



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL

NARRIMAN MARINHO PEREIRA

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO UTILIZANDO REFORMA A
VAPOR DO BIOGÁS DE REATORES UASB EM ETES OPERADAS PELA
COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ

FORTALEZA

2024

NARRIMAN MARINHO PEREIRA

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO UTILIZANDO REFORMA A VAPOR DO
BIOGÁS DE REATORES UASB EM ETES OPERADAS PELA COMPANHIA DE ÁGUA E
ESGOTO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Fernanda Leite Lobo.

FORTALEZA

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

P493p Pereira, Narriman Marinho.
Potencial de produção de hidrogênio utilizando reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETES operadas pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará / Narriman Marinho Pereira. – 2024.
58 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Fernanda Leite Lobo.

1. Hidrogênio. 2. Biogás. 3. Reforma a vapor. I. Título.

CDD 628

NARRIMAN MARINHO PEREIRA

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO UTILIZANDO REFORMA A
VAPOR DO BIOGÁS DE REATORES UASB EM ETES OPERADAS PELA COMPANHIA
DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao curso de
Engenharia Ambiental do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como parte do requisito para obtenção do título
de Engenheiro Ambiental.

Aprovada em: 30 / 09 /2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Fernanda Leite Lobo (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a. Dr.^a. Ana Bárbara de Araújo Nunes

Universidade Federal do Ceará (UFC) (Examinador)

Prof. Dr. André Valente Bueno

Universidade Federal do Ceará (UFC) (Examinador)

A Deus,

À minha família e à minha avó Orlanda (in
memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus que através de seus cuidados e infinita bondade, guiou meu caminho até aqui.

Aos meus pais e irmãos que sempre me apoiaram e proveram de tudo para me proporcionar ensino de qualidade, por vibrarem em minhas conquistas e por entender minhas inseguranças sem deixar de me apoiar.

Ao meu companheiro de vida, Nairton Lima, pelas dicas e ajuda durante todas as sessões de leitura, cálculo, digitação, montagem e verificação de planilhas. Obrigada por ter acreditado e confiado em mim, no meu potencial e por nunca me deixar desistir.

Aos meus amigos de graduação, em especial, a Taynara, por todas as palavras de conforto, pelo carinho e pelo suporte.

À minha avó Orlanda (in memoriam), por todos os dias que foi me deixar e buscar na escola, por se importar com meus estudos, por sempre acreditar que um dia eu estaria formada. Minha avó, analfabeta, me ensinou as lições mais valiosas que eu poderia aprender. Que o tempo me permita preservar você e seus ensinamentos na minha memória e no meu coração.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Fernanda Leite Lobo, que, mesmo em meio a tantas ocupações e grandes feitos, foi sempre muito solícita e atenciosa comigo, tornando-se, para mim e tantos outros alunos, uma grande inspiração de mulher na Engenharia.

À banca avaliadora, Prof.^a Dr.^a Anan Bárbara de Araújo Nunes e Prof. Dr. André Valente Bueno, por disponibilizar tempo para leitura do trabalho, questionar e assistir à defesa, contribuindo para o melhoramento do ambiente acadêmico de discussão e produção científica.

À Instituição Universidade Federal do Ceará pelo apoio financeiro na manutenção da bolsa de aprendizagem cooperativa, pelo ambiente de ensino de alta qualidade, incentivando e instigando os alunos.

Agradeço a todos que aqui não foram citados, mas que, torceram por mim e me apoiaram na busca pelo título de engenheira ambiental.

“Grandes descobertas e progressos envolvem a
cooperação de várias mentes.”

Alexandre Graham Bell

RESUMO

A atual configuração da matriz energética mundial utiliza majoritariamente fontes não renováveis de energia, por serem mais baratas e convenientes dentre os recursos energéticos, entretanto estão associadas a vários problemas e gera preocupações econômicas, políticas e ecológicas. Além disso, o país também apresenta deficiência no tratamento de esgoto, que por vezes, compromete a saúde e a qualidade de vida da população, bem como a preservação do meio ambiente. Uma forma de tratar o esgoto é por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica, que apresenta como um dos resíduos a formação do biogás. Muitas ETEs, estações de tratamento de esgoto, optam por apenas queimar o biogás antes do lançamento para a atmosfera, desperdiçando seu alto potencial energético e agravando o efeito estufa, devido ao metano presente em sua composição. Nesse cenário, surge uma solução inovadora importante, com uma enorme amplitude de aplicações e usos, a utilização do hidrogênio se destaca como combustível de alta eficiência e pouco poluente que pode ser usado no transporte, aquecimento e geração de energia em locais de difícil acesso. Para se obter o gás hidrogênio é necessário separá-lo de outros elementos como a água, compostos de origem fóssil e biomassa. Atualmente, cerca da metade da produção mundial de hidrogênio advém da utilização do gás natural, que apresenta composição semelhante ao biogás, que pode ser utilizado como matéria-prima alternativa à tecnologia convencional de reforma a vapor para geração de hidrogênio. Baseado na literatura, este trabalho tem como objetivo estimar o potencial de geração de hidrogênio por reforma a vapor do biogás produzido em ETEs operadas pela CAGECE que utilizam a tecnologia UASB como tratamento de esgoto, a fim de agregar valor aos subprodutos. Para tanto, estimou-se que em 43 estações de tratamento operadas pela CAGECE, dotadas de reatores anaeróbios, são processados 12 bilhões de litros de esgoto por ano. Esse volume tem potencial de geração de 25 milhões metros cúbicos de biogás, anualmente, que seriam suficientes para produzir cerca de 60 milhões de metros cúbicos de hidrogênio.

Palavras-chave: Hidrogênio. Biogás. Reforma a vapor.

ABSTRACT

The current configuration of the global energy matrix uses mostly non-renewable energy sources, as they are the cheapest and most convenient among energy resources. However, they are associated with several problems and generate economic, political and ecological concerns. In addition, the country also has deficiencies in sewage treatment, which sometimes compromises the health and quality of life of the population, as well as the preservation of the environment. One way to treat sewage is through the anaerobic digestion of organic matter, which has biogas formation as one of its residues. Many ETEs, sewage treatment plants, choose to simply burn the biogas before releasing it into the atmosphere, wasting its high energy potential and worsening the greenhouse effect, due to the methane present in its composition. In this scenario, an important innovative solution emerges, with a huge range of applications and uses. The use of hydrogen stands out as a highly efficient and low-polluting fuel that can be used in transportation, heating and power generation in hard-to-reach places. To obtain hydrogen gas, it is necessary to separate it from other elements such as water, fossil-based compounds and biomass. Currently, approximately half of the world's hydrogen production comes from the use of natural gas, which has a composition similar to biogas and can be used as an alternative raw material to conventional steam reforming technology for hydrogen generation. Based on the literature, this study aims to estimate the potential for hydrogen generation by steam reforming of biogas produced in WWTPs operated by CAGECE that use UASB technology for sewage treatment, in order to add value to the byproducts. To this end, it was estimated that 43 treatment plants operated by CAGECE, equipped with anaerobic reactors, process 12 billion liters of sewage per year. This volume has the potential to generate 25 million cubic meters of biogas annually, which would be enough to produce approximately 60 million cubic meters of hydrogen.

Keywords: Hydrogen. Biogas. Steam reform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Átomo de hidrogênio na tabela periódica.....	22
Figura 2: Rotas tecnológicas possíveis para produção de hidrogênio	26
Figura 3 - Níveis da escala TRL	28
Figura 4: Custos de produção do hidrogênio a partir da tecnologia utilizada	31
Figura 5: Gráfico da densidade de energia por massa (MJ/kg)	32
Figura 6: Gráfico densidade energética por volume (10^3 MJ /m ³)	33
Figura 7: Desenho esquemático de um reator UASB	38
Figura 8: Desenho esquemático da digestão anaeróbia	40
Figura 9: Sequência típica de produção de hidrogênio.....	42
Figura 10 - Diagrama de blocos com as etapas da metodologia.....	44
Figura 11: Correspondência das unidades de negócio por bacia	46
Figura 12: Mapa das unidades de negócio da CAGECE no interior.....	47
Figura 13: Avaliação da produção de biogás ETES de Fortaleza (UN-MTE).....	49
Figura 14: Avaliação da produção de biogás das ETES da RMF (UN-BME).	50
Figura 15: Avaliação da produção de biogás das ETES do interior do Ceará.....	51
Figura 16 - Produção de hidrogênio por meio do reformador tradicional	54
Figura 17 - Produção de hidrogênio por meio do reformador tradicional	54
Figura 18: Estimativa da produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETES operadas pela Cagece	55
Figura 19: Estimativa da produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETES operadas pela Cagece	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características gerais do hidrogênio	22
Quadro 2: Usos do hidrogênio no setor industrial	24
Quadro 3: Insumos e métodos para obtenção de hidrogênio	25
Quadro 4: Resumo dos principais processos de produção de hidrogênio.....	29
Quadro 5: Composição do biogás de diferentes fontes.....	48

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES

C	Carbono
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CCS	Captura para armazenamento de carbono
CH ₄	Metano
C _n H _m	Hidrocarboneto
C _n H _m	Hidrocarboneto
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
CPTP	Condições padrão de temperatura e pressão
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
DAFA	Digestor anaeróbio de fluxo ascendente
E	Eficiência do reator UASB
ETE	Estação de tratamento de esgoto
H	Hidrogênio
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
hab	habitantes
IA	Metais alcalinos
IEA	International Energy Agency
J	Joule

K	Kelvin
L	Limpo
L	Litros
m	Metros
MJ	Megajoule
Mt	Milhões de toneladas
N	Não limpo
NA	Não aplicável
N ₂	Nitrogênio
NH ₃	Amônia
O ₂	Oxigênio
Pa	Pascal
PEM	Membrana de Troca de Prótons
Q _{biogás}	Vazão de biogás
Q _{ch4}	Vazão de metano
Q _{h2}	Vazão de hidrogênio
RAFA	Reator Anaeróbico de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente
RALF	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado
SELOX	Reação de oxidação seletiva CO
SOEC	Células eletrolíticas de óxido sólido
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UN	Unidade de negócio por bacia administrativa
UN-BAC	Unidade de Negócio – Bacia do Acaraú e Coreaú
UN-BAJ	Unidade de Negócio - Bacia do Alto Jaguaribe
UN-BBA	Unidade de Negócio - Bacia do Banabuiú
UN - BBJ	Unidade de Negócio - Bacia do Baixo Jaguaribe
UN-BCL	Unidade de Negócio – Bacia do Curu e Litoral
UN-BME	Unidade de Negócio – Bacia Metropolitana
UN-MTE ¹	Unidade de Negócio – Bacia Metropolitana de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto
UN-BPA	Unidade de Negócio - Bacia do Parnaíba
UN-BSA	Unidade de Negócio - Bacia do Salgado
UN-BSI	Unidade de Negócio – Bacia da Serra da Ibiapaba

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔH	Entalpia
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Hidrogênio.....	21
3.1.1	História do Hidrogênio.....	21
3.1.2	Características gerais do hidrogênio.....	22
3.1.3	Panorama do mercado de hidrogênio	23
3.1.4	Tecnologias para a produção de hidrogênio, eficiência e maturidade tecnológica	25
3.1.5	Armazenamento e transporte de hidrogênio.....	31
3.2	Biogás.....	35
3.2.1	História do biogás	35
3.2.2	Características do biogás	35
3.2.3	Esgoto como insumo para a produção de biogás.....	35
3.2.4	Captação de biogás em estações de tratamento de esgoto	36
3.2.5	Reatores UASB, ou DAFA, ou RAFA	37
3.2.6	Digestão anaeróbia em reatores UASB e a origem do biogás.....	38
3.2.7	Purificação do biogás	40
3.3	Produção de hidrogênio via reforma a vapor	41
3.3.1	Reforma a vapor	41
3.3.2	Processo industrial de reforma a vapor.....	42
4	METODOLOGIA.....	44
4.1	Descrição do processo.....	44

4.1.1	Panorama da CAGECE quanto a tecnologia de tratamento de esgoto em especial a utilização de reatores UASB e situação de produção de biogás	45
4.1.2	Estimativa da quantidade de hidrogênio a ser produzido do biogás gerado nas ETÉs.....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
7	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial utiliza majoritariamente fontes não renováveis de energia, em particular, o petróleo, carvão mineral e gás natural. Apontados como os mais baratos e convenientes dentre os recursos energéticos, a dependência mundial em combustíveis fósseis está associada a vários problemas e gera preocupações econômicas, políticas e ecológicas. As reservas de combustíveis fósseis são finitas e o uso intenso desses recursos reduz a disponibilidade e, conseqüentemente, eleva seus preços no mercado. Além disso, as reservas se concentram em poucos países, que por vezes, manuseiam o suprimento desses recursos como um artifício político capaz de despertar preocupações referentes ao fornecimento de energia para o restante do mundo. Somado a isso, a combustão desses recursos emite gases poluentes que contribuem para o aumento do efeito estufa (DA ROSA, 2019).

Na busca mundial por meios de viabilizar a descarbonização de setores ainda muito dependentes de energia de origem fóssil, o hidrogênio surge como uma solução promissora com uma enorme amplitude de aplicações e usos, dentre as quais se destacam a sua utilização como combustível de alta eficiência e pouco poluente que pode ser usado no transporte, aquecimento e geração de energia em locais de difícil acesso (ZOHURI, 2019).

Embora muito abundante, o gás hidrogênio não existe separado na natureza, para ser obtido é necessário separá-lo de outros elementos como a água, compostos de origem fóssil e biomassa. O processo químico industrial responsável por 50% da produção mundial de hidrogênio é denominado reforma a vapor, que ocorre em um dispositivo de processamento chamado reformador, no qual reage vapor em alta temperatura com o combustível fóssil como o gás natural. O reformador de metano a vapor é amplamente utilizado para refino de petróleo e produção de *commodities* industriais como amônia (ZOHURI, 2019).

Devido sua composição semelhante ao gás natural, o biogás pode ser utilizado como matéria-prima alternativa à tecnologia convencional de reforma a vapor. A utilização do biogás é ainda mais vantajosa por se tratar de um recurso renovável que pode ser produzido em qualquer lugar e de diferentes fontes. É produzido comercialmente em grandes quantidades em digestores anaeróbicos e instalações de recuperação de gás de aterro sanitário projetadas para tratar, por exemplo, esterco, esgoto, culturas energéticas e matéria orgânica. A produção de biogás também reduz o volume em aterros e produz fertilizantes ricos em nutrientes como subproduto (BRAGA, SILVEIRA, *et al.*, 2013).

O reator UASB, tecnologia de tratamento de esgoto que promove a decomposição da matéria orgânica, apresenta o biogás como principal produto resultante. Entretanto, a maior parte das plantas de estações de tratamento de esgoto (ETEs) brasileiras, com recuperação de biogás, não fazem o aproveitamento energético desse gás, sendo apenas queimado em *flares* antes do lançamento na atmosfera (Araújo, 2019).

Dessa forma, a transformação de águas residuais em hidrogênio pode ser considerada uma alternativa bastante atraente do ponto de vista econômico ao gerar valor agregado a partir de resíduos e materiais que seriam descartados e que não competem com culturas alimentares. Além dos benefícios ambientais caracterizados por não contribuir para emissões de gases de efeito estufa, chuva ácida, destruição do ozônio e impactos ambientais ligados à energia (BHARATHIRAJA, SUDHARSANAA, *et al.*, 2016).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo estimar o potencial de geração de hidrogênio por reforma a vapor do biogás produzido em ETEs operadas pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e, estações que apresentam a tecnologia Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) como tratamento de esgoto, também conhecido como Reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esta monografia tem como objetivo principal estimar o potencial cearense de produção de hidrogênio proveniente da reforma a vapor do biogás em ETEs operadas pela CAGECE que utilizam a tecnologia UASB.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre o hidrogênio, panorâmica do mercado de hidrogênio, transporte e armazenamento de hidrogênio;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o biogás, sua composição, formação e processo de purificação;
- Realizar revisão bibliográfica sobre a produção de hidrogênio com ênfase na reforma a vapor do gás natural e possibilidade de substituição por biogás;
- Analisar o panorama da CAGECE quanto a tecnologia de tratamento de esgoto em especial a utilização de reatores UASB e situação de produção de biogás;
- Estimar o potencial de produção de hidrogênio a partir do biogás de reatores UASB em estações de tratamento de esgoto operadas pela CAGECE.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Hidrogênio

3.1.1 História do Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento mais abundante do Universo, constitui cerca de 90% de todos os átomos e 75% de toda a massa. Os cientistas afirmam que esse átomo surgiu após alguns milhões de anos depois do Big Bang e serviu de base para formação dos demais átomos. Na forma de plasma, esse elemento é o combustível de toda as estrelas, como por exemplo, o Sol (ZOHURI, 2019).

Por volta do ano 1500, o alquimista suíço Paracelsus observou que as reações entre metais e ácidos fortes, como limalhas de ferro e ácido sulfúrico, desprendia bolhas de gases. Em 1671, Robert Boyle fez a mesma observação, entretanto nenhum dos dois seguiu para a descoberta do elemento (ZOHURI, 2019).

Somente em 1766, o cientista britânico Henry Cavendish identificou um elemento distinto como resultado da reação entre o metal zinco e ácido clorídrico. Ao coletar as bolhas formadas pela reação mostrou que eram diferentes dos gases até então conhecidos. Além de ser inflamável, produzia água ao aplicar uma faísca, descobrindo assim que a água é formada por hidrogênio e oxigênio, acabando com a crença que a água se tratava de um elemento (ZOHURI, 2019).

Em 1788, como base nas descobertas de Cavendish, o químico francês Antoine Lavoisier criou o termo hidrogênio a partir da junção dos termos grego *Hydro* (“água”) e *genes* (“formar”), que gera a ideia de formador de água (ZOHURI, 2019).

Atualmente, o hidrogênio é considerado um dos vetores de energia mais promissores para o futuro. Pouco poluente, pode ser usado no transporte, aquecimento e geração de energia em locais de difícil acesso. Já é muito utilizado como reagente em indústrias químicas, metalúrgica e eletrônica. O hidrogênio é fundamental para a fabricação de importantes compostos químicos produzidos industrialmente como a amônia e metanol, usado na fabricação de muitos polímeros. Presente também no refino de petróleo, para obtenção de gasolina de alta qualidade e na remoção de compostos de enxofre do petróleo, além de estar sendo utilizado como combustível em aplicações espaciais (ZOHURI, 2019).

3.1.2 Características gerais do hidrogênio

O Hidrogênio, representado pelo símbolo H, é o primeiro elemento químico da tabela periódica. Está posicionado na família de metais alcalinos (IA) devido a sua distribuição eletrônica que apresenta o mesmo subnível mais energético que todos os outros elementos dessa família. Entretanto, o hidrogênio não apresenta características físicas e químicas semelhantes que o enquadrem em um dos grupos, sendo um elemento único. Como mostra a Figura 1, trata-se do átomo mais simples que existe, formado por apenas um próton e um elétron, sua massa atômica é de 1.008 (média ponderada da massa de seus isótopos deutério, trítio e prótio) (ZOHURI, 2019).

Figura 1: Átomo de hidrogênio na tabela periódica

Símbolo		H
Número atômico		1
Massa atômica		1.008
Configuração eletrônica		1s ¹

Fonte: (BATISTA, 2023)

Em estado padrão de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro (sem odor), insípido (sem sabor), não-tóxico, não-metálico e inflamável em sua fórmula molecular. No quadro 1, apresenta-se as principais características do Hidrogênio.

Quadro 1: Características gerais do hidrogênio

Características físico-químicas	
Cor	Incolor

Calor específico	14304J/g K
Densidade	0.08988 g/L (0 °C, 101.325 kPa)
Fase na CNTP	Gás
Odor	Inodoro
Ponto de fusão	14.01 K, - 259.14 °C (-423.45 °F)
Ponto de ebulição	20.28 K, -252.87 °C

Fonte: O AUTOR (2023), adaptado de (ZOHURI, 2019)

Apesar de extremamente abundante, a molécula formada por dois átomos de hidrogênio (H_2), conhecida como gás hidrogênio, não é encontrado na natureza em proporções significativas. Comumente, ele está presente na composição química das substâncias, como ocorre por exemplo, na água, nos combustíveis fósseis e na biomassa. Sendo assim, é necessário ser produzido a partir de compostos que o contém de origem fóssil ou renovável. (DA ROSA, 2019).

3.1.3 Panorama do mercado de hidrogênio

De acordo com a International Energy Agency (IEA) (2022), a demanda mundial por hidrogênio foi de 94 milhões de toneladas (Mt) em 2021, com aumento de 5% com relação as 91 Mt de H_2 no ano de 2019. A China é o maior consumidor, responsável por cerca de 28 Mt de H_2 , seguida de Estados Unidos, segundo maior, e Oriente Médio, terceiro maior, responsáveis por consumir cerca de 12 Mt de H_2 cada. A Europa é o quarto maior consumidos, com demanda de 8 Mt de H_2 . A perspectiva de demanda de hidrogênio é de 130 Mt até 2023 para aplicações tradicionais como refino, indústria, transporte, edificações, energia, dos quais 25% seriam para novas aplicações e usos de hidrogênio de baixa emissão nessas atividades tradicionais.

Dentre os principais usos do hidrogênio se destacam a sua utilização na refinaria para o hidrocrackeamento na remoção de impurezas como enxofre e quebra de óleos pesados em derivados mais nobres. Quase todo o hidrogênio utilizado nas refinarias é produzido a partir de combustíveis fósseis. Além disso, o hidrogênio é muito utilizado na produção de amônia, metanol, nas indústrias siderúrgicas e na demanda nos transportes de veículos como caminhões e ônibus (IEA, 2022).

Como visto, o hidrogênio é amplamente utilizado em vários setores industriais. O Quadro 2 resume as diferentes aplicações do hidrogênio em diferentes setores, como ocorre na indústria química, petrolífera, alimentícia dentre outras.

Quadro 2: Usos do hidrogênio no setor industrial

Tipos de indústria	Usos do hidrogênio
Metalúrgica	Tochas de soldagem e corte de metais.
	Eliminação de oxigênio.
	Tratamento térmico para melhorar a ductilidade e a qualidade da usinagem, para aumentar a resistência a tração, para aliviar tensões, para endurecer, alterando características elétricas ou magnéticas.
Plástico	Quebra de plásticos usados para produzir moléculas mais leves que podem ser recicladas.
	Síntese de nylon, poliéster, dentre outros.
Vidro	Tratamento térmico de fibra óptica.
	Tochas de corte de altas temperaturas.
	Polimento do vidro.
Energética	Processamento de combustível nuclear.
	Líquido refrigerante para motores de grande geração.
Química	Síntese de metanol, amônia, dentre outros.
Alimentícia	Hidrogenação de óleos e gorduras vegetais e animais.
	Conversão de sebo e gordura em ração animal.
	Conversão de açúcar em pólios

Petróleo e gás	Hidrocraqueamento de grandes hidrocarbonetos para abastecer destiladores.
	Remoção de enxofre e outras impurezas.

Fonte: O AUTOR (2023), adaptado de (OLABI e ABDELKAREEM, 2020).

Outros estudos estão sendo desenvolvidos acerca das várias possibilidades de utilização do hidrogênio. Um projeto liderado pela Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar prevê, entre outras ações, a construção de uma inédita unidade de referência, com capacidade de produção de 14,5 kg de H₂/dia, o equivalente ao abastecimento de três carros elétricos por dia, será a primeira planta do Brasil de produção de hidrogênio renovável focada na reforma do biogás oriundo do esgoto (SANEPAR, 2023).

3.1.4 Tecnologias para a produção de hidrogênio, eficiência e maturidade tecnológica

Apesar da sua abundância, o hidrogênio não é encontrado em proporções significativas naturalmente como um gás na Terra. Deve, portanto, ser produzido a partir de diversas matérias-primas. De acordo com Bharathiraja *et al.* (2015), hoje, 40% do hidrogênio é produzido a partir de gás natural, 30% de petróleo pesado e nafta, 18% de carvão, 4% de eletrólise e 1% de biomassa. O Quadro 3 apresenta os principais métodos de obtenção de hidrogênio de acordo com a matéria-prima a ser utilizada

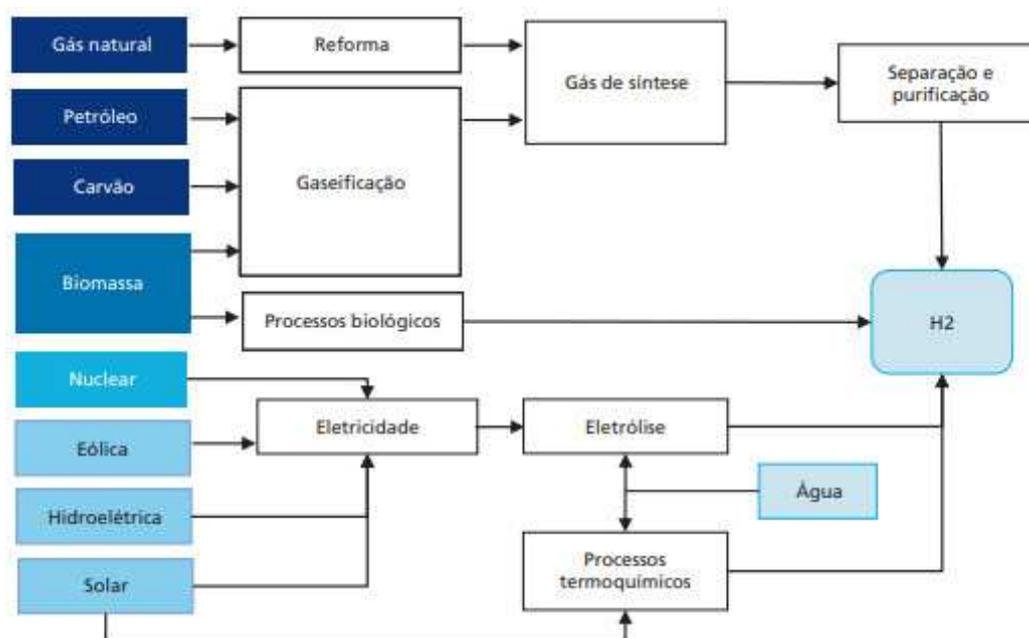
Quadro 3: Insumos e métodos para obtenção de hidrogênio

Insumo	Método
Água	Eletrólise
Biomassa	Processos biológicos Transformações da biomassa
Combustível fóssil	Reforma de hidrocarbonetos Gaseificação do carvão Oxidação de hidrocarbonetos

Fonte: O AUTOR (2023), adaptado de (ZOHURI, 2019)

Uma vez separado de outros elementos, o hidrogênio pode ser convertido em eletricidade ou utilizado para outras finalidades. Na Figura 2, são apresentadas as diferentes rotas tecnológicas que podem ser utilizadas na produção do hidrogênio (ZOHURI, 2019).

Figura 2: Rotas tecnológicas possíveis para produção de hidrogênio



Fonte: (IPEA, 2022)

A produção de hidrogênio envolve processos químicos, eletrolíticos, termolíticos, fotolíticos e biológicos. O processo a ser escolhido depende da quantidade de hidrogênio desejada, como por exemplo, pequenas quantidades para uso residencial, quantidades modestas como ocorre na indústria alimentícia e grandes quantidades como demanda a produção de amônia (DA ROSA, 2019).

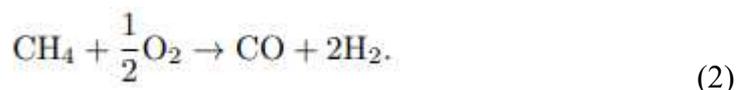
Dentre os processos de geração de hidrogênio, destaca-se:

- Reforma de hidrocarbonetos: consiste em uma mistura de vapor de água e hidrocarbonetos leves (gás natural é o mais comumente utilizado) que reagem em altas temperaturas na presença de catalisadores, conforme a reação representada abaixo na Equação 1. Atualmente, é processo mais utilizado para a produção de hidrogênio em larga escala.



(1)

- Oxidação parcial de hidrocarbonetos: processo semelhante a tecnologia anterior, entretanto utiliza o oxigênio no lugar do vapor. Ocorre de acordo com Equação 2 em um fluxo rico em hidrogênio como gás natural, carvão e coque. Pela reação, observa-se que é necessário o dobro de reagentes para obter o mesmo volume de hidrogênio obtido na reforma de hidrocarbonetos.



- Eletrólise: consiste em dissociar moléculas de água em hidrogênio e oxigênio por meio de eletrodos submetidos a corrente contínua. É o processo de geração de hidrogênio mais adequado ambientalmente, pois gera hidrogênio como alto grau de pureza, entretanto apresenta alto custo, sendo até então, improdutivo comercial e industrialmente. O consumo de água para produzir 1 kg de H₂ é de, aproximadamente, 9 litros de água. É possível utilizar água do mar na obtenção, mas é preciso que ela passe por um processo de dessalinização, o que encarece os custos da produção (AMORIM, 2024).

A busca por meios sustentáveis e viáveis financeiramente para a produção de hidrogênio fomenta estudos como o uso de biomassa, cuja biodigestão resulta no biogás, no processo deve-se retirar substâncias como enxofre e em seguida, usa-se o calor para se obter o hidrogênio. Outro método retira enxofre e outras impurezas e refina o biogás resultante até se tornar biometano, que é, então, submetido ao vapor até chegar ao hidrogênio, esse processo teria custo inferior ao da eletrólise (ABRAIN, 2022).

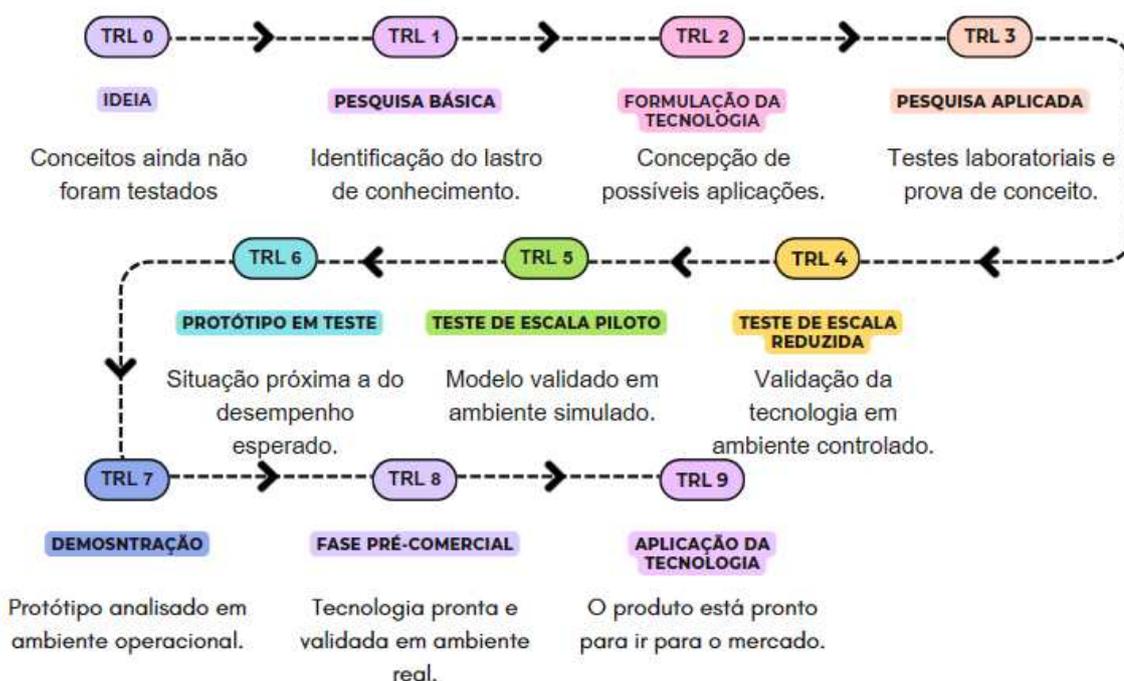
Uma das ferramentas que permite avaliar, em um determinado instante, o nível de maturidade de uma tecnologia particular e a comparação de maturidades entre diferentes tipos de tecnologias é denominada TRL (do inglês, *Technology Readiness Level*). Nesse sistema de medição criado pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), utiliza-se uma escala de maturidade ou prontidão tecnológica que, comumente, varia de 1 a 9 e, com base nas entregas/resultados relacionados a cada nível, pode ser assim descrita (DINIZ, 2021):

- TRL 1 – Princípios básicos observados e reportados;
- TRL 2 – Formulação de conceitos tecnológicos e/ou de aplicação;
- TRL 3 – Estabelecimento de função crítica de forma analítica ou experimental e/ou prova de conceito;
- TRL 4 – Validação funcional dos componentes em ambiente de laboratório;

- TRL 5 – Validação das funções críticas dos componentes em ambiente relevante;
- TRL 6 – Demonstração de funções críticas do protótipo em ambiente relevante;
- TRL 7 – Demonstração de protótipo do sistema em ambiente operacional;
- TRL 8 – Sistema qualificado e finalizado;
- TRL 9 – Sistema operando e comprovado em todos os aspectos de sua missão operacional.

A Figura 3 representa a sequência de níveis na escala de maturidade ou prontidão tecnológica com base nas entregas e resultados relacionados a cada nível.

Figura 3 - Níveis da escala TRL



Fonte: O AUTOR (2024).

O Quadro 4 apresenta a matéria-prima, eficiência e maturidade tecnológica para as principais tecnologias para a produção de hidrogênio. O nível de maturidade tecnológica (TML) tem sido usado na literatura como uma escala de classificação modificada e consolidada (1-10) tanto da ferramenta de benchmarking globalmente aceita de Nível de Prontidão Tecnológica (TRL) quanto do Índice de Prontidão Comercial (CRI) desenvolvido pela

ARENA, para ajudar a comunicar o nível de maturidade da tecnologia específica. No Quadro 3, de maneira análoga, o nível 1 refere-se à ideia e o nível 10 refere-se à operação bem-sucedida do sistema em seu ambiente operacional.

Quadro 4: Resumo dos principais processos de produção de hidrogênio

Categoria	Matéria-prima	Tecnologia	Eficiência	Impacto ambiental	Maturidade tecnológica (1-10)
Eletrólise	Água	Alcalina	62-82	L	9-10
	Água do mar	PEM	67-84	L	7-9
		SOEC	75-90	L	3-5
Eletrofotólise	Água	Foto eletroquímica	0,5-12	L	1-2
Fotólise	Água/Algas	Fotossíntese	1,6-5	L/N	1-3
Biofotólise	Microalgas	Foto fermentação	<1	N	1-3
	Cianobactérias	hidrogênio produzido por algas	1-3	N	1-3
Bioeletrólise	Biomassa	Eletrólise microbiana	70-80	N	1-3
Biólise	Microrganismo	Fermentação escura	60-80	N	3-5
	Bactérias fermentativas	Hidrólise	NA	N	2-4
	Biomassa + água	Reforma em fase aquosa	35-55	N	5-7
	CO + água	Reforma de deslocamento gás-água (catálise biológica)	NA	N	2-4

Termólise	Água	Termólise	20-55	L	1-13
	Biomassa (sem O ₂)	Pirólise	35-50	N	8-10
	Biomassa	Gaseificação	35-50	N	10
	Carvão	Gaseificação	74-85	N/CCS	10
	Combustíveis fósseis	Reforma a vapor	60-85	N/CCS	10
	Combustíveis Fósseis	Reatores de membrana	64-90	N/CCS	7-9
	Biomassa	Oxidação parcial	60-75	N	7-9
	Metano + CO ₂	Autotérmica	60-75	N	6-8
Termoeletrolise	Combustíveis fósseis	Reforma por plasma	9-85	N	1-3
Química	Água	Reação de oxirredução	3-5	L	4-6
	Metais		NA	L	4-6
Radiólise	Peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂)	Radiólise	NA	L	1-3

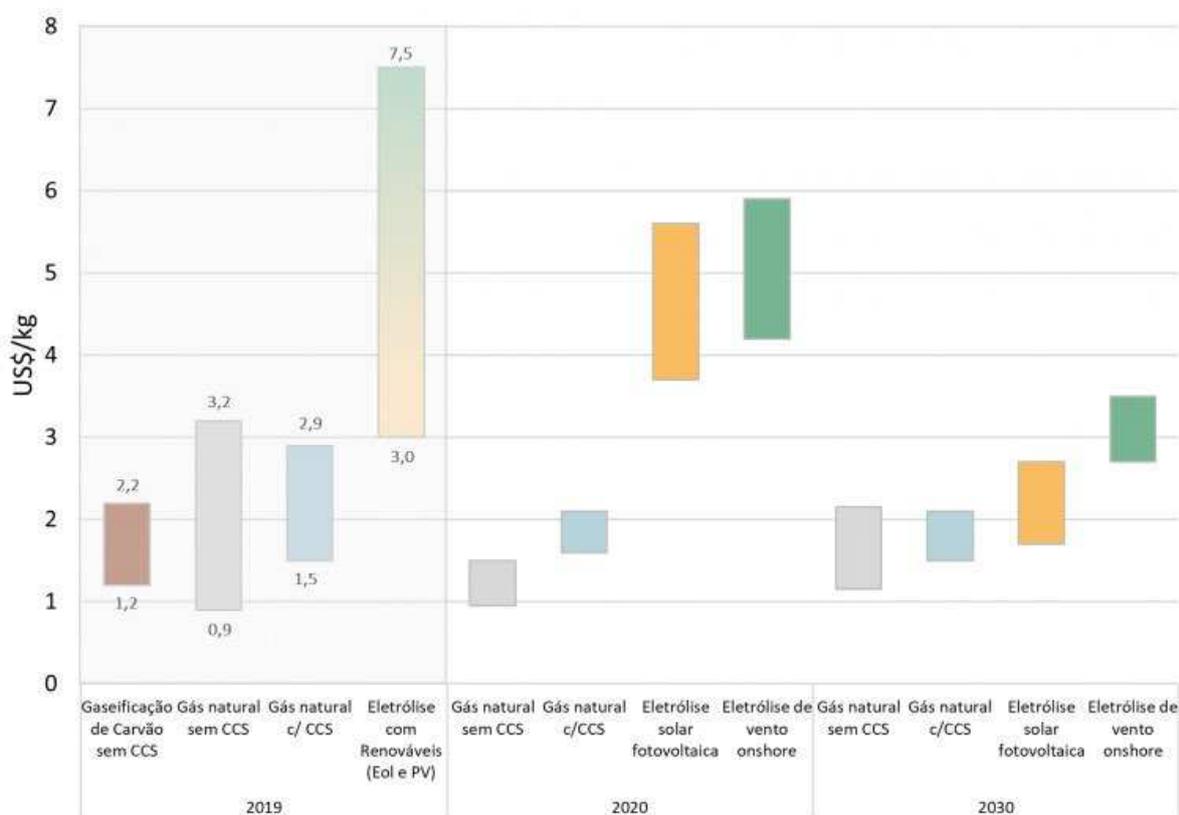
Fonte: O AUTOR (2023), adaptado de (DAWOOD, ANDA e SHAFIULLAH, 2020)

Nota: NA: Não aplicável; Impacto ambiental: CCS: limpo se usar tecnologias CCS; L: limpo (sem emissão); N: não limpo (com emissão); Maturidade: escala de classificação modificada e consolidada (1-10) da ferramenta globalmente aceita de Technology Readiness Level (TRL). O nível 1 se refere às pesquisas iniciais e o nível 10 se refere à 10 refere-se à operação bem-sucedida do sistema em seu ambiente operacional.

Como visto no Quadro 4, a reforma a vapor é uma das tecnologias mais eficiente, além de ser interessante economicamente, pertencente a classe de ativos financiáveis. É válido salientar que o hidrogênio consome energia em sua obtenção, por conta disso não pode ser considerado uma fonte de energia, sendo apenas um transportador (vetor). Existem vários processos de obtenção de hidrogênio, entretanto deve-se atentar para matéria prima utilizada no processo de geração do hidrogênio, uma vez que diferentes fontes, renováveis ou não, podem ser utilizadas.

De acordo com a Figura 4, o hidrogênio advindo do gás natural costuma ser mais interessante quando comparado aos outros meios de obtenção de hidrogênios, como o hidrogênio advindo de energia eólica e solar. Devido à composição semelhante entre o gás natural e o biogás, o custo de produção do hidrogênio a partir da biomassa é bastante promissor devido ao baixo custo das matérias-primas a serem utilizadas quando comparadas ao gás natural.

Figura 4: Custos de produção do hidrogênio a partir da tecnologia utilizada



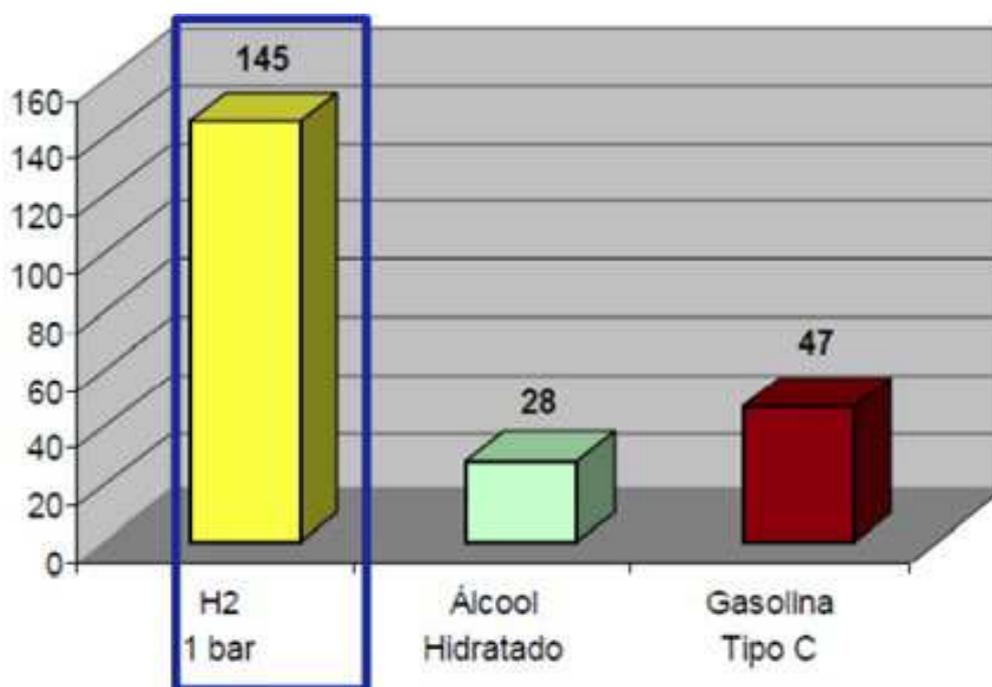
Fonte: O AUTOR (2023), adaptado de (PIEGAS, 2021)

3.1.5 Armazenamento e transporte de hidrogênio

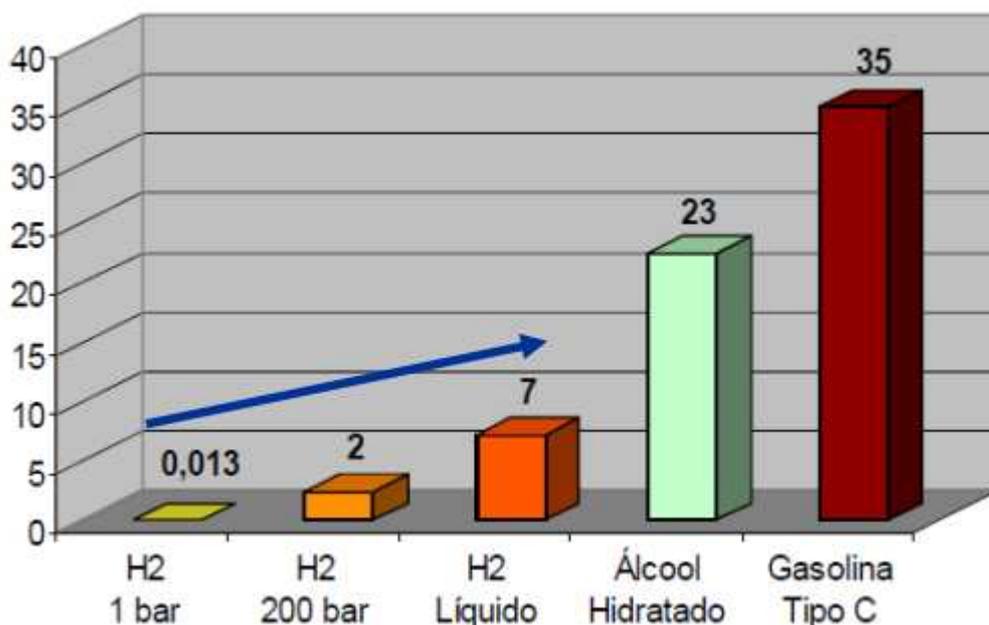
O hidrogênio tem a maior energia por massa de qualquer combustível. Entretanto, sua baixa densidade de temperatura ambiente resulta em uma baixa energia por volume unitário, exigindo o desenvolvimento de métodos avançados de armazenamento que tenham a potencial para maior densidade de energia.

Quando comparado aos combustíveis tradicionais, o hidrogênio tem a maior densidade energética por massa, como pode ser observado na Figura 5, entretanto apresenta a menor densidade energética por volume como pode ser observado na Figura 6.

Figura 5: Gráfico da densidade de energia por massa (MJ/kg)



Fonte: (ALVES, 2018)

Figura 6: Gráfico densidade energética por volume (10^3 MJ/m^3)

Fonte: (ALVES, 2018)

Enquanto a energia por massa de hidrogênio é muito maior do que a maioria dos outros combustíveis, sua energia por volume é significativamente menor do que a dos combustíveis líquidos, como a gasolina. Dessa forma, o H_2 exige métodos avançados de armazenado que proporcione uma maior densidade de energia.

O hidrogênio pode ser armazenado como um elemento ou pode ser extraído, quando necessário, a partir de uma substância rica em hidrogênio. Em sistemas formados somente por hidrogênio, o armazenamento pode ser feito através de processos que alteram o estado ou a fase do hidrogênio (reservatórios de gás hidrogênio comprimido ou através da combinação de compressão e refrigeração; reservatório para hidrogênio líquido). Há também a possibilidade de armazenamento através de processos que associam o hidrogênio a outras substâncias (adsorção de carbono e hidretos metálicos) (ZOHURI, 2019).

A depender do volume, da distância e de circunstâncias locais, há diferentes opções para o armazenamento e transporte do hidrogênio. Devido à baixa densidade do gás hidrogênio, o transporte de hidrogênio trata-se de um processo complexo, que oferece riscos de falha, combustão instantânea e vazamentos de combustível. Dessa forma, desenvolver formas seguras de armazenar e transportar o hidrogênio é imprescindível. Algumas alternativas são transporte rodoviários, outra possibilidade é usar a malha de gás que já existente para

transportar também o hidrogênio. Além disso, há também a possibilidade de transporte por meio marítimo como ocorre com a amônia que já tem uma logística pronta, comumente utilizada como fertilizante.

3.2 Biogás

3.2.1 História do biogás

A formação do biogás ocorre a partir da decomposição da matéria orgânica por meio de diversos microrganismos em ambientes em condições de ausência de oxigênio. Trata-se de um processo muito comum na natureza e ocorre, desde os primórdios, no fundo do mar, em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no compartimento do estômago dos bovinos, animais ruminantes.

China e Índia foram os primeiros países a produzir biogás e utilizá-lo como fonte de energia. Inicialmente, a matéria-prima era restos de alimento, posteriormente, a geração do biogás teve como foco reduzir a quantidade de lodo de esgoto. Entretanto, a necessidade de aproveitar o biogás produzido se deu somente a partir da crise do petróleo nos anos 70, em que o preço da energia subiu consideravelmente (KARLSSON, 2014).

3.2.2 Características do biogás

O biogás consiste em uma mistura gasosa combustível, composta principalmente de metano (50% - 75% em volume) e dióxido de carbono (25% - 50% em volume). Contém ainda pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros gases traço. Sua composição varia de acordo com os substratos utilizados, o processo de digestão anaeróbia e as diferentes tecnologias e condições operacionais utilizadas.

Geralmente o biogás é incolor, inodoro e insolúvel em água. As características do biogás dependem da temperatura, pressão, concentração de metano e concentração de gases inertes e/ou ácidos. O biogás possui densidade menor que o ar e por isso apresenta menor risco de explosão à medida que sua acumulação se torna mais difícil. Em condições normais de produção não é considerado tóxico, por apresentar entre 0% e 0,1% de teor de monóxido de carbono. O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano existente na mistura gasosa, portanto, o biogás é mais energético quando sua quantidade de metano for maior.

3.2.3 Esgoto como insumo para a produção de biogás

Nos atuais tempos, o esgoto deixa de ser visto apenas como um detrito e ganha destaque como insumo, podendo ser utilizado para fins energéticos a fim de atender a necessidade da

população. Anualmente, as ETEs geram uma grande quantidade de biogás, fonte de energia alternativa e renovável. Entretanto, esse potencial é pouco utilizado no Brasil. Na maioria das vezes, esse biogás é emitido para a atmosfera, contribuindo para o aumento da poluição do meio ambiente e do aquecimento global.

3.2.4 Captação de biogás em estações de tratamento de esgoto

A tecnologia ou processo adotado na concepção da ETE, leva em consideração alguns fatores como: grau de tratamento necessário, características do uso de água a jusante, possível reuso, disponibilidade de recursos financeiros, fator custo/benefício, fragilidade ambiental local, facilidades operacionais e disponibilidade de pessoal treinado para operação e manutenção (JORDÃO e PESSOA, 2011).

A captação do biogás durante o processo de tratamento do esgoto para transformar em energia elétrica é uma iniciativa sustentável e fomentam o avanço dos estudos na área. Algumas etapas são cruciais para garantir que o esgoto seja tratado adequadamente e que o biogás produzido seja seguro e eficiente para uso, tais como:

- **Tratamento preliminar**

O esgoto bruto passa por um tratamento preliminar, no qual componentes sólido maiores são retirados através de grades mecanizadas e caixas de areia. Ocorre a retenção dos resíduos sólidos indevidamente lançados na rede de esgoto, como fraldas, papel higiênico, restos de alimentos e até roupas e calçados. Em seguida, o esgoto segue para a caixa de areia, onde é realizada a remoção de todos os detritos sólidos presentes nele e que possam ter escapado ao processo anterior, mediante sedimentação.

- **Tratamento biológico**

Já sem sólidos visíveis, o esgoto é tratado em reator UASB, também chamado de DAFA (Digestor anaeróbio de fluxo ascendente), representado na Figura 6, exposto à ação de seres microscópicos, separado em três estados ou fases: sólido, líquido e gasoso. Nesse processo, a parte líquida, já com carga orgânica reduzida, segue o fluxo de tratamento. A parte sólida sedimenta no reator para futura remoção. Durante o tratamento anaeróbio do esgoto, a fração orgânica do substrato é degradada para produzir o biogás, que é composto principalmente por

gás metano e dióxido de carbono. A parte gasosa que seria emitida para o meio ambiente é coletada e encaminhada para um reservatório de gás, chamado de gasômetro.

- **Purificação do Biogás**

No gasômetro, o biogás é armazenado e, simultaneamente, é realizada a primeira etapa do tratamento, no qual o sulfeto de hidrogênio é biologicamente removido. Posteriormente, o biogás acumulado é encaminhado para um sistema de refrigeração, e filtrado por carvão ativado para tratamento complementar.

Em caso de aproveitamento do biogás para suprir parte da demanda de energia da ETE, o biogás é encaminhado para um motor-gerador que é responsável por transformar esse combustível em energia elétrica.

3.2.5 Reatores UASB, ou DAFA, ou RAFA

Nos reatores UASB, termo já adotado no Brasil (na literatura inglesa “UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor”), conhecido também como Reator Anaeróbico de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente (RAFA), Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente (DAFA), ou Reator Anaeróbico de Leito Fluidizado (RALF), as bactérias formam flocos ou grânulos que formam um colchão ou manta de lodo no interior do reator, no qual ocorre a separação eficiente de gases, sólidos e líquidos.

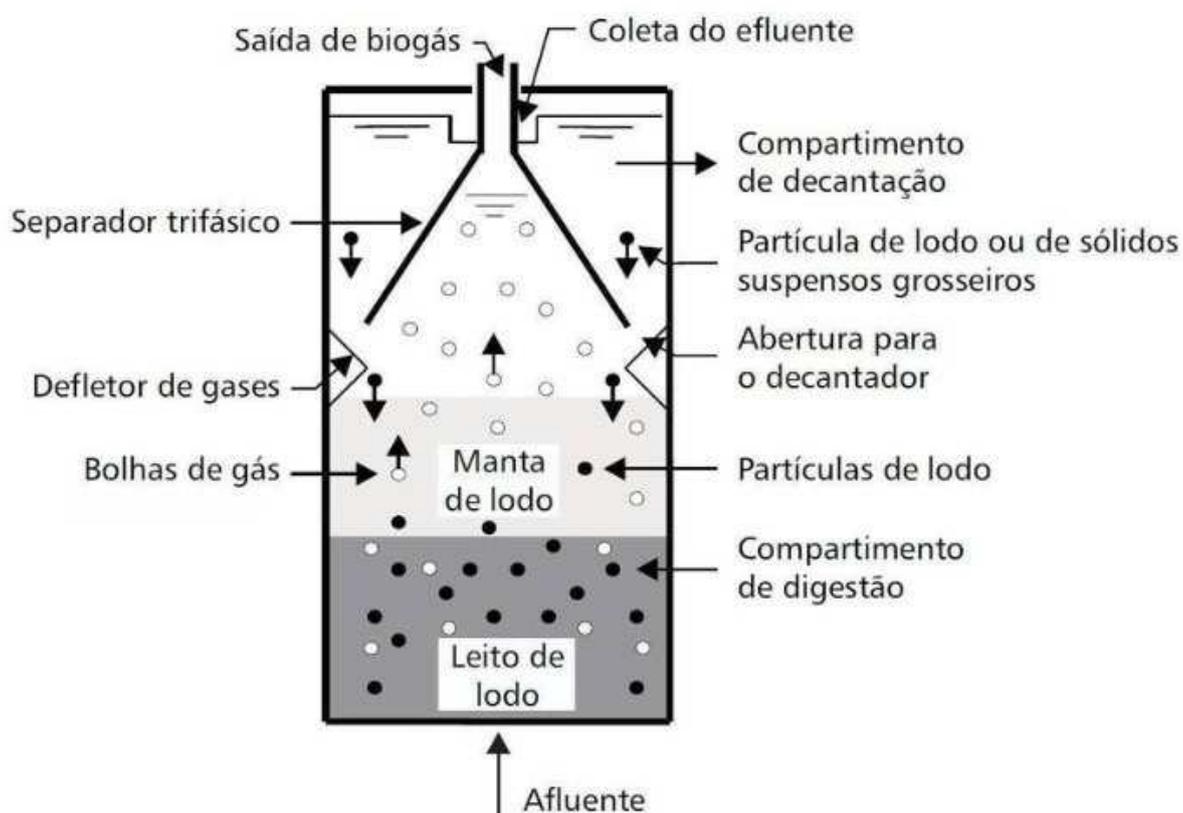
Caracterizado por conter as seguintes partes principais:

- Câmara de digestão: o esgoto entra pela parte inferior do reator UASB e passa pelo leito de lodo (manta de lodo), uma manta de constituição microbiana, na qual se processa a digestão anaeróbia, atravessando-a no sentido ascendente. O material particulado é filtrado pela manta de lodo;
- Separador de fases: dispositivo defletor de gases que separa as fases sólida (da câmara de digestão), da líquida e gasosa;
- Zona de transição: entre a câmara de digestão e a zona de sedimentação;
- Zona de sedimentação: sedimentação dos sólidos e flocos, que retornam pela abertura da parede para a zona de transição. A parte líquida é recolhida com características de efluente clarificado, e

- Zona de acumulação de gases: o gás (biogás) produzido na digestão anaeróbia é retido em uma zona superior de acumulação, onde é coletado e eventualmente, passa por pós-tratamento para possível aproveitado.

A Figura 7 representa um reator UASB:

Figura 7: Desenho esquemático de um reator UASB



Fonte: (JORDÃO e PESSOA, 2011)

3.2.6 Digestão anaeróbia em reatores UASB e a origem do biogás

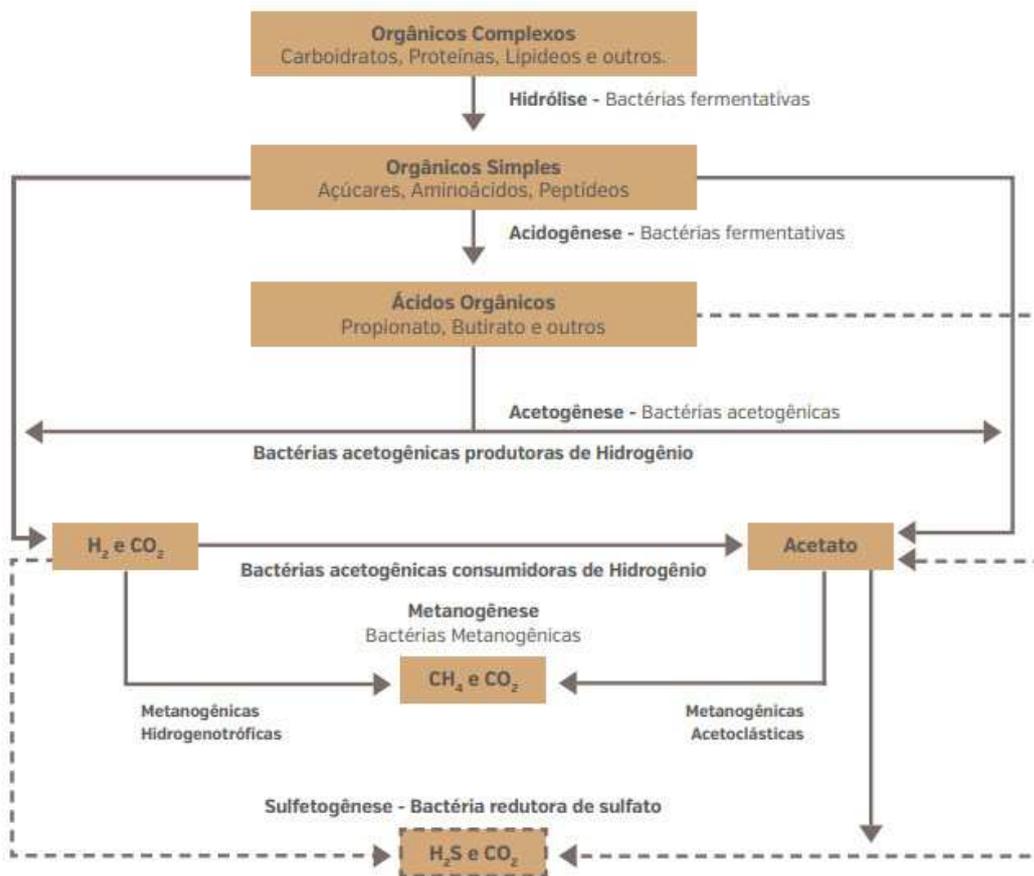
A digestão anaeróbia nos reatores UASB é um processo biológico, em que a matéria orgânica, através de microrganismos anaeróbios, é convertida em lodo biológico, líquidos e gases. Ocorre por meio de quatro etapas: hidrólise, aciologênese, acetogênese e metanogênese, indicadas na Figura 8:

- **Hidrólise:** primeira etapa da digestão anaeróbia. Compostos orgânicos complexos (polímeros) são quebrados por meio de exoenzimas liberadas pelas

bactérias fermentativas originando compostos orgânicos simples (monômeros), solúveis em água, como monossacarídeos, dissacarídeos, ácidos graxos, glicerina, aminoácido.

- Acidogênese: segunda fase da digestão anaeróbia, também chamada de fermentação ou oxidação anaeróbia, caracterizada pela absorção do material hidrolisado e solúvel no meio, produção de ácidos graxos voláteis por bactérias fermentativas acidogênicas, geralmente anaeróbias restritivas. Ao final, originam-se produtos mais simples que são essenciais para as bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas das fases posteriores.
- Acetogênese: bactérias sintrófica acetogênicas, responsáveis pela continuidade da fermentação de compostos intermediários para geração dos substratos precursores do metano, ideais para as arqueas metanogênicas: hidrogênio (H_2), dióxido de carbono (CO_2) e acetato. Existem microrganismos denominados homoacetogênicos consumidores de hidrogênio, convertendo, paralelamente, hidrogênio e gás carbônico em acetato. Os autores também destacam que as bactérias acetogênicas são produtoras obrigatórias de H_2 , embora estas não consigam sobreviver em meio ácido (com elevadas concentrações de hidrogênio dissolvido). Portanto, para que o equilíbrio da microbiota possa ser mantido, essas bactérias devem viver em simbiose com organismos consumidores de hidrogênio e acetato, i.e., as arqueias produtoras de metano (CH_4) (metanogênicas), que por sua vez, só conseguem sobreviver em ambientes com elevadas concentrações de H_2 no meio, estabelecendo um relacionamento sintrópico mutualmente benéfico, ou seja, um mutualismo entre esses domínios.
- Metanogênese: sintetiza metano e consiste na atividade de arqueias metanogênicas acetoclásticas, as quais usam o acetato como fonte de carbono e de energia para produção de gás carbônico e metano sulfetogênese

Figura 8: Desenho esquemático da digestão anaeróbia



Fonte: (PROBIOGÁS, 2017)

3.2.7 Purificação do biogás

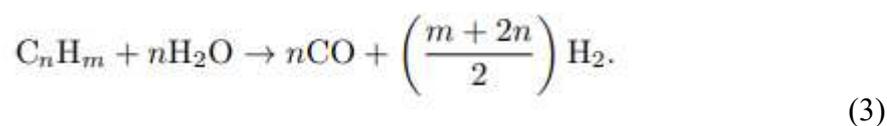
A etapa de purificação do biogás é necessária para que a qualidade do biogás seja compatível às exigências mínimas dos equipamentos de conversão de biogás, a fim de evitar possíveis danos aos equipamentos. Além disso, o processo de purificação do biogás culmina no aumento de poder calorífico do biogás devido ao aumento da concentração de metano em sua composição. Em uma ETE o enriquecimento do biogás tem como objetivo a otimização da conversão deste em energia, para tanto há eliminação de excessos de umidade e de contaminantes como o dióxido de carbono, gás sulfídrico, partículas e siloxanos, elementos de baixa solubilidade e alta pressão de vapor que se volatilizam facilmente, misturam-se ao biogás.

3.3 Produção de hidrogênio via reforma a vapor

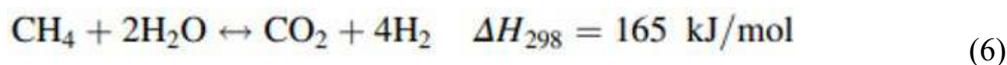
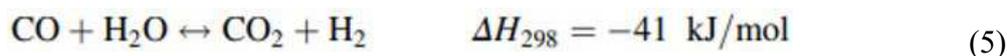
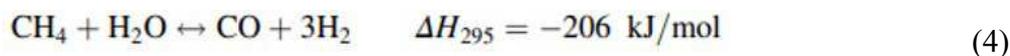
A produção de hidrogênio via reforma a vapor continua sendo a tecnologia mais econômica e mais eficiente para uma ampla gama de matérias-primas, das quais o gás natural apresenta-se como a principal fonte da produção mundial de hidrogênio. Uma desvantagem associada a produção de hidrogênio a partir do gás natural é o alto teor de emissões de carbono, que estão ligadas ao efeito estufa. Entretanto, devido a semelhança existente entre as composições, o biogás pode substituir o gás natural sem a necessárias grandes mudanças na tecnologia de reforma a vapor (BRAGA, SILVEIRA, *et al.*, 2013). Dado o enfoque deste trabalho na produção de hidrogênio a partir do biogás, as tecnologias de reforma a vapor, além dos processos associados a esta tecnologia, serão apresentadas de forma detalhada ao longo deste documento (ZOHURI, 2019).

3.3.1 Reforma a vapor

A reforma a vapor é um processo bem maduro em que o combustível, gás natural por exemplo, reage com vapor de água que resulta na formação de H₂ (gás hidrogênio), além de CO (monóxido de carbono), CO₂ (dióxido de carbono) e, de forma indesejada, C, na forma de fuligem. O processo de reforma a vapor de um hidrocarboneto pode ser representado, de forma geral, a partir da seguinte reação química representada na Equação (3):”



No caso do metano:



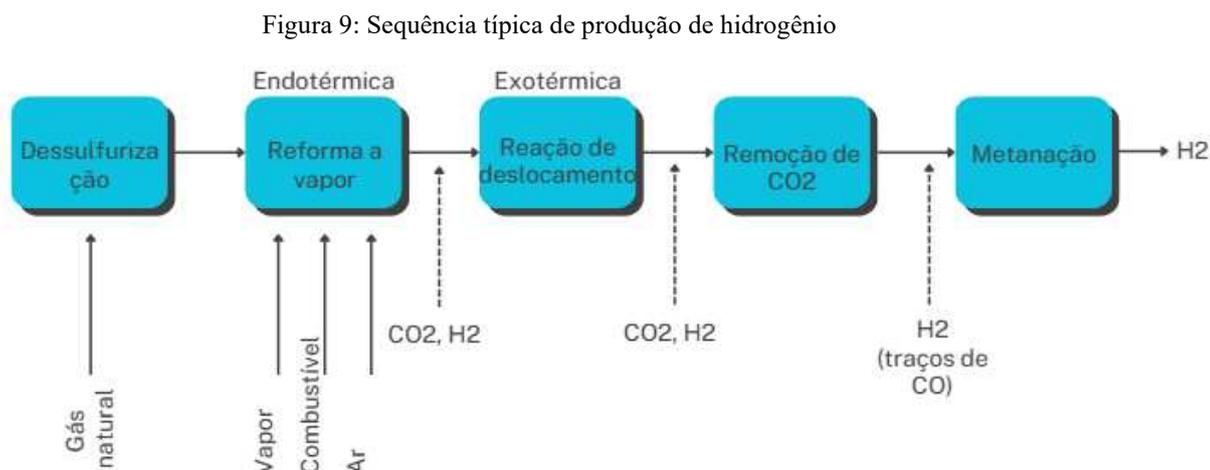
Convém destacar que a primeira etapa, em que o metano reage com o a água para produzir monóxido de carbono e hidrogênio, a variação de entalpia positiva, representada por $\Delta H+$, demonstra que esta reação é bastante endotérmica dessa forma necessita do fornecimento de energia ao sistema em elevadas temperaturas (mantido a aproximadamente 850°C) para

obter a conversão desejável. Tal característica acaba por elevar os custos de operação da reforma (ZOHURI, 2019).

Já a segunda equação, denominada reação de deslocamento gás-água ou reação de *shift*, promove a combinação de monóxido de carbono e água que resulta em dióxido de carbono e mais hidrogênio. Essa etapa tem caráter exotérmico, ou seja, há liberação de energia para o sistema, ($\Delta H_{298K} = -41 \text{ KJ/mol}$) (DA ROSA, 2019).

3.3.2 Processo industrial de reforma a vapor

O processo de produção de hidrogênio por reforma a vapor de hidrocarbonetos leves é composto basicamente por três etapas principais: pré-tratamento, reforma (geração de hidrogênio) e remoção de CO₂. De forma esquemática, a Figura 9 representa uma configuração típica de planta de geração de hidrogênio.



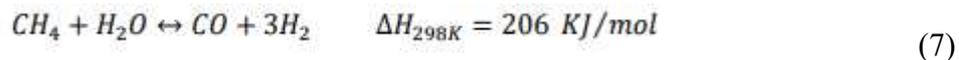
Fonte: O AUTOR (2023), adaptado de (DA ROSA, 2019)

- Pré-tratamento

A primeira etapa do processo é frequentemente a hidrodessulfurização da matéria-prima. Nessa etapa, são realizadas reações entre a matéria prima, gás natural, com injeção de hidrogênio a altas temperaturas para permitir a remoção do enxofre que poderia danificar o catalisador presente na etapa de reforma que são consideravelmente caros. O pré-tratamento é realizado em leitos catalisadores que eliminam primeiramente o enxofre, em seguida os compostos cíclicos de enxofre, compostos de cloro e H₂S (sulfeto de hidrogênio).

- Reforma

Esta etapa ocorre em equipamentos denominados reformadores, tipicamente compostos por feixes de tubos paralelos no interior de um forno, cuja função é aquecer estes tubos de forma a fornecer a energia necessária ao sistema endotérmico, ou seja, requer calor. Ao final desta etapa de reforma, os gases produzidos são conduzidos para a etapa seguinte, os reatores de shift.



- Reações de *Shift*

Em seguida, a corrente do reformador é enviada para os conversores de shift, nos quais são realizadas as reações representadas na equação acima, buscando converter o CO em CO₂ ao reagí-lo com vapor d'água, produzindo assim mais H₂. Geralmente, esta etapa em um conversor de alta temperatura e, em seguida, passa por um conversor em baixa temperatura. Após a realização das reações de shift, o CO se encontra em menor concentração devido à sua conversão a CO₂. Assim, a corrente de saída do conversor de shift é enviada para a etapa seguinte, cujo objetivo é purificação do H₂ através da remoção deste CO₂ e do CO residual.



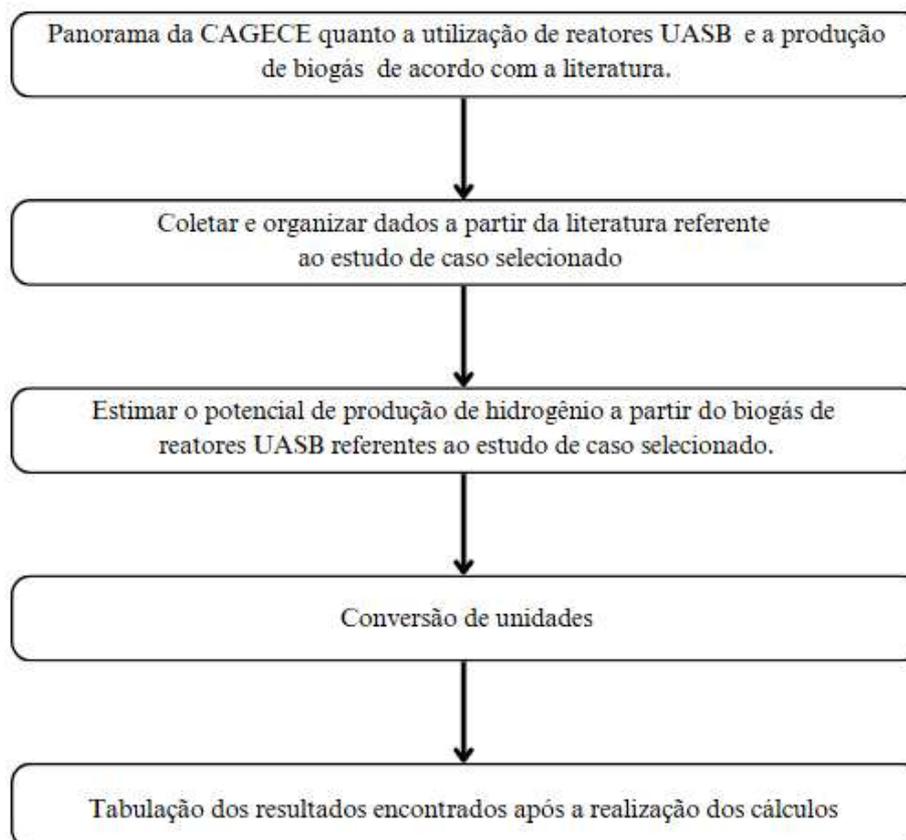
- Remoção de CO₂

O CO₂ produzido nos reformadores e nos conversores de shift é retirado do produto, de forma a se obter uma corrente de elevado teor de H₂. Esta etapa pode ser realizada por processos diversos, a absorção com solventes representa a técnica usualmente utilizada nas plantas de produção de H₂, tendo sido a primeira aplicada em larga escala e sendo usada até hoje. Os solventes mais utilizados neste processo são o K₂CO₃ (carbonato de potássio) a quente ou a monoetanolamina (MEA), com destaque para esta última substância. Além da remoção do CO₂, há outras técnicas de purificação final do H₂, sendo elas: separação criogênica, membrana densa de paládio, membrana polimérica, separação por hidretos metálicos, célula de eletrólito sólido polimérico, conversão do CO residual via reação de SELOX (reação de oxidação seletiva de CO).

4 METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho consiste nas etapas representadas pelo diagrama de blocos da Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de blocos com as etapas da metodologia



Fonte: O AUTOR (2023),

Dessa maneira, as etapas citadas acima serão descritas a seguir com suas devidas explicações e observações.

4.1 Descrição do processo

O processo a ser analisado nesse trabalho tem por base os dados divulgados em dissertação do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará. Intitulado “Panorama, estimativa e avaliação do potencial de produção e utilização do biogás de reatores UASB em ETEs operadas pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará” e foi produzido por Anderson Barbosa Araújo, em 2019.

O estudo de caso foi desenvolvido para estimar o potencial de geração de hidrogênio via reforma a vapor do biogás gerado em reatores UASB operados pela CAGECE. Dessa forma, o trabalho foi dividido em duas etapas principais:

- Etapa 1: Expor o panorama da CAGECE quanto a tecnologia de tratamento de esgoto em especial a utilização de reatores UASB e situação de produção de biogás;
- Etapa 2: Estimar o potencial de produção de hidrogênio a partir do biogás de reatores UASB em estações de tratamento de esgoto operadas pela CAGECE.

4.1.1 Panorama da CAGECE quanto a tecnologia de tratamento de esgoto em especial a utilização de reatores UASB e situação de produção de biogás

Os dados utilizados foram retirados da literatura referente a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), concessionária responsável pela gestão e operação de sistemas de tratamento e abastecimento de água. Tratando-se de esgotamento sanitário, atualmente, a CAGECE conta com o atendimento de, aproximadamente, 2,69 milhões de pessoas, por meio de uma rede coletora com 5 mil quilômetros de extensão, o correspondente a quase 44,80% de índice de cobertura no estado do Ceará; já na capital Fortaleza, esse índice sobe para 66,63%, como uma rede coletora de 2.700 km. Hoje, a CAGECE possui 275 estações de tratamento de esgoto, das quais 153 se localizam na capital e 122 no interior do Estado (CAGECE, 2019).

Para melhor administração dessa área, a CAGECE dividiu o território cearense em 10 unidades de negócio (UNs) para a capital, região metropolitana de Fortaleza e demais interiores, conforme mostram a Figura 10 a seguir:

Figura 11: Correspondência das unidades de negócio por bacia

Sigla	Unidade de Negócio
UN-BSA	Bacia do Salgado
UN-BBJ	Bacia do Baixo Jaguaribe
UN-BAJ	Bacia do Alto Jaguaribe
UN-BBA	Bacia do Banabuiú
UN-BPA	Bacia do Parnaíba
UN-BAC	Bacia do Acaraú e Coreaú
UN-BSI	Bacia da Serra da Ibiapaba
UN-BCL	Bacia do Curu e Litoral
UN-BME	Bacia Metropolitana
UN-MTE ¹	Metropolitana de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto

Fonte: (ARAÚJO, 2019)

Figura 12: Mapa das unidades de negócio da CAGECE no interior.



Fonte: (ARAÚJO, 2019)

De acordo com Araújo (2019), para aumentar a confiabilidade dos resultados, no que concerne à manipulação dos dados, foram consideradas apenas ETEs de tecnologia reatores UASB, assumindo que todas seriam passíveis de recuperação de biogás para fins energéticos, separando aquelas contidas na capital e, portanto, 23 estações (ETE 01 a ETE 23) pertencentes à Unidade de Negócio Metropolitana de Macrocoleta e Transporte de Esgoto (UN-MTE), ; 12 estações aquelas contidas na região metropolitana de Fortaleza (RMF) e, portanto, 23 estações pertencentes à Unidade de Negócio da Bacia Metropolitana (UN-BME); e as demais, do restante do estado (ETE 24 a ETE 35), e 8 estações que ficaram agrupadas como ETEs do interior (ETE 36 a ETE 35), independentemente de a que unidade administrativa pertencesse.

Araújo (2019) reforça que, segundo a literatura apresentada por Valente (2015) e Rosenfeldt et al. (2015), apud Chernicharo et al. (2017), e Bressani-Ribeiro et al. (2019), somente seria economicamente interessante praticar o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade em ETEs com contribuição limite acima de 100.000 habitantes e que, para estações com menor população contribuinte, excluída, conseqüentemente, a opção de redirecionar o biogás produzido nessas 43 estações.

É válido ressaltar que cada gás é um produto multifatorial, como o biogás que configura uma mistura de gases que apresenta composição variada de acordo com o tipo de concentração e matéria orgânica submetida a digestão anaeróbia, condições físico-químicas do biodigestor e dos organismos presentes nele. A composição do biogás produzido por diferentes fontes foi apresentada presente é apresentado a seguir no Quadro 5:

Quadro 5: Composição do biogás de diferentes fontes.

Componente	Unidade	Composição volumétrica típica por fonte de biogás			
		Reatores UASB	Aterro sanitário	Agropecuário	Biodigestor de lodo
CH ₄	%	60 a 85	45 a 50	50 a 80	60 a 70
CO ₂	%	5 a 15	30 a 45	30 a 50	20 a 40
CO	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-	-
N ₂	%	10 a 25	0 a 15	-	< 2
H ₂	%	0 a 3	Traços a > 1	0 a 2	-
H ₂ S	ppmv	1000 a 2000	10 a 200	100 a 700	Até 1000
O ₂	%	Traços	0,8	-	-
NH ₃	%	Traços	Traços	Traços	Traços

Fonte: (ARAÚJO, 2019)

É comum a presença de compostos indesejados no biogás de reatores UASB. Logo, faz-se necessária que a purificação do biogás seja implementada para realizar a remoção dos compostos sulfurosos e vapor de água. Dessa forma, será possível minimizar os potenciais efeitos negativos dessas substâncias. A purificação do biogás gera o biometano, com uma composição de 95 a 97% de metano e podendo conter ainda de 1 a 3% de dióxido de carbono, dependendo diretamente da tecnologia de purificação utilizada.

4.1.2 Estimativa da quantidade de hidrogênio a ser produzido do biogás gerado nas ETEs.

De acordo com o levantamento de dados feitos e disponibilizados por Araújo (2019), as ETEs de interesse foram divididas em três grupos de acordo com a localização de ETES situadas em Fortaleza (Figura 11), região metropolitana (Figura 12) e interior do Ceará (Figura 13).

Figura 13: Avaliação da produção de biogás ETEs de Fortaleza (UN-MTE).

ETE	População	Vazão de esgoto	Q CH ₄	Q Biogás	Potencial térmico
	hab	L.s ⁻¹	m ³ .dia ⁻¹	m ³ .dia ⁻¹	MJ.dia ⁻¹
ETE 01	100	1	15,99	21,33	229,63
ETE 02	450	5	44,61	59,49	640,52
ETE 03	612	4,9	51,05	68,06	732,89
ETE 04	714	1,2	28,63	38,18	411,08
ETE 05	800	5	147,09	196,12	2111,77
ETE 06	832	4,7	80,29	107,05	1152,71
ETE 07	1040	1,6	11,54	15,39	165,69
ETE 08	1620	1,3	26,37	35,16	378,57
ETE 09	2745	5,2	26,79	35,72	384,67
ETE 10	2817	2,7	10,1	13,47	145,03
ETE 11	3775	22,6	9,67	12,89	138,79
ETE 12	6145	9	191,17	254,89	2744,58
ETE 13	7841	2	19,06	25,41	273,57
ETE 14	8200	3,1	47,12	62,83	676,56
ETE 15	8200	3,6	32,98	43,97	473,42
ETE 16	8382	2,8	45,42	60,56	652,13
ETE 17	9243	13,9	117,81	157,08	1691,4
ETE 18	9370	10,8	112,8	150,4	1619,41
ETE 19	11968	14,7	416,48	555,3	5979,27
ETE 20	17004	59,3	1106,14	1474,85	15880,57
ETE 21	27423	58,1	202,99	270,65	2914,29
ETE 22	30300	8,8	230,9	307,87	3315,03
ETE 23	59509	31,5	447,07	596,1	6418,52

Fonte: O AUTOR, adaptado de (ARAÚJO, 2019)

Figura 14: Avaliação da produção de biogás das ETEs da RMF (UN-BME).

ETE	População	Vazão de esgoto	Q CH₄	Q Biogás	Potencial térmico
	hab	L.s⁻¹	m³.dia⁻¹	m³.dia⁻¹	MJ.dia⁻¹
ETE 24	441	0,6	5,72	7,63	82,18
ETE 25	694	1,1	28,88	38,51	414,62
ETE 26	697	1,2	29,5	39,34	423,58
ETE 27	864	0,8	25,53	34,04	366,5
ETE 28	1527	5	152,78	203,7	2193,39
ETE 29	1539	1,7	28,45	37,93	408,43
ETE 30	1587	1,4	12,19	16,25	174,96
ETE 31	2088	2,4	61,15	81,53	877,91
ETE 32	2746	3,1	50,86	67,81	730,13
ETE 33	3576	2,4	28,53	38,04	409,62
ETE 34	12916	20,7	195,64	260,86	2808,83
ETE 35	22569	27,7	269,4	359,19	3867,66

Fonte: O AUTOR, adaptado de (ARAÚJO, 2019)

Figura 15: Avaliação da produção de biogás das ETEs do interior do Ceará.

ETE	População	Vazão de esgoto	Q CH₄	Q Biogás	Potencial térmico
	hab	L.s⁻¹	m³.dia⁻¹	m³.dia⁻¹	MJ.dia⁻¹
ETE 36	385	0,3	7,23	9,64	103,76
ETE 37	576	0,6	9,48	12,64	136,12
ETE 38	585	1	0,66	0,88	9,5
ETE 39	667	1,1	22,76	30,34	326,71
ETE 40	2006	24,3	212,75	283,67	3054,41
ETE 41	2330	2,6	71,03	94,71	1019,75
ETE 42	4732	9,7	195,21	260,27	2802,53
ETE 43	11345	11	355,94	474,59	5110,21

Fonte: O AUTOR, adaptado de (ARAÚJO, 2019)

Com base nesses dados, através da vazão de esgoto é possível estimar a quantidade de biogás produzida em todas as 43 ETEs, a fim de estimar, por meio de cálculo estequiométrico, a quantidade de hidrogênio que poderia ser produzida a partir da reforma a vapor do biogás. Para obtenção de tal valor, utilizou-se as seguintes etapas:

I) Composição do biogás:

De acordo com (BRAGA, SILVEIRA, *et al.*, 2013), dependendo da tecnologia de biodigestão utilizada e da matéria-prima, a composição do biogás varia entre 45 - 75% de CH₄ e de 25 - 55% de dióxido de carbono, além de conter traços de hidrogênio, enxofre, amônia e vapor de água. Supondo que a composição do biogás contido em ETEs operadas pela CAGECE é configurada por 75% CH₄ e 25% CO₂, conhecidos os volumes de biogás, média de volume de metano e estequiometria do processo de reforma a vapor, pode-se estimar a quantidade de hidrogênio contida no biogás por meio do CH₄.

II) Cálculo da quantidade de hidrogênio a ser produzida

Uma variação da reforma a vapor, processo químico que reage o metano (CH₄) com vapor de água (H₂O) a alta temperatura (ENTRE 700°C e 1000°C) e pressão, na presença de

um catalisador, para produzir hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂), é dada de acordo com a equação química:



A relação estequiométrica, de forma ideal, a reação produz quatro moléculas de hidrogênio (H₂) para cada molécula de metano (CH₄) e duas moléculas de água (H₂O) utilizadas. Ou seja, para cada molécula de metano que reage com duas moléculas de vapor de água, são produzidas uma molécula de dióxido de carbono e quatro moléculas de hidrogênio. Assim, para calcular a quantidade de hidrogênio a ser produzida, é necessário saber a quantidade de metano que estará disponível para a reação. Essa quantidade pode ser calculada a partir do teor de metano no biogás e da quantidade de biogás que será utilizado, já observado no quadro 4 acima.

A equação já está balanceada. Ambos os lados da equação, reagentes e produtos, apresentam 1 átomo de carbono, 2 átomos de oxigênio e 8 átomos de hidrogênio (nos reagentes, 4 átomos de hidrogênio na molécula de metano e 4 na molécula de água. Nos produtos, 8 átomos de hidrogênio).

De acordo com a estequiometria da reação, para cada molécula de metano, tem-se 4 moléculas de hidrogênio. Dessa forma, para calcular a quantidade de hidrogênio a ser produzida, tem-se:

$$Q_{\text{h}_2} = 4 * Q_{\text{ch}_4} \quad (10)$$

Onde:

Q_{H₂}: vazão de gás hidrogênio;

Q_{ch₄}: vazão de gás metano;

Por questão de simplificação, a composição do biogás contido em ETEs operadas pela CAGECE foi considerada como sendo um composto de 75% CH₄ e 25% CO₂, conhecidos os volumes de biogás, média de volume de metano e estequiometria do processo de reforma a vapor, pode-se estimar a quantidade de hidrogênio contida no biogás por meio do CH₄. Dessa forma, supondo 10 m³ de biogás composto 75% de metano, significa que há 7,5 m³ de metano

no biogás. Para estimar a quantidade de hidrogênio produzida pela reforma a vapor, pode-se usar o seguinte cálculo:

$$Q_{\text{ch4}} = Q_{\text{biogás}} * 0,75 \quad (11)$$

Onde:

Q_{ch4} : vazão de gás metano;

$Q_{\text{biogás}}$: vazão de biogás.

Segundo o estudo realizado por BRAGA, SILVEIRA, *et al.* (2013) a eficiência do processo reformador foi de 80%. Ao comparar a eficiência da reforma a vapor do biogás com o tradicional processo (utilizando gás natural), percebe-se que a eficiência é quase a mesma, a eficiência da reforma do gás natural é de 85%. A pequena diferença na eficiência de ambos os processos pode ser justificada pelo fato de que o montante de metano no gás natural é maior do que no biogás, e o metano é o principal responsável pela produção de hidrogênio no caso de reforma a vapor de ambas as substâncias.

Tendo os dados citados, o cálculo da produção de hidrogênio se dá a partir da equação abaixo:

$$Q_{\text{H2}} = 4 * Q_{\text{ch4}} * E \quad (12)$$

Onde:

Q_{H2} : vazão de gás hidrogênio;

Q_{ch4} : vazão de gás metano;

E: eficiência do reator UASB.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para efeito de comparação, foi estimado a produção de hidrogênio por meio do processo reformador tradicional (utilizando gás natural), cuja eficiência é 85%, bem como a eficiência da reforma a vapor do biogás cuja eficiência é 80%. A pequena diferença na eficiência de ambos os processos pode ser justificada pelo fato de que o montante de metano no gás natural é maior do que no biogás, e o metano é o principal responsável pela produção de hidrogênio no caso de reforma a vapor de ambas as substâncias.

Figura 16 - Produção de hidrogênio por meio do reformador tradicional

E	Nº de ETEs	Vazão de Esgoto	Q Biogás	Q CH₄	Q H₂
%		L.s⁻¹	L.s⁻¹	L.s⁻¹	L.s⁻¹
85%	43	391,5	800,3	600,2	2040,693

Fonte: O AUTOR (2023)

Utilizando a densidade do metano nas condições padrões de temperatura e pressão (CPTP), sendo aproximadamente 0,66kg/m³, e considerando a equação 9, temos o peso molecular de CH₄ sendo 16kg/kmol e de 4H₂ sendo 8g/kmol, então teremos uma razão de 2kg de CH₄ para 1kg de 4H₂, ou seja, para cada quilograma de metano consumido teremos produzido a metade de hidrogênio, considerando uma eficiência de 100%. Dessa forma, pode-se converter o fluxo de volume em fluxo de massa utilizando a eficiência de cada reforma, conforme as figuras 17 e 19.

Figura 17 - Produção de hidrogênio por meio do reformador tradicional

E	Nº de ETEs	Vazão de Esgoto	Q Biogás	Q CH₄	Q H₂
%		L.s⁻¹	L.s⁻¹	kg.s⁻¹	kg.s⁻¹
85%	43	391,5	800,3	0,3961	0,168357

Fonte: O AUTOR (2023)

Figura 18: Estimativa da produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETEs operadas pela Cagece

E	Nº de ETEs	Vazão de Esgoto	Q Biogás	Q CH₄	Q H₂
%		L.s⁻¹	L.s⁻¹	L.s⁻¹	L.s⁻¹
80%	43	391,5	800,3	600,2	1920,652

Fonte: O AUTOR (2023)

Figura 19: Estimativa da produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETEs operadas pela Cagece

E	Nº de ETEs	Vazão de Esgoto	Q Biogás	Q CH₄	Q H₂
%		L.s⁻¹	L.s⁻¹	kg.s⁻¹	kg.s⁻¹
80%	43	391,5	800,3	0,3961	0,158454

Fonte: O AUTOR (2023)

Ao realizar os cálculos, estimou-se que para as 43 estações de tratamento operadas pela CAGECE, dotadas de reatores anaeróbios, são processados 12 bilhões de litros de esgoto por ano. Esse volume tem potencial de geração de 25 milhões metros cúbicos de biogás, anualmente, que seriam suficientes para produzir cerca de 500 toneladas de hidrogênio por ano, quantidade que garantiria a circulação de diária de 2933 veículos híbridos com célula combustível durante um ano, de acordo com cálculos realizados com base em estudo semelhante divulgado recentemente pela Sanepar.

Como visto anteriormente, para se produzir 1kg de hidrogênio são necessários 9 litros de água por meio do processo de eletrólise. Dessa forma, a produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás de reatores UASB, por utilizar o esgoto, pouparia cerca de 4,5 milhões de litros de água por ano, quando comparado com o processo de eletrólise.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo como base os resultados encontrados e os dados disponíveis na literatura, o presente trabalho teve como foco a produção de hidrogênio, utilizando-se a rota tecnológica de reforma a vapor do gás natural, tecnologia já utilizada em processos industriais, observou-se que o biogás pode ser uma alternativa promissora para produção de hidrogênio. Em síntese, concluiu-se que a reforma a vapor do biogás para produção de hidrogênio é uma tecnologia bastante interessante do ponto de vista energético, econômico e ambiental.

Do ponto de vista energético, sabe-se que, atualmente, a grande maioria das plantas de ETEs apenas queimam o biogás capturado no processo de digestão anaeróbia, desperdiçando o potencial e valor energético agregado ao biogás que poderia ser utilizado para outras finalidades, como a produção de hidrogênio, que apresenta grande versatilidade em seu uso e pode ser empregado na indústria alimentícia, siderúrgica, no setor de transporte, na geração de eletricidade e na utilização como matéria-prima na produção de combustíveis sintéticos e produtos químicos.

Do ponto de vista econômico, há o baixo custo da matéria-prima a ser utilizada no processo, no caso o esgoto, item que seria um descartado e passa a ser insumo para produção biogás e hidrogênio, gerando renda extra no processo. No processo de reforma a vapor não seria necessário grandes mudanças, pois o biogás apresenta composição semelhante ao gás natural, amplamente utilizado na reforma a vapor e responsável por cerca de 50% da produção mundial de hidrogênio.

Solução positiva também do ponto de vista ambiental, pois o biogás é considerado um combustível renovável, além disso solução incentiva o tratamento de esgoto e a ampliação progressiva do acesso de todos aos serviços de esgoto, meta que traria ganhos expressivos para a sociedade, visto que o biogás pode ser produzido em qualquer lugar em grandes quantidades e de diferentes formas.

Ao realizar os cálculos, estimou-se que nas estações de tratamento operadas pela CAGECE, dotadas de reatores anaeróbios, são processados 12 bilhões de litros de esgoto por ano, volume com potencial de geração de 25 milhões metros cúbicos de biogás, que seriam suficientes para produzir cerca de 500 toneladas de hidrogênio por ano, quantidade que garantiria a circulação de diária de cerca de 2933 veículos híbridos com célula de combustível durante um ano, de acordo com cálculos realizados com base em estudo

semelhante divulgado recentemente pela Sanepar. Além disso, a produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás de reatores UASB, por utilizar o esgoto, pouparia cerca de 4,5 milhões de litros de água por ano, quando comparado com o processo de obtenção de hidrogênio por eletrólise.

Por fim, foi possível concluir que os objetivos propostos para a execução desse trabalho foram alcançados, sugerindo-se considerar aprofundamento em trabalhos posteriores, pois o avanço significativo em pesquisas e os esforços governamentais ainda são necessários para permitir a viabilidade de uma economia baseada em hidrogênio.

7 REFERÊNCIAS

ABRAINC. Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias. **ABRAINC**, 2022. Disponível em: <<https://www.abrainc.org.br/esg/2022/07/13/hidrogenio-verde-ganha-espaco-mas-custo-ainda-limita-avanco-rapido/>>. Acesso em: 19 Novembro 2023.

ALVES, H. J. Tecnologias de Produção de Hidrogênio, Foz do Iguaçu, p. 71, 16 maio 2018. Disponível em: <<https://palotina.ufpr.br/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2018/05/Aula-Hidrog%C3%AAnio-Prof.-Helton-Jos%C3%A9-Alves.pdf>>.

ALVES, H. J. et al. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the. **International Journal of Hydrogen Energy**, Foz do Iguaçu, 38, 2013. 5215-5225.

AMORIM, G. S. Análise 4E na produção de hidrogênio por eletrólise a partir da energia solar fotovoltaica: estudo de caso no cenário brasileiro. **Repositório UNIFEI**, 2024. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/4102>>. Acesso em: 16 setembro 2024.

ARAÚJO, A. B. Repositório Institucional UFC. **Repositório Institucional UFC**, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/49704/5/2019_dis_abaraujo.pdf>. Acesso em: 21 Maio 2023.

BATISTA, C. Toda Matéria, 2023. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/tabela-periodica/>>. Acesso em: 19 Junho 2023.

BHARATHIRAJA, B. et al. Biohydrogen and biogas – an overview on feedstocks and enhancement process. **Fuel**, 2 Agosto 2016. 810-828.

BRAGA, L. et al. Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Guaratinguetá, 28, 2013. 166–173.

DA ROSA, A. V. **Fundamentals of Renewable Energy Process**. 2^a. ed. [S.l.]: Academic Press, 2019. 864 p.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview.. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2020.

DINIZ, M. C. Núcleo de Inovação Tecnológica. **Portais Univasf**, 2021. Disponível em: <<https://portais.univasf.edu.br/nit/portfolio-tecnologico/nivel-de-maturidade-tecnologica>>. Acesso em: 12 Novembro 2023.

IEA. International Energy Agency. **IEA**, 2022. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>>. Acesso em: 20 Junho 2023.

IPEA. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, Agosto 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf>. Acesso em: 2023.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domesticos**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KARLSSON, T. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Univates, 2014.

OLABI, G.; ABDELKAREEM, M.. Large-scale hydrogen production and storage technologies: current status and, Sharjah, 2020.

PIEGAS, J. D. Custos de Hidrogênio: Perspectivas no longo prazo. **Gas Energy**, Agosto 2021.

PROBIOGÁS. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás** . 2ª. ed. Brasília: Ministério das Cidades, v. Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto, 2017. 186 p.

SANEPAR. Sanepar avança em estudos sobre produção de hidrogênio renovável, Maio 2023. Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Sanepar-avanca-em-estudos-sobre-producao-de-hidrogenio-renovavel>>. Acesso em: 20 Novembro 2023.

SOUZA, V. P. D. Universidade Federal de São Carlos, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3908/4054.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 21 Junho 2023.

ZOHURI, B. **Hydrogen Energy: Challenges and Solutions for a Cleaner Future.**
Cham: Springer, 2019. 283 p.