



HIDROGÊNIO VERDE: REVISÃO DE MÉTODO DE PRODUÇÃO A PARTIR DO BIOGAS

GREEN HYDROGEN: REVIEW OF PRODUCTION METHOD FROM BIOGAS

ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO DE OPERAÇÕES E LOGÍSTICA

Micheli dos Santos Quadri Costa, UFSC, Brasil, micheli.quadri@hotmail.com

Caroline Rodrigues Vaz, UFSC, Brasil, caroline.vaz@ufsc.br

Mauricio Uriona Maldonado, UFSC, Brasil, m.uriona@ufsc.br

Resumo

O uso sustentável dos recursos naturais visando a redução das emissões de GEE podem ser alcançados pelo desenvolvimento de um processo limpo para a geração de energia, baseado em combustíveis renováveis e como forma de reduzir esses problemas e apresentar soluções, apresentam-se inovações tecnológicas através da utilização de biocombustíveis como o biogás como fonte de energia renovável podem ser interessantes, pois possibilitariam o fornecimento de energia com alta disponibilidade. Desta forma o interesse na produção de hidrogênio verde a partir de fontes renováveis está crescendo a cada dia e com isso, o hidrogênio pode ser produzido a partir do biogás. Em vista disso, o artigo busca a compreensão da importância da produção de hidrogênio verde através do biogás.

Palavras-chave: hidrogenio verde; biogás; inovações tecnológicas.

Abstract

The sustainable use of natural resources aiming at reducing GHG emissions can be achieved by developing a clean process for energy generation, based on renewable fuels and as a way to reduce these problems and present solutions, technological innovations are presented through the use of biofuels such as biogas as a renewable energy source can be interesting, as they would enable the supply of energy with high availability. Thus, the interest in the production of green hydrogen from renewable sources is growing every day and with this, hydrogen can be produced from biogas. In view of this, the article seeks to understand the different methods of producing green hydrogen through biogas.

Keywords: green hydrogen; biogas; technological innovations.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, riscos ambientais, as crescentes pressões sobre os recursos naturais, preocupações com a segurança do fornecimento de energia e aumento dos preços dos combustíveis estão entre as indicações de que a humanidade precisa se transformar (BREE et al., 2010; IEA, 2019a). Através dos quadros de políticas internacionais é possível identificar os

impactos desses problemas, que incentivam contribuições para uma transição em busca de um desenvolvimento sustentável. Por meio desse direcionamento, pode-se garantir a continuidade de recursos ambientais para as gerações futuras, de forma que a melhoria da qualidade de vida, aliado ao uso de práticas sustentáveis para o manuseio de recursos naturais (ONU, 2019).

Após décadas sendo tratado como uma fonte de energia de grande potencial e disruptiva para o futuro, mas com significativos desafios tecnológicos e de mercado, o hidrogênio tornou-se um objetivo estratégico de governos e empresas em todo o mundo (EPE, 2021).

O uso de combustíveis fósseis também causou outras questões ambientais, como poluição do solo, da água e do ar (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2016). Além disso, as emissões de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases do efeito estufa (GEE), somam um valor aproximado de 28% do total mundial (IEA, 2019b). Os avanços tecnológicos ao longo dos anos possibilitaram a utilização do petróleo como fonte energética nas mais diversas atividades, o que resultou em uma verdadeira corrida ao “ouro negro”, que se tornou o principal recurso energético do mundo. Em 2015, cerca de 87% da energia consumida no mundo era resultado da queima de combustíveis fósseis derivados do petróleo (VIANA; TAVARES; LIMA, 2015).

O uso sustentável dos recursos naturais visando a redução das emissões de GEE podem ser alcançados pelo desenvolvimento de um processo limpo para a geração de energia, baseado em combustíveis renováveis (DAHUNSI et al., 2017). Como forma de mitigar esses problemas e trazer soluções, apresentam-se as inovações tecnológicas através da utilização de bicompostíveis como o biogás (obtido através da digestão anaeróbica de biomassa) e o bioetanol como fonte de energia renovável podem ser interessantes, pois possibilitariam o fornecimento de energia com alta disponibilidade e previsibilidade (HOLM-NIELSEN et al., 2009; HAHN et al., 2014; MILTNER et al., 2017).

Desta forma, a grande questão é: “quais os possíveis processos de produção de hidrogênio verde através do biogás?” Diante desse questionamento, o objetivo deste estudo é identificar os métodos de produção do hidrogênio verde através do biogás, discutidos pela literatura. Para isso, o estudo utiliza uma revisão estruturada da literatura, através do método SYSMAP, buscando compreender o processo de produção.

O artigo está composto por quatro seções, na qual se inicia com esta seção de introdução. Em seguida, apresenta-se o método utilizado para a elaboração do artigo. A seção 3 apresenta os resultados e discussões encontrados a partir da revisão realizada. Por fim, há a seção 4, composta pelas considerações finais.

2. MÉTODO

Para o desenvolvimento deste artigo utilizou-se o método SYSMAP (Scientometric and Systematic yielding Mapping Process), que possui como objetivo apresentar uma forma estruturada dos principais processos para a realização de uma revisão da literatura (VAZ; URIONA MALDONADO, 2017). O modelo proposto por Vaz e Uriona Maldonado (2017) consiste em quatro fases, conforme Figura 1:



Figura 1 - Modelo SYSMAP

A primeira fase, de construção (I), baseia-se na definição das palavras-chave, de forma a obter uma busca eficiente para o estudo e a escolha das bases de pesquisa. Posteriormente, há a segunda fase de filtragem (II), onde identifica-se os artigos duplicados e o enquadramento/alinhamento dos artigos pelos títulos e resumos. A terceira fase, cientometria (III), contempla o mapeamento dos principais autores, periódicos e palavras-chave sobre o tema em análise. Há ainda, a análise sistemática e/ou análise de conteúdo (IV), formando a quarta fase. Soma-se as fases anteriores, a construção das lacunas de pesquisa do tema em estudo, pois após a leitura dos artigos, o pesquisador tem condições para propor oportunidades de pesquisa (VAZ; URIONA MALDONADO, 2017).

Neste artigo, a etapa de bibliometria não será realizada, dando foco somente para a análise de conteúdo (quarta fase). A construção da coleção de artigos desenvolveu-se a partir das bases de dados Web of Science e Scopus, o primeiro foi selecionado por poder alcançar todos os periódicos indexados com um alto fator de impacto calculado no JCR (Journal Citation Reports) (CARVALHO; FLEURY; LOPES, 2013) e o segundo, foi selecionado por ser o maior banco de dados de literatura revisada por pares (MORIOKA; DE CARVALHO, 2016). Para a pesquisa, fez-se uso da combinação de três palavras-chave: “green hydrogen” AND “applications” AND “biogás”. Tal pesquisa, realizou-se até o período de maio de 2023, sem restrições temporais nas bases de dados. Na Figura 2 apresentam-se as etapas da pesquisa.

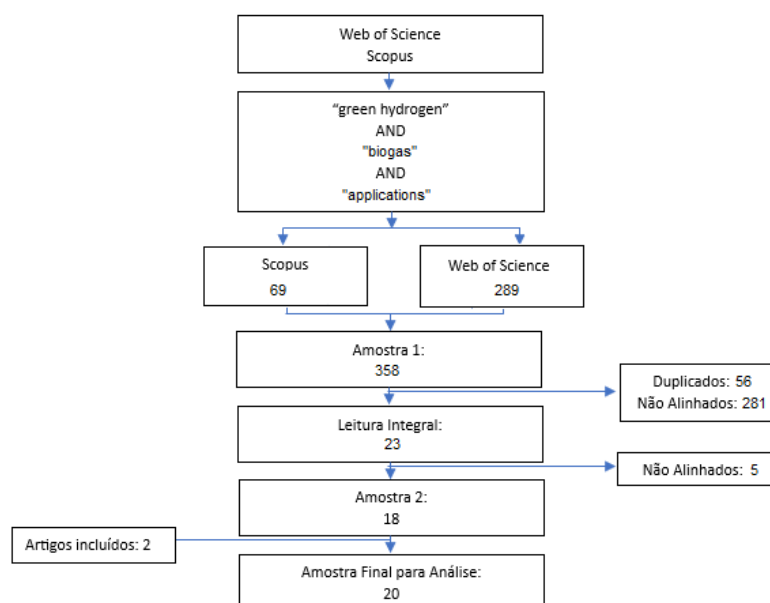


Figura 2 – Etapas da Revisão

Obteve-se 289 artigos na Web of Science e 69 resultados na segunda base, Scopus, totalizando 358 artigos (amostra 1). A filtragem ocorreu para remoção dos duplicados, além disso, os artigos foram submetidos à alinhamento dos títulos e resumos em relação ao objetivo da pesquisa, artigos que não estavam alinhados com o tema foram excluídos (técnicos, ou que não apresentavam informações sobre produção de hidrogênio verde) restando 18 artigos (amostra 2). Esses filtros têm a função de eliminar artigos indesejáveis e melhorar o processo de pesquisa, de modo a não dedicar tempo desnecessário à leitura em texto integral de artigos que não agregam valor ao objetivo de estudo. Posteriormente, procedeu-se a leitura na íntegra do conteúdo dos artigos selecionados, os quais foram analisados conforme ênfase de propósito do presente estudo. Ademais, inclui-se na amostra mais 2 artigos, de relevância para o estudo e, que não estavam na amostragem, totalizando 20 artigos (amostra final). Para tanto, os trabalhos encontrados foram categorizados pela abordagem adotada para a produção de hidrogênio verde.

Para efetuar o tratamento dos dados, foi utilizado o software EndNote X9, o qual facilita o trabalho de pesquisa, reunindo referências de bases de dados *online*, importando seus metadados e agrupando-os de diferentes maneiras.

Para análise de conteúdo, a partir da leitura dos artigos, optou-se pelo agrupamento de métodos de gerenciamento citados pelos autores da revisão. Sendo assim, a categorização resultou em:

- i) Hidrogênio, o qual descreve a sua aplicação;
- ii) biogás, o qual caracteriza a tecnologia comumente usada; e
- iii) por último, possíveis caminhos para o hidrogenio verde, o qual contém a cadeia do hidrogenio construído por diferentes autores

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentam-se os resultados encontrados a partir da leitura integral dos artigos e estudos adicionais. Contemplando a categorização realizada na seção anterior.

3.1 Hidrogênio

O hidrogênio foi descoberto no século XVIII, em 1766, é o elemento mais abundante no Universo e o mais leve, sendo também o mais simples da tabela periódica de Mendeleiev. É conhecido desde há centenas de anos como um gás que se obtém quando ácido sulfúrico diluído é posto em contato com o ferro, sendo inflamável no ar. Henry Cavendish mostrou que o gás hidrogênio se forma pela ação de ácidos como o clorídrico ou o ácido sulfúrico em contato com metais como zinco e o ferro. Ele também fez explodir misturas deste gás em contato com o ar com faíscas elétricas (1784), e encontrou um produto que parecia “água pura”. Mais tarde Antoine Lavoisier explicou os resultados de Cavendish, e deu ao gás o nome de “hidrogênio”, proveniente do grego “formar água”. Esta decomposição da água nos seus componentes fez cair a ideia, já há algum longo tempo estabelecida de que a água seria apenas formada por um elemento (SANTOS e SANTOS, 2015).

Considerado o quarto elemento de maior quantidade no planeta Terra e o mais comum no universo. Normalmente, encontra-se em forma de moléculas, estando associado a outros elementos químicos, por exemplo H_2O (água) (BEZERRA, 2021). Em sua formulação possui um único elétron, um único próton e nenhum nêutron na sua forma estável, sendo o elemento químico mais leve. Podendo se tornar um cátion (tendo uma carga positiva) ou um ânion, conhecido como hidreto (tendo uma carga negativa), nos compostos iônicos. Possui fórmula molecular contendo dois átomos de hidrogênio ligados por uma ligação covalente simples, ou seja H_2 , tendo característica de um gás diatômico, inflamável, incolor, inodoro e insolúvel em água. Possui número atômico igual a 1, tendo massa atômica aproximada de 1,007825032u (FEITOSA, 2019).

O hidrogênio (H_2) além de ser o elemento mais abundante do universo ele pode ser a chave para 'descarbonizar' o planeta, possuindo três vezes mais energia do que a gasolina (SMINK, 2021). Apesar disso, sua obtenção só pode ser feita a partir de processos químicos que envolvem outros elementos para separação de moléculas. Atualmente, esses procedimentos são realizados por meio de combustíveis fósseis, resultando no chamado hidrogênio cinza, cujo nome se dá por conta das emissões realizadas no processo de obtenção. O que diferencia o hidrogênio cinza e o hidrogênio verde é, portanto, o processo pelo qual o produto é obtido. Neste caso, os combustíveis fósseis são substituídos pelo uso de fontes renováveis, gerando uma produção energética mais sustentável (ALVARENGA, 2021).

Na terra não existe o hidrogênio livre, estando sempre associado a outros elementos e para ser obtido “puro” é necessário gastar energia na dissociação de uma fonte primária. Sendo assim, o hidrogênio não é uma fonte primária de energia, mas sim, uma fonte intermediária, por isso não deve ser referido como uma fonte energética, pois é apenas um vector energético, isto é, uma moeda de troca. A escolha do melhor método de produção do hidrogênio depende da quantidade que queremos produzir e do seu grau de pureza; o hidrogênio tem a mais alta energia por unidade de peso comparativamente com qualquer combustível, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais leve e não tem os pesados átomos do carbono; é por esta razão que o hidrogênio tem sido usado intensamente nos programas espaciais onde o peso é crucial. Especificamente a quantidade de energia libertada durante a reação do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes do poder de combustão de um hidrocarboneto (gasolina, gásóleo, metano, propano, etc), podendo ser observado na tabela 1 (SANTOS; SANTOS, 2015).

COMBUSTÍVEL	VALOR DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (A 25°C E 1atm)	VALOR DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (A 25°C E 1atm)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Tabela 1 – Poder calorífico de diferentes combustíveis

Pode-se observar na Tabela 1 o quanto o hidrogênio é mais eficaz que os demais combustíveis, liberando uma quantidade considerável de energia por unidade de massa. Sendo assim, o veículo movimentado por H₂ tem um melhor desenvolvimento e melhores resultados, além de ser sustentável. Quando comparamos o calor liberado na combustão do hidrogênio com a combustão da gasolina, por exemplo, o do H₂ é três vezes maior, além de sua combustão não emitir gases de efeito estufa. elemento mais leve e não tem os pesados átomos do carbono; é por esta razão que o hidrogênio tem sido

Há muitas formas de produzir hidrogênio e dependendo da tecnologia e da fonte de energia utilizada existirá diversos tipos de emissões, com diferentes inferências de custos e requisitos materiais. Um conjunto de cores foi adotado para simplificar a classificação dos métodos de produção de H₂, que está associada matéria-prima utilizada na sua produção, ao processo de produção em si e a existência de processos acoplados de captura, utilização e armazenamento de Carbono (CCUS) emitido, conforme demonstrado na Tabela 2 (BEZERRA, 2021). Porém, vale salientar que as definições contidas na tabela supracitada podem variar de acordo com o autor. É preferível que haja uma complementação entre as diversas cores cuja a composição dependa das fontes de matérias-primas disponíveis, além de ser viável economicamente e usual (EPE, 2022).

O hidrogênio pode apoiar a segurança energética de várias maneiras. Quando implantado ao lado de uma infraestrutura de eletricidade, essa eletricidade pode ser convertida em hidrogênio e vice-versa. Sendo convertido a partir de outros combustíveis, possibilita aos usuários finais serem menos dependentes de recursos de energia específicos e aumenta a resiliência do abastecimento de energia. A economia do hidrogênio é uma proposta de economia futura baseada no uso do hidrogênio como fonte de energia (OLIVEIRA, 2022).

COR	RESUMO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ²
Rosa	Fonte de energia nuclear
Turquesa	Pirólise de metano sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)

Tabela 2 - Classificação do hidrogênio em escala de cores segundo o processo de produção.

Notas: 1 – Dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha e antracito, este último possui mais de 86% de carbono; 2 – CCUS – Carbon Capture, Utilization and Storage; 3 – A hulha possui entre 69 e 86% de carbono; 4 – Entende-se pirólise de metano como pirólise de gás natural, visto que este é o principal componente do gás natural.

O hidrogênio de cores marrom e preto tem a mesma origem de produção que é o carvão mineral e ambos são realizados sem CCUS, o que os diferenciam é que o primeiro faz uso da hulha (possui entre 69-86% de carbono) e o segundo do antracito (possui 86% de carbono) (EPE, 2021).

Já os que tem a sua produção a partir do gás natural são: cinza e azul, sendo que no primeiro não há CCUS e no segundo acontece CCUS, permitindo a redução de emissões de CO₂ (OLIVEIRA, 2022). O hidrogênio verde, através de eletricidade que se origina de fontes de energia renováveis (solar, hidráulica, eólica, etc), é produzido por eletrólise da água (BEZERRA, 2021).

Hidrogênios produzidos por outros caminhos renováveis como reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica de biomassa tem sido tratado de “verde musgo” pela literatura. Quando o H₂ é gerado por energia nuclear, fonte nula em emissões de carbono, é considerado rosa. Tem ainda o hidrogênio natural ou geológico que é chamado de branco e o originado pelo craqueamento térmico do metano mencionado de turquesa (EPE, 2021).

Desta forma o hidrogênio sendo produzido a partir da eletricidade gerada por fontes de energia limpas e renováveis, denomina-se o hidrogênio verde que é considerado fundamental para o processo de descarbonização no setor industrial e para o cumprimento das metas do Acordo de Paris. Ao longo dos próximos anos, o objetivo é trocar o hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis pelo hidrogênio verde, que não emite carbono (FIEP, 2022).

3.2 Biogás

O biogás é um produto composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), associado a vestígios de outros gases como sulfeto de hidrogênio (H₂S), amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e água (H₂O). Podemos observar na tabela 4 a composição química típica do biogás (LAU et al, 2011).

Considerado uma mistura gasosa proveniente da decomposição da matéria orgânica, o biogás tem sua composição formada por metano e dióxido de carbono. Atualmente o biogás tem sido utilizado nos processos de cogeração de energia, através da sua queima. Uma alternativa para agregar valor ao biogás é a sua reforma a seco, processo catalítico e endotérmico no qual o produto é o gás de síntese, uma mistura gasosa composta por hidrogênio (H₂), que possui um alto poder calorífico, e o monóxido de carbono (CO). O gás de síntese pode ser obtido a partir de matérias primas ricas em hidrocarbonetos como carvão e gás natural, ou pela rota da biomassa, como é o caso do biogás (ALVES et al., 2013).

O biogás é um produto composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), associado a vestígios de outros gases como sulfeto de hidrogênio (H₂S), amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e água (H₂O). Podemos observar na tabela 2 a composição química típica do biogás (LAU et al, 2011).

Embora a biodigestão e o processo de produção de biogás sejam conhecidos e praticados há mais de um século, principalmente em pequena escala na China e na Índia, foram nas últimas décadas que ele ganhou presença na matriz de diversos países, principalmente nos desenvolvidos onde a tecnologia já está mais desenvolvida. Isso se deve alguns fatores como, ao amplo processo de aprendizado através de pesquisa, prática, inovações em tecnologias, sistemas e participação governamental suportados por estes países. Mas, os principais fatores pelos quais a biodigestão foi incentivada são: o potencial de redução das emissões de GEE e a diversificação da matriz energética renovável (DURÃO, 2017).

O desenvolvimento da solução de produção passa três etapas de planejamento, iniciando pelo mapeamento das quantidades potenciais de biomassa, planejamento do processo de produção de biocombustível, que envolve a seleção de tecnologia, e a previsão da demanda pelo combustível (TSVETKOVA; GUSTAFSSON, 2012).

Primeiramente é caracterizada pelos substratos que podem ser obtidos a partir de diferentes setores ou da cooperação entre unidades produtoras para assim permitir escala e viabilidade técnico-financeira para implantação de plantas de biogás. Mais importante é que geralmente quando uma cooperação deste tipo ocorre, pode ser constituída uma interação entre sistemas sociotécnicos que pode resultar em um aprimoramento do alinhamento entre eles (GEELS; RAVEN, 2007).

Podendo ser usado como combustível para geração de energia por meio de sistemas combinados de calor e energia, do inglês combined heat and power (CHP) systems. A maior parte do biogás produzido no mundo é usada para geração de calor, vapor e/ou eletricidade por tecnologias de CHP baseadas na combustão de biogás, e que através da reforma do biogás para a produção de gás de síntese, mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), ou H₂ para geração de energia elétrica em células a combustível (REN 21, 2017).

Para o uso eficiente do biogás é necessário efetuar uma purificação deste gás, removendo todos os compostos indesejados que são causadores de corrosão, desgaste mecânico dos equipamentos, e com a finalidade de aumentar a qualidade e o poder calorífico do gás (MONTE, 2010). Atualmente é possível encontrar tecnologias para a obtenção de biometano a partir do biogás, através do refino, o que possibilita seu uso nos processos de reforma com baixo teor de CO₂, como ocorre com o gás natural (ALVES et al., 2013).

Podendo ser usado para produzir eletricidade, calor ou combustível (biometano, hidrogênio verde). No entanto cada aplicabilidade tem suas características, por exemplo, para geração de calor ou iluminação em pequena quantidade não há grandes necessidades de purificação, já para usos mais intensivos por exemplo em motores a combustão interna, se faz necessário maior purificação para assegurar a vida útil do equipamento (BAXTER; WELLINGER; MURPHY, 2013).

3.3 Cadeia do Hidrogênio

A produção global de hidrogênio atualmente é dominada pelo uso de combustíveis fósseis. O hidrogênio eletrolítico (isto é, hidrogênio produzido a partir de água e eletricidade) desempenha apenas um papel menor – embora tenha sido uma importante fonte de hidrogênio industrial nas décadas de 1920 a 1960, usando eletricidade gerada a partir de hidrelétrica, antes de ser substituída pelo gás natural. Com custos decrescentes para energia renovável (em particular solar fotovoltaico e eólico), o interesse está crescendo na eletrólise da água para a produção de hidrogênio e sua conversão em combustíveis à base de hidrogênio ou matérias-primas, como hidrocarbonetos sintéticos e amônia, que são mais compatíveis que hidrogênio com a infraestrutura existente (IEA, 2019). Na figura 3, são apresentadas as diferentes matérias-primas que podem ser utilizadas para produção de hidrogênio.

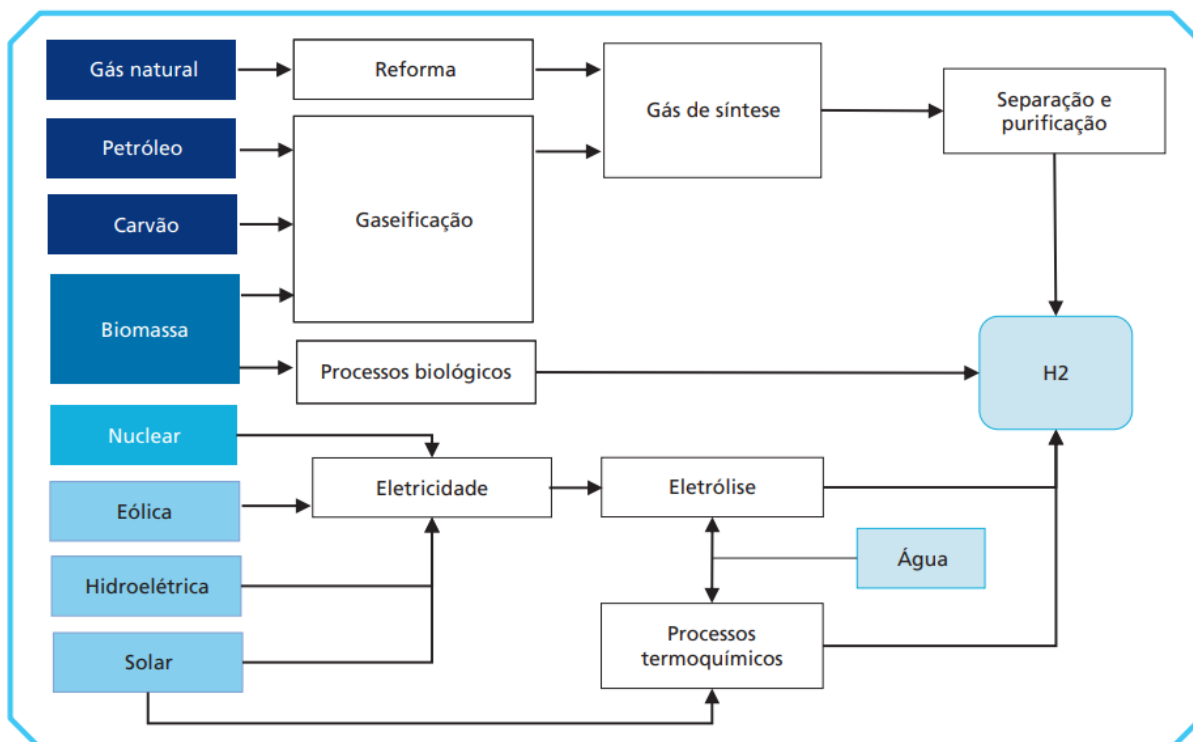


Figura 3 – Matérias-primas para produção do hidrogênio

Em 2019, a IEA (2019) identificou que cerca de 70 Mt de hidrogênio dedicado foram produzidos, sendo 76% de gás natural e quase todo o restante (23%) de carvão, tendo como consequência emissões anuais de CO₂ correspondentes a países como a Indonésia e do Reino Unido combinados. A eletrólise responde por 2% da produção global de hidrogênio, mas há um escopo significativo para a eletrólise fornecer mais hidrogênio com baixo teor de carbono.

A certificação de hidrogênio de baixo teor de carbono busca encorajar inovações futuras, sendo compatível com mercados de importação. Como uma região com a ambição de se tornar produtor de hidrogênio de baixo carbono, a América Latina deve participar ativamente de fóruns e iniciativas internacionais desde o início, dando à região a oportunidade para participar na formação dos futuros mercados de hidrogênio (IEA, 2021).

O hidrogênio produzido a partir do gás natural é considerado um hidrogênio cinza, pois há emissão de CO₂ no seu processo de produção. O hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com CCUS utilizam tecnologias de redução de emissões que podem ser aplicadas em todo o sistema de energia. As tecnologias CCUS envolvem a captura de CO₂, a combustão de combustível ou em processos industriais, o transporte do CO₂ por navio ou oleoduto e seu uso como um recurso para criar produtos ou serviços valiosos. Há ainda o armazenamento permanente em formações geológicas no subsolo (IEA, 2019).

O processamento complexo de produção de biomassa geralmente é mais caro para a produção de hidrogênio com baixo teor de carbono do que a eletrólise solar ou eólica. O potencial de produção de hidrogênio à base de biomassa em grande escala também é limitado pela disponibilidade de biomassa. Entretanto, o potencial da biomassa é complementar ao potencial das energias solar e eólica, predominantemente nas regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, onde a indústria já está estabelecida e madura, com maior potencial para etanol, biogás, glicerina e resíduos biológicos, com a possibilidade de utilizar o etanol para transportar o hidrogênio (OLIVEIRA, 2022).

O hidrogênio como combustível é visto como peça importante para o futuro neutro em carbono. Mas sua transformação de gás em combustível demanda uma grande quantidade de energia. Portanto, é importante a fonte dessa energia para que o produto final seja o chamado hidrogênio verde (ENGIE, 2020).

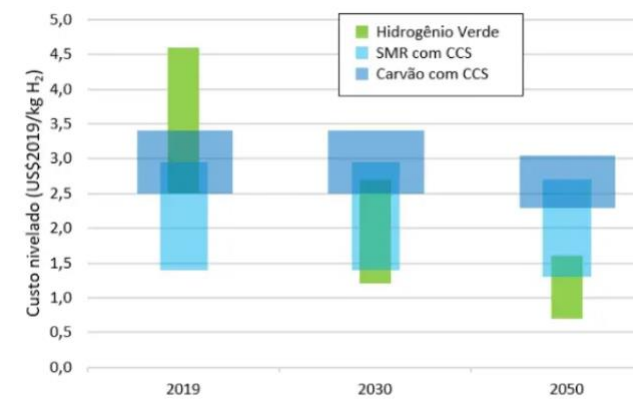


Figura 4 – Projeções de custo

Segundo um estudo realizado no ano de 2020 e recuperado pela EPE (2021), os custos do hidrogênio verde diminuirão 60% até 2030, sendo que a equivalência do preço entre os hidrogênios verde e cinza pode ocorrer entre 2028 e 2034, o que confirma sua importância e a necessidade de ações que o tornem cada vez mais competitivo após análise da figura 4 apresentando projeções até 2050. Quando seu potencial for equiparado ao azul e ao cinza, não apenas será uma solução para a emissão de gases de efeito estufa, mas também permitirá o desenvolvimento econômico e o aumento de empregos (PILGER, 2022).

Segundo Oliveira (2022) o hidrogênio como vetor de energia é capaz de armazenar e fornecer grandes quantidades de energia. As principais aplicações do hidrogênio na atualidade se concentram na produção de amônia, na produção de metanol e seu uso em refinarias, siderurgia, indústria de alimentos, semicondutores e aplicações energéticas. A demanda global por hidrogênio puro (H₂) deve crescer 4% em 2021, alcançando 73,8 milhões de toneladas.

A demanda global por hidrogênio cresceu mais de três vezes desde 1975 e continua a aumentar – quase inteiramente fornecida por combustíveis fósseis, com 6% do gás natural global e 2% do carvão global indo para a produção de hidrogênio. Como consequência, a produção de hidrogênio é responsável por emissões de CO₂, aproximadamente 830 milhões de toneladas por ano, o equivalente às emissões de CO₂ do Reino Unido e da Indonésia juntos (IEA, 2019).

4. CONCLUSÃO

O objetivo proposto neste trabalho foi atingido, de acordo com a revisão estruturada de literatura, foi possível identificar a importância da obtenção do hidrogênio verde através do biogás, além de poder propiciar novos modelos de negócios e gerar resultados econômicos.

A produção do hidrogênio verde possui muitos desafios, devido não haver um padrão para a fabricação, há dificuldades em criar procedimentos a ser reproduzido pela indústria, o que se torna fundamental os estudos em escala piloto e elaboração de protocolos de auditoria de processo.

A prospecção da redução de custos ao longo do tempo demonstra os valores agregados, o seu baixo impacto ambiental somando ao fato da redução da emissão de gases do efeito estufa.

Desse modo, a discussão em torno de buscas de redução no valor da obtenção do hidrogênio verde é cada vez mais necessária, devido a iminente redução de emissão de gases do efeito estufa. A busca por um aumento na produção de forma sustentável é essencial, já que muitos dos recursos e matérias primas são finitos.

REFERÊNCIAS

- Alvarenga, Paulo. O Hidrogênio Verde e a transição para uma economia de baixo carbono. Revista Brasil Alemanha, outubro 2021. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/d9/97/d9973c83-a742-4039-9e56-3e1c5dcba795/revistabrasilalemanha.pdf. Acesso em: 05 fev 2023.
- Alves, H. J; et al. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. . Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. , v. 38. 5215–5225 p, 2013.
- BAXTER, David; WELLINGER, Arthur; MURPHY, Jerry. . The biogas handbook: science, production and applications, [S.l.]: Woodhead. 512 p, 2013. ISBN 978-0-85709-498-8.
- Bezerra, Francisco Diniz. Hidrogênio Verde: Nasce um gigante no setor de energia. Caderno setorial ETENE, dezembro 2021. Disponível em: <https://cultura.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2022.
- Bree, Bas van; Vergong, Geert; Kramer, Gert Jan. A multi-level perspective on the introduction of hydrogen and battery-electric vehicles. Technological Forecasting and Social Change, Elsevier BV, v. 77, n. 4, maio 2010. 529–540.
- Carvalho, M. M.; Fleury, A.; Lopes, A. P. An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. Technological Forecasting and Social Change, v. 80, n. 7, p. 1418-1437, 2013/09/01/2013.
- Dahunsi, S.O.; Oranusi, S.; Efeovbokhan, V.E. Cleaner energy for cleaner production: Modeling and optimization of biogas generation from Carica papayas (Pawpaw) fruit peels. J. Environ. Manage, v. 156, p. 19-29, 2017.
- Durão, J. V. Transição para o uso do biogás no Brasil: análise baseada na perspectiva multinível. Rio de Janeiro, 2017 Tese (Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ENGIE. Saiba como o hidrogênio se transforma em combustível. Além da Energia. 2020. Disponível em: https://www.alemdaenergia.engie.com.br/saiba-como-o-hidrogenio-se-transforma-em-combustivel/?gclid=Cj0KCQjwpPKiBhDvARIsACn-gzBc5nPmxjwLPB4-2DMN_VUuK7z-fUCtdwBfeuLf9qlOnPDMWuSRXkkaAnBoEALw_wcB. Acesso em: 10 mai. 2023.
- EPE. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Rio de Janeiro. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil), 2021.
- FIEP. Hidrogênio verde contra o carbono. Portal da Industria. 2022. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/hidrogenio-verde-contra-o-carbono/>. Acesso em: 21 mai. 2023.
- Hahn, H. et al. Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. Renew. Sust. Energ. Rev., v. 29, p. 383–393, 2014.
- Holm-Nielsen, J. B.; Seadi, T. AL; Oleskowicz-Popiel, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. Bioresource Technology, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 2009.

- IEA. Global EV Outlook 2019: ampliando a transição para a mobilidade elétrica. 2019a. Disponível em: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/content/464289/global-ev-outlook-2019-scaling-up-the-transition-to-electric-mobility/>. Acesso em: 21 out. 2022.
- IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The future of hydrogen. Paris, 2019b. Disponível em: <https://bit.ly/3OMZx0M>. Acesso em: 9 jan. 2023.
- IEA, Hidrogênio. Disponível em: IEA. Hidrogênio. 2020. Disponível online: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- Gonzalez-Garcia, S. et al. Environmental sustainability of bark valorisation into biofoam and syngas. *J. Clean. Prod.*, v. 125, p. 33-43, 2016.
- Lau CS, Tsolankis A, Wyszynski M. L. Biogas upgrade para syn-gas (H₂-CO) via reforma seca e oxidativa. *Int J Hydrogen Energy* 2011; 36:397e404.
- Miltner, M.; Makaruk, A.; Harasek, M. Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions. *J. Clean. Prod.*, v. 161, p. 1329-1337, 2017.
- Morioka, S. N.; Carvalho, M. M. A systematic literature review towards a conceptual framework for integrating sustainability performance into business. *Journal of Cleaner Production*, v. 136, p. 134-146, 2016/11/10/2016.
- Oliveira, Rosana Cavalcante. Panorama do Hidrogênio no Brasil. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, ago 2022.
- ONU. 17 objetivos para transformar nosso mundo. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>.
- Pilger, Leticia. Um guia para as cores do hidrogênio. *Ecotx - Energy Data*. 2022. Disponível em: <https://www.ecotx.com.br/um-guia-para-as-cores-do-hidrogenio/>. Acesso em: 19 mai. 2023.
- Santos, F. M. S.; Santos, F. A. C. M. . O Combustível “Hidrogênio”. *Revista Milenium*, n. 31, 2015.
- Smink, Veronica, Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do 'combustível do futuro', *BBC News Mundo*, 2021. Disponível em: <http://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>. Acesso em: 30/09/2022.
- Tsvetkova, A.; Gustafsson, M. Business models for industrial ecosystems: a modular approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 29-30. 246–254 p, 2012. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.017.
- Vaz, C. R.; Maldonado, M. U. Revisão de literatura estruturada: proposta do modelo SYSMAP (Scientometric and sYStematic yielding Mapping Process). In edição: C.R.Vaz; M.Uriona Maldonado. [S.I.]: Aplicações de Bibliometria e Análise de Conteúdo em casos de Engenharia de Produção, 2017. Cap.2, p. 21-42.
- Viana, M. B.; Tavares, W. M.; Lima, P. C. R. Sustentabilidade e as Principais Fontes de Energia. Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, Brasília, 2015. Disponível em: http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notastecnicas/areas-da-conle/tema14/sustentabilidade-e-as-fontes-de-energia_variosautores_politicas-setoriais. Acesso em: 02/08/2022.