aves de postura + bovinocultura de corte)	69,2	29,8	64,1
Abatedouro de aves	68,2	29,6	1897,1
Suinocultura - terminação	62,0	37,0	2782,3
Suinocultura – produção de leitões	68,4	30,6	1309,1

* ppm corresponde a partes por milhão (mg/L)

Analisando a Tab 1 pode-se observar que a mistura de substratos (aves de postura + bovinocultura de corte) obteve o maior percentual de metano, o que corresponde a quase 70 % da composição. Além disso, foi o substrato com menor concentração de gás sulfídrico (64,1 ppm). As características do biogás dependem também da temperatura, pressão, concentração de metano e outros gases inertes e/ou ácidos. Mas, o fator mais importante para o potencial energético é devido a concentração de metano [13].

A Tab 2, elaborada pela Agência de Recursos Renováveis Alemã exemplifica as estimativas da quantidade de metano obtidas por substrato em Nm³ (Normal metro cúbico, que demonstra a quantidade de gás equivalente em de m³ na CNTP (0°C e 1 atm)) [13].

Tabela 2 – Quantidade de Metano produzida em diferentes substratos

Substrato	Massa seca orgânica (MSO)	Produção de biogás	Produção de metano	Quantidade de metano
	%MSO	Nm ³ /ton substrato	Nm ³ /ton substrato	Nm ³ /ton MSO
Esterco líquido bovino	75 - 82	20 - 30	11 - 19	110 - 275
Esterco líquido suíno	75 - 86	20 - 35	12 - 21	180 - 360
Esterco bovino	68 - 76	60 - 120	33 - 36	130 - 330
Esterco de aves	75	130 - 270	70 - 140	200 - 360
Silagem de milho	85 - 98	170 - 230	89 - 120	234 - 364
Silagem de gramíneas	70 - 95	170 - 200	93 - 109	300 - 338
Grãos de cereais	97	620	320	380
Beterraba-sacarina	90	120 - 140	65 - 76	340 - 372
Beterraba-forrageira	90	75 - 100	40 - 54	332 - 364

Segundo os dados da Tab 2, o substrato grãos de cereais apresenta o maior potencial para a produção de biogás e, apresenta a maior produção de metano. Com relação aos dejetos de animais o esterco de aves se destaca com a produção entre 70 -140 Nm³ /ton de substrato. O biogás (metano) proveniente de atividades agropecuárias é um fator de segurança de energia, pois ele tem o potencial do atendimento da demanda de energia elétrica em áreas distantes no meio rural [13].

O biogás é produzido em abundância no Brasil, no entanto ele se torna um problema ambiental grave se for liberado para a atmosfera sem nenhum tratamento, visto que o metano contido no biogás é vinte e uma vezes mais prejudicial ao meio ambiente comparado com o gás carbônico [10]. Contudo, o biogás possui um alto poder energético, podendo ser utilizado para geração de calor, armazenamento de energia, regulação energética e produção de hidrogênio [11].

2.2 Políticas de incentivo para o uso do biogás

O incentivo ao biogás no Brasil começou na década de 70 quando ocorreu um choque no preço do petróleo e seus derivados promovidos pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Como o país na época importava 80% do seu consumo de gás natural, o biogás se tornou uma alternativa viável economicamente e ambientalmente interessante, visto que diminuía a utilização de derivados de petróleo e se tinha a perspectiva do aumento da geração de biogás no Brasil. Logo após o aumento de preço do petróleo em 1970 foram realizados alguns projetos, mas tais projetos enfrentaram muitos empecilhos não tendo resultados eminentes. Em 1977, foi criado o projeto de difusão do biogás no âmbito de empresas rurais, contudo a ausência de mão de obra especializada inviabilizou o projeto. Em 1982, o governo passou a estimular a construção de biodigestores, o projeto não foi adiante por conta, novamente, da escassez de mão de obra especializada, falta de equipamentos devidamente projetados e manutenção deles [13].

Em 1990, foi instaurado uma política de créditos de carbono que visava uma redução na diminuição de gases do efeito estufa (GEE). O projeto contava com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que possibilitava a venda e créditos de carbono gerados no processo de queima da biomassa. Nesse projeto o biogás não era necessariamente aproveitado como fonte de energia, bastava ser queimado em um *flare*, sendo assim os produtores não estavam integrados no processo. Como o projeto não se sustentava economicamente aos poucos também foi abandonado [13].

Devido a essas experiências, foi criada uma dificuldade reputacional acerca do biogás, que só foi superada a partir do aprimoramento tecnológico e ampliação da capacitação técnica no setor. O aprimoramento tecnológico aconteceu ao longo dos anos, inclusive criando biodigestores de alta taxa, isto é, equipamentos mais eficientes com dispositivos que retêm uma grande quantidade de biomassa. A ampliação de capacitação no setor se deu ao longo dos anos e investimentos governamentais em educação [13]. Em 2002, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) que tem como meta o desenvolvimento de energia a partir de fontes de energias renováveis. O projeto aumentou consideravelmente as plantas de biogás em operação mostrando que até os dias atuais há um aumento no número de plantas no PROINFA [13].

Em 2020, o Projeto de Lei 2193/20 instituiu a Política Federal do Biogás e do Biometano, com o objetivo de incentivar a produção, as pesquisas e o consumo do biogás produzido a partir de resíduos. Outra importante iniciativa visando o fomento do biogás no país foi a inclusão do biometano no RenovaBio, instituído pela Lei 13.576/2021 e regulado pela ANP. O RenovaBio é o programa governamental que tem como meta a descarbonização, certificar as produções de biocombustíveis e instaurar o crédito de descarbonização (CBIO). O CBIO equivale a uma tonelada de emissões de gás carbônico evitadas, equivalente a 7 árvores em termos de captura de carbono. O CBIO pode ser comercializado na bolsa mundial, como uma forma de economia para grandes produtores de biomassa. O preço desse ativo é regulado pela oferta e procura na bolsa, mas coordenado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e Ministério de Minas e Energia (MME). De acordo com a EPE o investimento até 2030 no setor de biocombustíveis pode ser próximo de 1 trilhão de reais, fomentando a atuação do RenovaBio. O Decreto 11.003/2022,

que instituiu a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano com o objetivo de fomentar programas e ações para reduzir as emissões de metano, incentivar o uso de biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível, e contribuir para o cumprimento de compromissos climáticos assumidos pelo país, foi uma das últimas medidas adotadas pelo governo federal no incentivo à produção e utilização do biogás [14].

2.3 O potencial de produção de biogás no Brasil

A produção de biogás no Brasil no ano de 2021, foi de 2,3 bilhões de Nm³, o que corresponde a cerca de 3% do potencial teórico do país, que foi de 84,6 bilhões de Nm³, mostrando o desperdício de energia e o potencial de crescimento do uso do biogás em aplicação energética (geração de energia elétrica, energia térmica e biometano) [15]. O Panorama do Biogás no Brasil 2021 [15] mostra um crescimento de 20% em comparação as plantas de biogás que foram divulgadas no ano de 2020 (675 plantas) para o ano de 2021, onde foram contabilizadas 755 plantas de biogás em operação, 44 em fase de implantação e 12 em reformulação ou reforma, totalizando 811 plantas de biogás, o que demonstra uma continuidade de expansão do mercado do biogás.

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de carne animal, sendo um grande produtor de carne de frango, bovina e suína. Com base em uma estimativa de 0,18 kg/dia de biogás por unidade de aves, pesquisadores calcularam que os frangos de corte poderiam produzir aproximadamente 55 milhões de m³ de biogás e as aves de corte poderiam produzir aproximadamente 9,9 milhões de m³ de biogás por ano [13]. O país também possui um grande potencial de produção de biogás a partir de fontes vegetais, sendo que o setor sucroenergético (derivados da cana de açúcar) na safra de 2019-2020 possui um potencial de geração de aproximadamente 40 bilhões de Nm³/ano de biogás, fontes de mandioca, milho e soja representam um potencial de 0,66, 6,57 e, 5,02 bilhões de Nm³/ano de biogás, respectivamente [13]. Além disso, existem muitas outras fontes de biomassa com alto potencial para geração de biogás. A Tab 3 mostra o potencial anual de biogás, biometano e geração de energia elétrica equivalente para o setor sucroenergético, agroindustrial e do saneamento.

Tabela 3 – Potencial do Biogás no Brasil – adaptado BNDES [13]

Origem	Volume de Biogás (bilhões de m ³ /ano)	Volume de Biometano (bilhões de m ³ /ano)	Geração elétrica equivalente (GWh/ano)
Sucroenergético	39,76	21,06	85,17
Agroindustrial	38,39	19,55	72,10
Saneamento	6,84	2,62	10,28

O setor sucroenergético seguido do agroindustrial são os setores com maior potencial para a geração de biogás segundo os dados da Tab 3, podendo gerar entre 70-90 GWh/ano de energia elétrica equivalente. Atualmente, a principal aplicação energética do biogás é para geração de energia elétrica nas plantas de biogás brasileiras. No ano de 2021, 71% do volume de biogás produzido no Brasil foi para geração de energia elétrica, onde 87% das plantas em operação utilizaram esta fonte energética para tal finalidade. O aproveitamento térmico do biogás para a queima em caldeira para produzir vapor, secagem de grãos, produzir ração, aquecimento de aviários e secagem de lodo de esgoto foi realizado em 11% das unidades em operação, e representou aproximadamente 7% do biogás produzido em 2021. Para movimentar turbinas apenas 1% das unidades utilizaram o biogás para esta finalidade, o que corresponde a um volume 0,3% do biogás produzido em 2021 [15].

Como dito anteriormente, o valor energético do biogás depende do teor de CH₄, que é controlado principalmente pela composição da matéria-prima (vegetal, animal, esgoto, resíduo orgânico etc.). Cada matéria-prima utilizada na produção do biogás possui uma estrutura química específica e essa estrutura pode alterar significativamente a quantidade de metano produzida, diminuindo ou aumentando a eficiência do sistema. Uma das maiores dificuldades do uso do biogás são devido a presença de gás sulfídrico (H₂S), que aumenta a corrosão, reduzindo a vida útil das máquinas e do dióxido de carbono (CO₂) que reduz o poder calorífico do gás. No entanto, essas dificuldades são contornadas com a purificação do biogás, utilização de materiais resistentes a corrosão, uso de purgadores e linhas de condensação durante a produção [16].

2.3 Processos de Purificação do biogás

Para preservar a vida útil dos equipamentos e melhorar a capacidade energética do biogás, transformando-o em biometano, podem ser realizados diferentes tipos de processos: I) purificação por membranas; II) purificação criogênica; III) purificação utilizando água pressurizada; IV) purificação biológica e v) purificação por adsorção com modulação de pressão. A seguir, uma breve explicação sobre cada processo [17]:

I) Processo de purificação por membranas: trata-se de uma barreira que separa duas fases, essa separação limita o acesso do transporte de algumas substâncias químicas. Esse processo exige uma alta demanda de energia, baixa pressão do gás metano, necessidade de diversas etapas para remoção do gás carbônico, sulfídrico e água, tornando o sistema complexo, necessita de materiais como água, amina e carvão ativado. Contudo, o processo possui algumas vantagens

sendo elas, alta eficiência, baixo custo capital, facilidade de operação e manutenção. Além disso, o produto do processo emite gás pressurizado;

II) Processo de purificação criogênico: consiste em diminuir a temperatura para -100°C , liquefazer o sistema e separar os gases. Esse sistema tem uma alta eficiência na separação de gases, contudo seu principal obstáculo é a alta demanda de energia;

III) Processo que utiliza a água pressurizada: consiste na injeção de água pressurizada produzindo colunas de água e separação dos gases. Esse processo possui algumas limitações como a produção de ácido sulfúrico, alta degradação de equipamentos aumentando o custo operacional e média demanda de energia para pressurizar o gás. Entretanto, ele possui fácil aplicação e baixos custos de implementação;

IV) Purificação biológica: consiste na utilização de bactérias para degradação do gás sulfídrico, o procedimento precisa de um meio alcalino com pH entre 8-8,5 para que as bactérias façam a oxidação do sulfeto de hidrogênio com o oxigênio no reator. Esse sistema possui baixa demanda de energia e boas eficiências, única objeção seria o tempo de processo em comparação com os outros processos de purificação.

V) Purificação por adsorção com modulação de pressão: é um dos mais promissores sistemas para filtragem do biogás também chamado de método de adsorção com modulação de pressão (PSA, do inglês *Pressure Swing Adsorption*), consiste na adsorção (processo em que partículas líquidas ou gasosas ficam retidos em sólidos) do material gasoso, na maior parte CO_2 , em um sólido adsorvente a partir de diferentes pressões. Embora, esse método seja muito utilizado para separação de gás carbônico pode ser utilizado também para separação de metano. Esse processo tem baixa demanda de energia, altas eficiências e custo razoável. No entanto, perdas entre 1% e 5% de metano são observadas.

A Fig 1 apresenta um esquema simplificado da purificação do biogás para geração de energia elétrica. Alguns processos requerem mais energia na purificação do biogás, a Tab 4 apresenta o grau de eficiência energética bem como o percentual de purificação dos processos citados anteriormente.

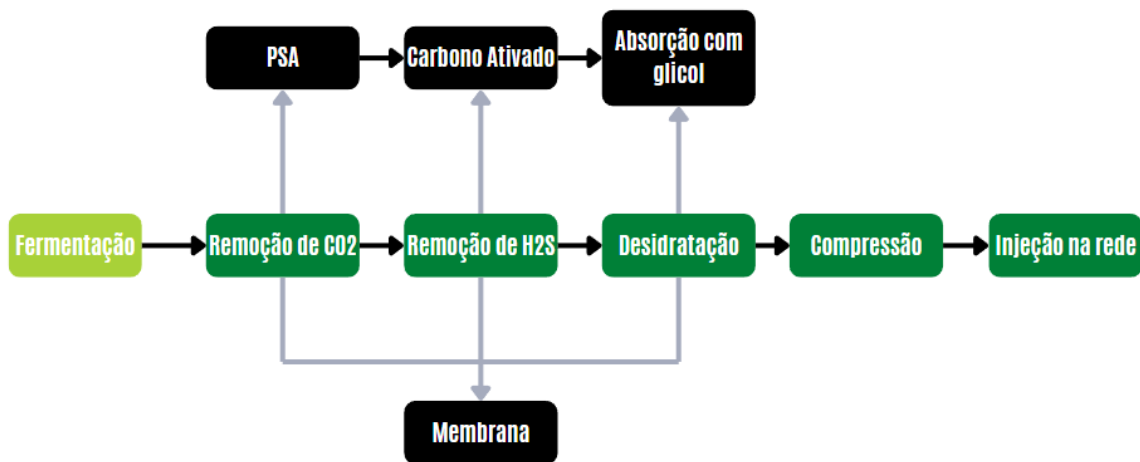


Figura 1 – Purificação do biogás - Moura (2018) [17]

Tabela 4 – Eficiência da purificação para a geração de biometano [18]

Formas de Refino	Eficiência da purificação	Eficiência energética
Membranas	96%	Média, pois é necessário nesse ciclo muita energia
Purificação criogênica	99%	Média, pois nesse ciclo é necessário o resfriamento da água, necessitando a retirada de calor
Água pressurizada	95%	Média, é necessárias ações nesse ciclo que utilizam compressores
Purificação biológica	98%	Alta, é necessária pouca energia nesse ciclo
Adsorção com modulação de pressão	95%	Alta, embora são necessários compressores para esse ciclo.

Como pode ser observado na Tab 4, o método de purificação por adsorção com modulação de pressão (PSA), mesmo com o percentual de purificação de 95%, é o processo de maior eficiência energética e por isso é um dos processos mais utilizados atualmente. Na maior parte dos processos são utilizados compressores e motores para realização do ciclo podendo ser mais um fator de diminuição da eficiência do sistema, pois dependem da eficiência de cada motor e

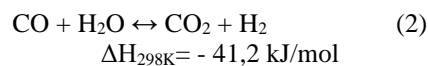
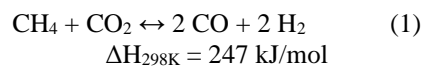
compressor. Existem diversos métodos de purificação, de acordo com o Dalpaz (2019) o sistema de PSA foi o mais eficiente, pois a quantidade de metano no final do processo e os parâmetros econômicos envolvidos podem afetar a viabilidade dos processos [18].

3. PROCESSOS DE REFORMA DO METANO EM HIDROGÊNIO

Independentemente do método de purificação, para produzir hidrogênio a partir do biogás, é necessária a reação de reforma que converta metano em hidrogênio. Dependendo da espécie usada para a oxidação do CH₄ em H₂, as reações de reforma podem ser divididas em: reforma a seco, reforma a vapor, oxidação parcial do metano e reforma autotérmica.

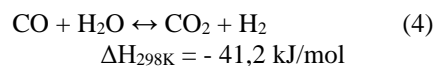
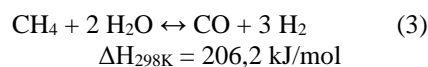
3.1 Processo de reforma a seco

O processo de reforma a seco consiste em utilizar o biogás parcialmente tratado (livre de H₂S) em processos termoquímicos, com temperaturas de 700 °C a 800 °C, em pressão atmosférica, utilizando catalisadores (substância que quando adicionada acelera a velocidade de formação dos produtos) e um reator de leito fixo (partículas não se movimentam dentro do reator). No processo de reforma a seco o produto resultante é o gás de síntese (2 CO + 2 H₂), demonstrado na Equação 1, podendo em seguida transformar esse monóxido de carbono (CO) em dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio, aumentando a eficiência do sistema, como demonstrado na Equação 2. Em contrapartida, este processo envolve dois gases do efeito estufa, possui uma produção de H₂ descentralizada e maior tendência a formação do “coque”. A reforma a seco é mais propensa a formação do coque desativando o catalisador, isso é devido ao maior teor de carbono na superfície catalítica. Para amenizar esse efeito estão sendo empregados catalisadores bivalentes, contudo ainda está em desenvolvimento a utilização destes catalisadores. Como catalisadores bivalentes empregados pode-se citar o PdNi, suportado em alumina [19] e [20].



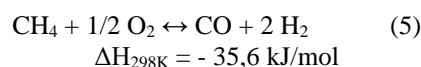
3.2 Reforma a vapor

O processo de reforma a vapor consiste em utilizar o biogás (metano) e vapor de água a fim de se obter dióxido de carbono e o gás hidrogênio, demonstrado pela equação 3. Contudo, para esse processo ocorrer deve-se ter uma grande quantidade de biogás e concentrações baixíssimas de H₂S, menos de 10 ppm. Para que a reação ocorra é necessário condições favoráveis de temperatura, vapor de água e catalisadores. Os catalisadores geralmente utilizados são o níquel (Ni) suportado em matrizes de Al₂O₃, SiO₂, ZrO₂, CaO e MgO. Além disso, podem ser utilizados metais nobres como Pt, Rh, Pd. O Ni tem a vantagem do menor custo, porém com a desvantagem de ser menos estável sofrendo desativação por causa da formação de coque [20]. Assim como na reforma a seco o monóxido de carbono pode reagir com a água e aumentar a produção de H₂, conforme equação 4.



3.3 Processo de oxidação parcial do metano

O processo de oxidação parcial do metano ou reforma oxidativa consiste no metano aquecido na presença limitada de oxigênio puro em um reformador. A reação é exotérmica e é considerada uma reação mais rápida que a reação da reforma a vapor [20]. A reação de oxidação parcial do metano é apresentada na equação 5.



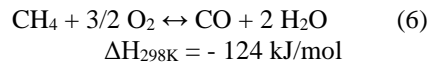
A oxidação parcial atrai novos estudos e atenção nas indústrias por ser uma reação mais eficiente energeticamente que a reforma a vapor. A mistura de hidrogênio e monóxido de carbono é produzida numa relação molar de 2/1 podendo ser um chamativo, além de poder utilizar o beneficiamento do monóxido de carbono como na Equação 2 e Equação 4.

Nas reações de reforma oxidativa são empregados catalisadores como, Pd, Pt, Rh e Ru e metais não-nobres, como Ni, Co e Fe, diversos suportes são utilizados nesses catalisadores como Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 e TiO_2 [20].

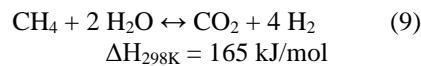
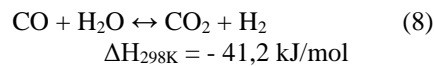
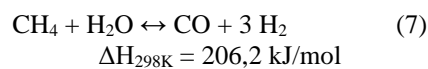
3.4 Reforma autotérmica

A reforma autotérmica consiste na combinação da reforma a vapor e com o processo de oxidação parcial. Geralmente, são utilizados dois tipos de reação. O primeiro é empregado um leito catalítico no qual as reações de combustão e reforma a vapor são realizadas simultaneamente, o segundo possui duas seções separadas, onde na primeira ocorre a oxidação parcial (Equação 6) utilizando um queimador, na segunda seção ocorrem as reformas em leito catalítico, esse último converte o biogás em hidrogênio, conforme Equações 7 a 9 [20].

Zona de combustão:



Zona catalíticas e térmicas:



A Tab 5 apresenta as entalpias de formação e a capacidade calorífica dos gases reagentes das reações de produção de hidrogênio (CO , CO_2 , CH_4 , $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$) e a Tab 6 apresenta de as entalpias de formação do hidrogênio nos diferentes tipos de reforma do metano.

Tabela 5 – Entalpias de formação e capacidade calorífica CO , CO_2 , CH_4 , $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ – adaptado Atkins [21]

Substância	Entalpia de formação (kJ/mol)	Capacidade calorífica molar (J/(K * mol))	Entalpia de combustão (kJ/mol)
$\text{CO}_{(g)}$	-110,53	29,14	-282,84
$\text{CO}_2_{(g)}$	-393,51	37,11	-
$\text{CH}_4_{(g)}$	-74,81	35,31	-890,35
$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	-285,83	75,29	-
$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$	-241,82	33,58	-
$\text{H}_2_{(g)}$	0	28,82	-285,77

Tabela 6 – Entalpias de formação do hidrogênio nos diferentes processos de reforma do metano [22], [23] e [24]

Processos de reforma	Quantidade de mols de Hidrogênio por quantidades de mols de Metano (n° de mols H₂/ n° mols CH₄)	Entalpia de formação a 298K (kJ/mol)
Reforma a vapor com reutilização de monóxido de carbono	4	165
Reforma a vapor sem reutilização de monóxido de carbono	3	206,2
Reforma seca com reutilização de 2 mols de monóxido de carbono	4	165
Reforma seca sem reutilização de monóxido de carbono	2	247,4
Reforma oxidativa com reutilização de monóxido de carbono	3	-71,2
Reforma oxidativa sem reutilização de monóxido de carbono	2	-35,6
Reforma Autotérmica zona catalítica e térmica, com a reutilização de 2 mols de monóxido de carbono	3	165
Reutilização do monóxido de carbono gera 1 mol de H₂.		
Reutilização do monóxido de carbono	-	-41,2

O tipo de reação de reforma e as condições de reação são fatores importantes que devem ser considerados no processo de reforma do biogás porque podem afetar a produção de hidrogênio, a resistência à formação de carbono e a eficiência energética [22], [23] e [24]. Em geral, as reações de reforma são endotérmicas e, portanto, são favorecidas em altas temperaturas, o que resultam em baixa eficiência energética e baixa vida útil do catalisador (para catalisadores com baixa estabilidade a altas temperaturas), visto que o catalisador tende a perder a resistência mecânica [25]. Artigos recentes destacaram desafios técnicos e científicos, incluindo o desenvolvimento de recursos energeticamente eficientes e catalisadores altamente ativos e resistentes a envenenamento [26] e [27]. A utilização de catalisadores com maior atividade catalítica e estabilidade no processo de reforma pode levar a uma diminuição das altas temperaturas comumente utilizadas, o que pode ser acompanhado por uma melhora na velocidade da reação e uma desaceleração no processo de desativação do catalisador. Ainda são escassas as pesquisas sobre a reforma do biogás para produção de hidrogênio no Brasil. A Tab 7 apresenta a comparação das características físico-químicas do hidrogênio e do metano.

Tabela 7– Características físico-químicas do hidrogênio e metano– adaptado Poveda (2007) [27]

Propriedades	Hidrogênio	Metano	Unidades
Peso molecular	2,016	16,043	U
Conteúdo de energia (Poder calorífico Inferior)	120	50,02	MJ/kg
Densidade Energética Volumétrica	8,49	21,14	MJ/l
Temperatura de autoignição	585	540	°C
Limite de flamabilidade (no ar)	4-75	5,3-15	% Vol
Energia de Ignição	0,02	0,29	mJ
Temperatura da chama (no ar)	2,045	1,875	°C
Propagação da chama (no ar)	2,65	0,4	m/s
Coefficiente de difusão (no ar)	0,61	0,16	cm ² /s
Limite de detonabilidade (no ar)	18,3-59	5,7-14	% Vol
Mistura estequiométrica (maior facilidade de ignição no ar)	29	9	% Vol
Porcentagem de energia térmica radiante	17-25	23-32	%
Visibilidade da chama (no dia)	Não	+/-	-
Toxicidade	Não	Sim	-

De acordo com a Tab 7 o gás do hidrogênio tem uma energia de ignição baixa (0,02 mJ) o que faz ele se tornar inflamável, contudo, ele possui um alto coeficiente de difusão do ar. O metano por sua vez possui uma baixa ignição (0,29 mJ), mas em comparação ao hidrogênio a energia de ignição é maior, no entanto, possui um menor coeficiente de difusão do ar. O hidrogênio em comparação com o metano tem a vantagem de não ser tóxico e não ser um poluente atmosférico [28].

4. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

4.1 Armazenamento do biogás

O armazenamento do gás natural ocorre em formas subterrâneas, sendo quatro formas principais: em reservatórios de gás natural ou de petróleo, após sua principal utilização ser extinta, em aquíferos, em cavernas e/ou cavidades salinas e por último em minas desativadas. Os armazenadores possuem características físicas únicas, tais como: porosidade, permeabilidade, capacidade, taxa de perdas, e possuem algumas características econômicas relevantes para instalação e operação [29] e [30]. O biogás após processo de purificação (biometano) tem na sua composição mais de 90% de metano e pode ser armazenado e despachado com o gás natural. A Figura 2 mostra o esquema do aquífero, campo depletado e caverna salina para o armazenamento de gás natural, mas os mesmos podem ser utilizados para o armazenamento do biometano.

Em cavernas ou cavidades salinas para a estocagem são necessários energéticos inertes na água e no sal, como: óleo cru, combustíveis, gases, dentre outros. Essa estocagem embora possui um custo elevado possuem altas taxas de injeção e retirada do gás [29] Entende-se como gás de base o gás que ficará permanentemente estocado, a fim de manter a pressão mínima. O gás útil consiste no gás que fica temporariamente no reservatório e a taxa de retirada é diagnosticada como a taxa com que é possível a retirada do gás útil, ela depende da pressão dos gases, do volume e parâmetros físicos da instalação [29] e [30] Os aquíferos possuem massas rochosas com alta porosidade e permeabilidade, no meio das rochas é encontrado um acúmulo de água, para o armazenamento em aquífero são necessários monitoramentos para que não haja fluxo de água no reservatório do gás. O aquífero possui um diferencial que é a proximidade de centros urbanos, não requerem a injeção de água e atendem tanto as demandas sazonais relativas as diferentes estações [29] Utilizar reservatórios depletados de gás natural e petróleo que já exauriram totalmente é uma ótima forma de armazenamento de biometano, eles possuem uma facilidade de armazenamento visto que passaram milhões de anos estocando

hidrocarbonetos, além de possuir uma tecnologia agregada facilitando o acesso ao armazenamento. Uma precaução antes da instauração de reservatórios depletados é uma análise do reservatório, pois o mesmo, pode possuir resíduos que podem interagir com o biometano. Geralmente, esses reservatórios são os mais baratos e fáceis de desenvolver, operar e manter o biometano, além de conseguir atender a demanda pico ou sazonais no decorrer do ano [29].

Algumas minas desativadas só podem realizar o armazenamento de líquidos por conta do custo elevado para conseguir regular as pressões de gás dentro da mina, a regulação da pressão é o principal fator da possibilidade de utilização das minas desativadas para o armazenamento de gás metano. A estocagem possibilita um pequeno diferencial de pressão, estas minas podem ser utilizadas como um “alívio” (utilizadas como uma forma de estocagem rápida para aliviar a pressão da rede de distribuição), mesmo com baixa pressão as minas podem possuir uma capacidade alta de armazenamento. Além disso, nas minas, na maioria das vezes, não é necessária a utilização de compressores [29]. A Tab 8 apresenta as vantagens, desvantagens e as características do uso de aquíferos, campo depletado e caverna salina para o armazenamento de biometano.

Tabela 8 – Características, vantagens e desvantagens do armazenamento de gás – EPE [31]

	Campo Depletado	Aquífero	Caverna Salina
Uso principal	Ciclo Sazonal	Ciclo Sazonal	Picos de consumo
Vantagens	Instalação pronta e conhecida; grande capacidade de gás útil	Moderada capacidade de gás útil; adequado na ausência de campo depletado	Altas taxas de injeção e retirada; baixo volume de gás de base; alto número de ciclos
Desvantagens	Em geral, baixas taxas de injeção e retirada	Alto custo de delimitação da estrutura; alto volume de gás de base; longo tempo de construção	Menor capacidade de gás útil; alto custo de operação
Gás de base em relação à capacidade total (%)	50	50-80	20-30
Período de Injeção (dias)	120-200	120-200	20
Período de retirada (dias)	60-120	60-120	5-20
Tempo de projeto, construção, planejamento (anos)	5-8	10-12	1-5

4.2 Armazenamento do hidrogênio

Atualmente, no Brasil está sendo instaurado o armazenamento líquido e gasoso do hidrogênio, pesquisas fomentam o armazenamento de energia utilizando hidretos metálicos, uma tecnologia conhecida é o armazenamento gasoso. Sabe-se que o armazenamento do hidrogênio líquido pode ser uma forma de armazenamento de energia. No entanto, requer temperaturas criogênicas, porque o ponto de ebulição do gás hidrogênio é de $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pressão de 1 atm. O armazenamento do gás hidrogênio normalmente requer cilindros ou tanques de alta pressão (350-700 bar). A alta eficiência do processo de pressurização dos gases torna o processo uma alternativa eficaz para o armazenamento de energia, visto que no processo de liquefação a energia necessária para resfriar o gás pode ser inviável juntamente com o valor monetário para realização do processo. As tecnologias que utilizam hidretos metálicos e adsorção com nanotubos de carbono possuem altas eficiências e por isso, também podem ser promissoras. Outra tecnologia são os carreadores que consistem em compostos químicos que conseguem armazenar o hidrogênio em moléculas maiores, as liberando depois, funcionando assim como um armazenador de hidrogênio. Existem 2 tipos de carreadores: os reversíveis que após a liberação do gás podem ser reutilizados, e os não reversíveis que após a liberação do hidrogênio não podem ser reutilizados. Os carreadores precisam de energia para a sua formação e investimentos econômicos em pesquisa para se consolidarem no mercado [15].

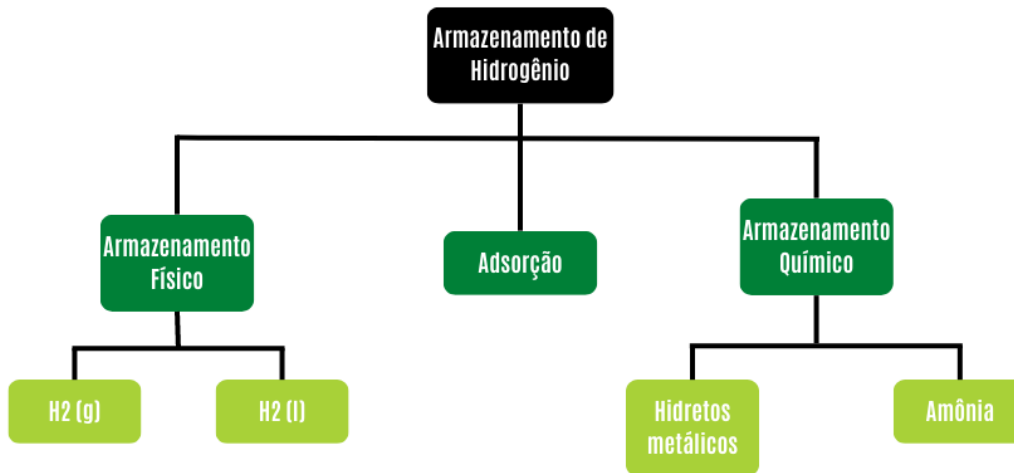


Figura 3 – Formas de armazenamento do Hidrogênio - adaptado (CNI, 2022) [30]

A Tab 9 apresenta as vantagens, desafios, grau de maturidade e ações requeridas de algumas formas de armazenamento de hidrogênio em fase líquida [30].

Tabela 9 – Armazenamento H_2 – [30]

Características	H_2 líquido	Tolueno – metilciclohexano (MCH)	Amônia (NH_3)
Desafios	<ul style="list-style-type: none"> Baixa temperatura Alta demanda de energia (45% da energia do H_2) Redução de custos Risco de vazamento 	<ul style="list-style-type: none"> Alta demanda de energia (30% da energia do H_2) Baixa densidade de H_2 carregada Infraestrutura de grande porte 	<ul style="list-style-type: none"> Menor reatividade Toxicidade Alta demanda de energia na desidrogenação (13% da energia do H_2)
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> Alta pureza Não requer conversão e purificação 	<ul style="list-style-type: none"> Armazenamento á temperatura ambiente em estado líquido Infraestrutura existente no setor petroquímico Regulamentações existente Sem perdas 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilidade de uso direto Carreador mais baixo Infraestrutura existente Regulamentações existente
Maturidade	<ul style="list-style-type: none"> Pequena escala: aplicação Grande escala: desenvolvimento 	<ul style="list-style-type: none"> Demonstração 	<ul style="list-style-type: none"> Pesquisa e desenvolvimento Parcialmente em demonstração
Desenvolvimento e ações requeridas	<ul style="list-style-type: none"> Regulamento para sistema de carga/descarga de transporte Desenvolvimento em motores H_2 Melhoria da eficiência 	<ul style="list-style-type: none"> Catalisadores para hidrogenação e desidrogenação Desidrogenação com alta eficiência energética 	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiência energética na síntese Célula a combustível para uso direto

Outra forma de armazenamento do hidrogênio são o armazenamento gasoso em cavernas salinas, campos de gás depletados, cavernas rochosas e tanques pressurizados. A BloombergNEF (2020) realizou uma pesquisa discorrendo sobre a utilização e transporte do hidrogênio, dimensionando tecnologias de armazenamento em conjunto com o preço de implementação dessas. O custo nivelado de armazenamento (*Levelized Cost of Storage - LCOS*) são os custos demonstrados na Tab 10 para o armazenamento de hidrogênio [30].

Tabela 10 – Tecnologias de armazenamento de H₂ categorizadas por volume e tempo adequado de armazenamento, com seus respectivos, LCOS – CNI (2022) [30] apud BLOOMBERGNEF (2020) [32].

Armazenamento	Gasoso				Líquido			Sólido
	Cavernas de sal	Campos de gás depletados	Cavernas rochosas	Tanques pressurizados	* LH ₂	Amônia	**LOHC	Hidretos Metálicos
Volume	Grande	Grande	Médio	Pequeno	Pequeno-médio	Grande	Grande	Pequeno
Duração do descarregamento	Semanas – mês	Sazonal	Semanas - mês	Dias	Dias – semanas	Semanas - Mês	Semanas - Mês	Dias – semanas
LCOS atual (US\$/kg)	0,23	1,90	0,71	0,19	4,57	2,83	4,5	***NA
LCOS futuro (US\$/kg)	0,11	1,07	0,23	0,17	0,95	0,87	1,87	***NA
Disponibilidade geográfica	Limitada	Limitada	Limitada	Não limitada	Não limitada	Não limitada	Não limitada	Não limitada

*LH₂- Hidrogênio na forma líquida**LOHC - Carregadores orgânicos de hidrogênio na forma líquida (do inglês *Liquid Organic Hydrogen Carriers*)

***NA - Não Avaliada

Segundo a BloombergNEF, os LCOS futuros mais baratos são as cavernas salinas e tanques pressurizados, ressaltando que o armazenamento precisa ser realizado com algumas técnicas para prever vazamentos e riscos de explosão [32]. Segundo PTI (2023) para realizar o transporte do hidrogênio a longas distâncias, o mais recomendado é armazená-lo na forma líquida. O transporte de hidrogênio acima de 1500 km na forma de gás deve ser evitado, pois o hidrogênio se dissipa muito rapidamente se escapar de um recipiente de armazenamento [33]. Dessa forma, é mais econômico enviá-lo como outro transportador líquido para evitar o desperdício, por exemplo na forma de amônia. No setor elétrico, o hidrogênio pode servir como uma forma de armazenamento flexível de energia a partir de fontes renováveis, resolvendo assim o desequilíbrio entre a oferta e a demanda de energia. Como exemplo, pode-se citar o sistema para uso doméstico do hidrogênio da empresa Australiana Lavo [33], uma das pioneiras na utilização de sistema de geração e armazenamento de hidrogênio para uso em residências que possuem sistemas de geração de energia solar fotovoltaica. O excesso de energia é utilizado pelo sistema para a eletrólise da água, liberando oxigênio e armazenando o hidrogênio. Conforme a necessidade, o hidrogênio é convertido em eletricidade através de uma célula a combustível. Esse sistema é capaz de armazenar cerca de 40 quilowatts-hora de energia, o suficiente para abastecer uma casa australiana média por 2 dias. Ao armazenar energia renovável na forma de hidrogênio, é possível reduzir o consumo de outras fontes. Além disso, se a fonte for fóssil reduz as emissões de gases tóxicos para a atmosfera e consequentemente, auxilia na saúde da população. O hidrogênio na forma de amônia pode ser armazenado durante meses e até mesmo anos sem perdas por descarga em comparação com outras tecnologias de armazenamento. Além disso, o hidrogênio vem sendo considerado um vetor de energia de fonte renovável e é capaz de diminuir consideravelmente as emissões de CO₂ de alguns setores [31].

Atualmente, o Brasil possui um grande potencial para geração e utilização do hidrogênio, contudo a falta de profissionais e tecnologias para implementação de sistemas de transporte e armazenamento são algumas das dificuldades que necessitam ser enfrentadas para uma economia baseada no hidrogênio.

5. O PAPEL DO HIDROGÊNIO A PARTIR DO BIOGÁS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Atualmente, mais de 95% do hidrogênio produzido mundialmente é derivado de combustíveis fósseis por meio da reforma do gás natural e da gaseificação do carvão [8]. No Acordo de Paris, muitos países estabeleceram metas globais ambiciosas para estabilizar e reduzir as emissões de carbono. Uma das formas de atingir essas metas é a chamada transição energética com a utilização do hidrogênio verde. O processo utilizado para a geração do hidrogênio verde é a eletrólise da água. A eletrólise é um processo químico que tem como objetivo a produção do gás hidrogênio e oxigênio através de uma corrente elétrica em um processo de oxidação e redução de um fluido [4].

A Fig 4 mostra uma variedade de fontes de energia e processos para a obtenção de hidrogênio, conforme a fonte de energia e o processo de produção, o hidrogênio é classificado em cores como mostra a Tab 11.

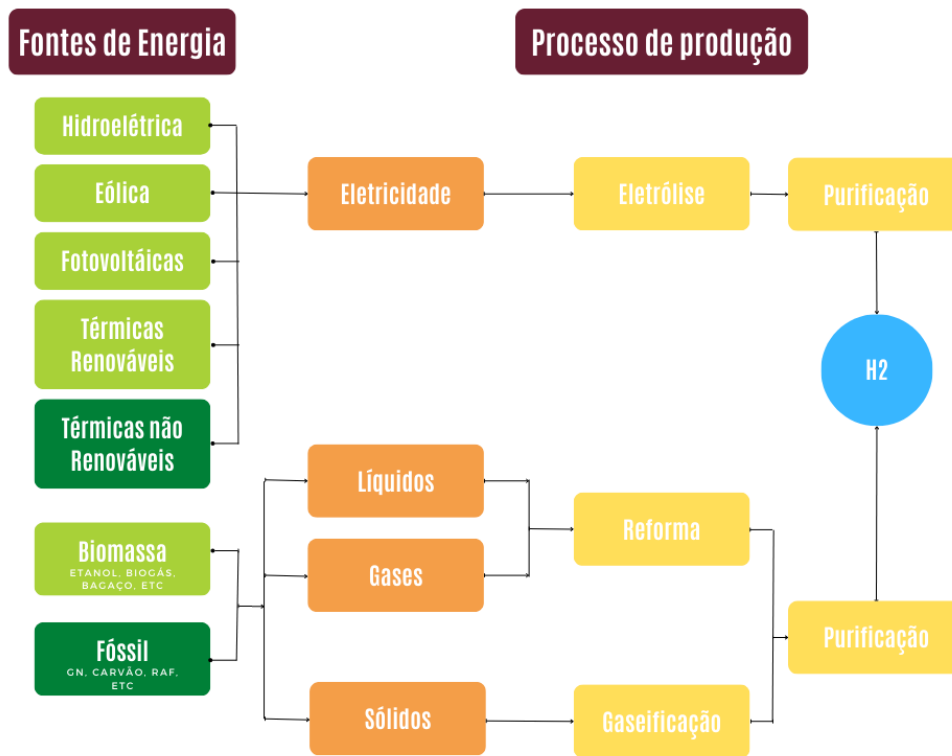


Figura 4 – Obtenção do Hidrogênio
 Fonte: Lopes (2013) [34]

Tabela 11 – Cores do Hidrogênio – Oliveira 2021 [35]

Cor do Hidrogênio	Descrição
Hidrogênio Preto	Obtido a partir da gaseificação do carvão mineral (antracito), sem a captura e armazenamento de carbono.
Hidrogênio Marrom	Obtido a partir da gaseificação do carvão mineral (hulha), sem a captura e armazenamento de carbono.
Hidrogênio Cinza	Obtido a partir de gás natural (ou a partir de outro combustível fóssil) sem a captura e armazenamento de carbono.
Hidrogênio Azul	Obtido através de gás natural com a captura e armazenamento de carbono.
Hidrogênio Verde	Produzido a partir de fontes renováveis via eletrólise da água.
Hidrogênio Branco	Hidrogênio natural ou geológico
Hidrogênio Turquesa	Obtidos por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO ₂ .
Hidrogênio Musgo	Obtidos de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem a captura e armazenamento de carbono. Esse processo está relacionado com reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica.
Hidrogênio Rosa	Obtido a partir de fontes de energia nuclear

De acordo com a Tab 11, o hidrogênio “cinza” representa a geração obtida através de gás natural derivado do petróleo sem a captura e armazenamento de carbono. Outra forma é o hidrogênio “verde” que é obtido através da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia, tais como energia solar fotovoltaica, eólica e hidrelétricas, para a realização do processo eletrolítico. O hidrogênio verde, possibilita uma melhor utilização energética em diversos setores da sociedade diminuindo a pegada de carbono e tendo como resultado processos mais eficientes e que agridem menos o meio ambiente. A cor azul representa o hidrogênio obtido através da reforma do gás natural ou gaseificação do carvão, realizando a captura e armazenamento de gás carbônico (CCUS). O hidrogênio "musgo" é obtido a partir da biomassa e biocombustíveis, como por exemplo o biogás [35]. A reforma do biogás é uma alternativa de hidrogênio renovável, com a possível emissão negativa ao se associar CCUS. O H₂ derivado de biogás, pode se mostrar um produto ambientalmente e economicamente mais interessante que o H₂ verde eletrolítico, quando se aproveita resíduos agrícolas e industriais [36].

A maturidade tecnológica e a infraestrutura disponível para a reforma do metano, o uso de captura e armazenamento de carbono, a adoção de caminhos menos intensivos em energia e o desenvolvimento de novos materiais e reatores catalíticos justificam o interesse renovado em tecnologias de reforma. É por isso, que o biogás poderá ter um papel fundamental na descarbonização da economia nos próximos 50 anos [37], [38] e [39]. Portanto, pensando na diminuição do uso de combustíveis fósseis, os métodos usando biogás para produção de hidrogênio podem ser vistos como mais interessantes e promissores a curto e médio prazo para a transição energética no Brasil do que a eletrólise da água.

O biogás apoia a gestão de resíduos e contribui para a sustentabilidade nas zonas rurais [27] e urbanas. O uso do biogás reduz as emissões de GEE em comparação com os combustíveis fósseis, pois é produzido a partir de biomassa renovável e resíduos animais. Portanto, o custo de produção desse recurso é muito baixo, também se tem a disponibilidade de biogás em grandes quantidades. O biogás tem um alto potencial para produção de H₂ barata e ambientalmente amigável, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. Como apresentado anteriormente, o Brasil tem um grande potencial de produção de biogás que está sendo desperdiçado. A reforma do biogás é um processo favorável para a produção de gás hidrogênio, bem como para reduzir a demanda do gás natural. Atualmente, a produção de hidrogênio tornou-se uma das áreas de pesquisa mais importantes, especialmente quando se trata de energias renováveis, devido à crescente demanda energética global, esgotamento de combustíveis fósseis, questões ambientais e tecnologia progressiva de células de combustível. É importante ressaltar que os desafios enfrentados até o momento e os que estão por vir, não superam as vantagens da utilização do processo de reforma do biogás, uma vez que o hidrogênio produzido por essa rota é renovável e pode ser considerado “verde” [40]. A produção de hidrogênio a partir da reforma do biogás é uma opção para reciclar o biogás, transformando gases poluentes (CH₄ e CO₂) em insumos para indústrias que utilizam hidrogênio e geração de energia, enquanto o monóxido de carbono (CO) pode ser utilizado na carbonização e outros processos [40].

Ainda, alguns autores destacam a contribuição do biogás para os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), como por exemplo, ODS-6: Água limpa e saneamento, ODS-7: Energia acessível e limpa, ODS-9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS -11: Cidades e comunidades sustentáveis, ODS-12: Consumo e produção responsáveis e ODS 13: Ação climática [40], [41] e [42]. Também tem destaque a sustentabilidade da cadeia de abastecimento de biogás e H₂ [43] e o potencial dos resíduos para fornecer energia sustentável e reduzir a dependência de combustíveis fósseis [40] e [41].

Outro fator que deve ser considerado é a legislação, como por exemplo, a Resolução Normativa (REN) nº 482/2012, elaborada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2012 [44], que não está vigente, possibilitava a todo consumidor de energia elétrica a produção de sua própria energia de maneira renovável e conectado à rede de distribuição. Desta forma, a implantação de projetos de micro e minigeração distribuída, com potência instalada entre 75 kW e 5 MW, a partir de fontes renováveis, como o biogás foram permitidas. A energia gerada poderia ser utilizada imediatamente ou ser injetada na rede de distribuição para consumo posterior, a partir do sistema de compensação de energia. No sistema de compensação não era permitida a comercialização de energia, mas o produtor de energia podia disponibilizar o excedente de energia elétrica ao sistema de distribuição local e gerar créditos para compensações futuras, ou seja, nos momentos em que a central não gerava energia suficiente para abastecer a unidade consumidora, a concessionária supria a diferença. Nesse caso era utilizado o crédito de energia ou, caso não houvesse o crédito, o consumidor pagava a diferença [44]. Entretanto, a Lei 14.300/2022 institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) [45]. Essa lei estabelece as regras de conexão ao sistema elétrico brasileiro pelo consumidor-gerador (pequenos geradores) e determina o pagamento pelo uso da rede para a energia excedente injetada. Como consequência, é exigido o pagamento aos consumidores com micro e minigeração distribuída da TUSD Fio B (Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição), que antes não era cobrada. O período de transição se refere ao aumento gradativo do percentual das componentes tarifárias relativas à TUSD Fio B. A partir de 2023, 15% da energia injeta na rede deveria ser descontado para cobrir os custos de uso dos sistemas elétricos de distribuição, retornando apenas na forma de créditos 85% da energia injetada. A Lei 14.300/2022 prevê um aumento de 15% a cada ano até 2026, chegando a 60% de desconto da energia injetada e aumento de 10% até 2029, onde 100% da energia injeta na rede será descontada para cobrir os custos de uso dos sistemas elétricos de distribuição, ou seja, não haverá retorno de créditos da energia injetada na rede. O Projeto de Lei 2703/22 prorroga o subsídio em 6 meses, dessa forma, as micro e minigeração distribuída terão até julho de 2023 para aqueles que solicitaram e entraram com pedido junto à distribuidora antes de 07 de janeiro de 2023. Entretanto, a partir de 2030, os novos geradores de energia distribuída pagarão 100% dos encargos relativos à remuneração dos ativos do serviço, depreciação dos ativos e ao custo de operação e manutenção do serviço de distribuição [14]. Essa nova cobrança pode levar os produtores de biogás a buscar novos usos para o biogás, além da geração de energia elétrica (uso mais comum atualmente), podendo impulsionar a geração de hidrogênio a partir do biogás. O Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂) de 2023 [7], inclui a rota de produção de hidrogênio verde a partir de biocombustíveis como o etanol e o biogás, considerando necessária a avaliação do diagnóstico de riscos e oportunidades relacionados ao aproveitamento da energia do hidrogênio contida nesses biocombustíveis. Essa rota de produção a partir do biogás tem a vantagem de aproveitar a infraestrutura existente e o fato do biogás ser produzido a partir de resíduos, muitas vezes passivos ambientais, sem competir por terras ou com a produção de alimentos.

6. CONCLUSÃO

Nas últimas décadas as questões ambientais estão em evidência em todos os âmbitos da sociedade, são diversos os programas ambientais e incentivos, tais como o Acordo de Paris, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU e o Protocolo de Kyoto, que visam ações de redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, há um apelo global para a melhor utilização, geração e consumo de energia com vistas na garantia da qualidade de vida das gerações futuras.

O hidrogênio, mais que um combustível, é um portador de energia química e serve como um armazenador de energia. Por isso, pode ser convertido em eletricidade, substâncias essenciais para a indústria química e petroquímica e combustível no setor de transportes. A reforma do biogás é um processo atraente para a produção de hidrogênio no Brasil,

visto a utilização de resíduos como matéria-prima e frente a necessidade de implementar uma transição energética, com a utilização de matérias-primas renováveis em mais atividades, desenvolvimento de processos de produção verdes e uso sustentável dos recursos naturais. O interesse pelo uso de fontes renováveis de hidrogênio continuará aumentando nos próximos anos, o que aumentará ainda mais a demanda por hidrogênio. Isso implica, essencialmente, que a produção sustentável de hidrogênio depende da pegada de carbono do processo e da quantidade de energia usada para sua produção. Embora tenham sido identificadas desvantagens técnicas, econômicas e ambientais, o H₂ a partir do biogás continua sendo um candidato conveniente para descarbonizar ou ao menos reduzir as emissões de GEE em setores estratégicos como transporte, petroquímica e indústrias siderúrgicas.

No entanto, a transição para uma economia baseada em H₂ só terá sentido se for pautada na produção do hidrogênio renovável, o que poderá ser um processo complexo, pois no Brasil, a indústria baseada em combustíveis fósseis deve passar por uma profunda reestruturação para endossar a mudança para uma economia mais verde. Todos os caminhos disponíveis para apoiar a transição para o H₂ devem considerar realidades como o impacto das mudanças climáticas nos setores produtivos, a disponibilidade de commodities necessárias para produzir energia verde e dispositivos tecnológicos, bem como a capacidade do país de inovar, desenvolver e integrar cadeias de valor em torno do H₂.

REFERÊNCIAS

- [1] ZULAUF, W. E. O meio ambiente e o futuro. Estudos Avançados, Brasil, ano 14, p. 85-100, 2000.
- [2] NAÇÕES UNIDAS. [Constituição (1990)]. Protocolo de Quioto: Mudança do Clima. Brasil: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – SEPED Coordenação-Geral do Clima – CGCL, 1992. 29 p.
- [3] NAÇÕES UNIDAS. [Constituição (2015)]. Acordo de Paris. [S. l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – SEPED Coordenação-Geral do Clima – CGCL, 2015. 42 p.
- [4] GANEM, R. S. Políticas setoriais e meio ambiente; Câmara dos Deputados, Brasília, 2015.
- [5] EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Balanço Energético Nacional (BEN) 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 28 de abril de 2023.
- [6] SOUZA, S. N. M. Análise de um sistema a hidrogênio-solar para o Brasil: aspectos técnicos, sociais e econômicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia, 1994.
- [7] BRASIL, PNH2 - Programa Nacional do Hidrogênio - Propostas e Diretrizes, jul.2021.
- [8] HWANG, J.J. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications. Renew. Sustain. Energy Rev. 19, 220–229, 2013.
- [9] KAREN, M.; SILVA, F.; KNOTT, S.F.; O'REGAN, B. A comparative analysis of biogas and hydrogen, and the impact of the certificates and blockchain new paradigms. International Journal of Hydrogen Energy 47, 39303–39318, 2022.
- [10] CAVALHEIRO, E. B. R.; MACIEL, G.P.S. Biogás de resíduo sólido urbano como uma fonte de energia alternativa no litoral norte. Revista Liberato 23, 129–138, 2022.
- [11] SCHOLZ, W.H. Processes for industrial production of hydrogen and associated environmental effects. Gas Sep. Purif. 7, 131–139, 1993.
- [12] CASA ONU BRASIL. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil: Casa ONU Brasil, 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/>. Acesso em: 5 abr. 2023.
- [13] MILANEZ, A. Y.; MAIA, G. B. S.; GUIMARÃES, D. D. Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. BNDES Set, Rio de Janeiro, ano 2021, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar. 2021.
- [14] BRASIL, Portal da Câmara dos Deputados. Disponível em <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2250615> Acesso mar. 2023
- [15] CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. Nota técnica: N° 001/2022 – Panorama do Biogás no Brasil em 2021. Foz do Iguaçu, 2022.
- [16] FRARE, L.M.; GIMENES, M.L.; PEREIRA, N.C. Processos para remoção de ácido sulfúrico de biogás. Eng. Sanit. Ambient, Rio de Janeiro, V.14, n 2, 2009.
- [17] MOURA, M.B.T. Processo combinado para a purificação do biogás por contactores com membranas e regeneração do líquido absorvente por eletrodialise. Dissertação (Mestrado Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.
- [18] DALPAZ, R. Avaliação energética do biogás com diferentes percentuais de metano na produção de energia térmica e elétrica. Dissertação (Mestrado em Sistemas Ambientais Sustentáveis) - Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Brasília, DF, 2019.
- [19] SCHWENGBER, C. A. Reforma a seco do metano para produção de hidrogênio utilizando catalisadores Ni/Al₂O₃: uma alternativa para o biogás. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Federal do Paraná - UFPR - Palotina, 2015.
- [20] SCHULTZ, E. L.; SOARES, I.P. Reforma do biogás - Revisão. Circular Técnica, Brasília, DF, v. 13, n. 1, p. 1-9, 1 ago. 2014.

- [21] ATKINS, P.; JONES, L.; Princípios de Química, questionando a vida moderna e o meio ambiente; 5ª Ed, Bookman Companhia Ed., 2011.
- [22] SOUZA, T.L.; C.; ALONSO C.G.; GUIRARDELLO, R.; CABRAL V.F.; FERNANDES-MACHADO, N.R.C. Thermodynamic analysis of autothermal reforming of methane via entropy maximization: hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* 39, 8257–8270, 2014.
- [23] ATASH, H.; GHOLIZADEH, J.; TABRIZI, F. F., TAYEBI, J.; MOUSAVI, S.A.H.S. Thermodynamic analysis of carbon dioxide reforming of methane to syngas with statistical methods. *Int J Hydrogen Energy* 42, 5464–5471, 2017.
- [24] TABRIZI, F. F.; MOUSAVI, S.A.H.S.; ATASHI, H. Thermodynamic analysis of steam reforming of methane with statistical approaches. *Energy Convers Manag* 103, 1065–77, 2015.
- [25] LIU, L.; ZHANG, Z.; DAS, S.; KAWI, S. Reforming of tar from biomass gasification in a hybrid catalysis-plasma system: a review. *Appl Catal B Environ* 250, 250–272, 2019.
- [26] KUMAR, R.; KUMAR, A.; PAL, A. Overview of hydrogen production from biogas reforming: technological advancement. *Int J Hydrogen Energy* 47, 34831–34855, 2022.
- [27] NAHAR, G.; MOTE, D.; DUPONT, V. Hydrogen production from reforming of biogas: review of technological advances and an Indian perspective. *Renew Sustain Energy Rev* 76, 1032–1052, 2017.
- [28] POVEDA, G. I. D. Armazenamento de hidrogênio em ligas metálicas a base de magnésio. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio De Janeiro - UFRJ - Rio de Janeiro, 2007.
- [29] MACULAN, B. D.; CONFORT, M. J. F. Estocagens subterrâneas de gás natural (ESGN): regulamentos e aspectos técnicos. V Congresso Brasileiro de Regulação – ABAR, Recife – PE, p. 1-14, 6 set. 2007.
- [30] CNI - Confederação Nacional da Indústria. Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira, Brasília, 2022.
- [31] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; SECRETARIA DE PETRÓLEO; GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Estocagem Subterrânea de Gás Natural: Aspectos Gerais, Regulatórios, Estimativa de Custos e Simulação. Estocagem Subterrânea de Gás Natural, Rio de Janeiro, p. 1-91, 9 nov. 2018.
- [32] BLOOMBERGNEF. Hydrogen Economy Outlook. 2020. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>. Acesso em: 28 de abril de 2022.
- [33] PTI - Parque Tecnológico Itaipu. Hidrogênio tem sido aposta de países como vetor de armazenamento de energia. Disponível em: <https://blog.pti.org.br/hidrogenio-como-vetor-de-armazenamento-de-energia/> Acesso: mar.2023.
- [34] <https://lavo.com.au> Acesso: mar.2023.
- [35] OLIVEIRA, R. C. Hidrogênio sustentável: panorama do hidrogênio no Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica - IPE, Brasília: Rio de Janeiro, p. 1-61, ago. 2022.
- [36] LOPES, D. G. Uso de biocombustíveis para geração de H₂: novas soluções para um novo vetor energético. Hytron- Tecnologia em Hidrogênio. I Simpósio de Biocombustíveis e Energias Renováveis UFPR – Setor Palotina, 2013.
- [37] GÜRSAN, C.; DE GOOYERT, V. The systemic impact of a transition fuel: does natural gas help or hinder the energy transition? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138, 110552, 2021.
- [38] IEA, 2022. Global hydrogen review 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/events/global-hydrogen-review-2022>. Acesso: mar. 2023.
- [39] IRENA, 2022. Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5° C Climate Goal: Part III – Green Hydrogen Cost and Potential. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/May/Global-hydrogen-trade-Cost> Acesso: mar. 2023.
- [40] CUDJOE, D.; ZHU, B.; WANG, H. Towards the realization of sustainable development goals: benefits of hydrogen from biogas using food waste in China. *Journal of Cleaner Production* 360, 13216, 2022.
- [41] NADALETI, W.; MARTINS, R.; LOURENCO, V.; PRZYBYLA, G.; BARICCATTI, R.; SOUZA, S.; MANZANO, F.; SUNNY, N. A pioneering study of biomethane and hydrogen production from the wine industry in Brazil: pollutant emissions, electricity generation and urban bus fleet supply. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 19180–19201, 2021.
- [42] OBAIDEEN, K.; ABDELKAREEM, M.; WILBERFORCE, T.; ELSAID, K.; SAYED, E.; MAGHRABIE, H.; OLABI, A. Biogas role in achievement of the sustainable development goals: evaluation, challenges, and guidelines. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 131, 104207, 2022.
- [43] AZIZ, M.A.A.; SETIABUDI, H.; TEH, L.P.; ANNUAR, N.; JALIL, A. A review of heterogeneous catalysts for syngas production via dry reforming. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 101, 139–158, 2019.
- [44] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.
- [45] BRASIL, Lei 14.300/2022 - Marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS), 2022.