

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE DE ÁGUA UTILIZANDO ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA REVISÃO

Michel Klaime Filho (UEPG) E-mail: klaime@gmail.com
Prof.^a Dra. Giovana Kátie Wiecheteck (UEPG) E-mail: giovana@uepg.br

Resumo: A produção de hidrogênio por eletrólise de água utilizando águas residuárias como fonte de matéria-prima é uma alternativa promissora para a produção de energia limpa e renovável. Além de contribuir para a geração de energia limpa, essa abordagem também pode ajudar no tratamento e reaproveitamento de águas residuárias, o que é essencial para a conservação dos recursos hídricos e a preservação do meio ambiente. No entanto, ainda existem desafios a serem enfrentados, como a eficiência energética e o custo do processo. Para avançar na produção de hidrogênio por eletrólise de água utilizando águas residuárias como fonte de matéria-prima, são necessárias pesquisas futuras em diversas áreas. A colaboração entre instituições acadêmicas, governos e indústrias é fundamental para o avanço dessa tecnologia promissora e contribuir significativamente para a transição para uma economia mais sustentável e com menor impacto ambiental. A avaliação ecológica e econômica são complementares e fornecem informações cruciais para a tomada de decisões sobre a viabilidade da produção de hidrogênio por eletrólise de água utilizando águas residuárias. A análise conjunta desses aspectos permite identificar os benefícios e desafios da tecnologia, bem como suas potencialidades como uma alternativa sustentável para a produção de hidrogênio.

Palavras-chave: hidrogênio, eletrólise, águas residuárias, sustentabilidade, energia limpa.

PRODUCTION OF HYDROGEN BY WATER ELECTROLYSIS USING WASTEWATER AS A RAW MATERIAL: A SUSTAINABLE APPROACH

Abstract: The production of hydrogen by water electrolysis using wastewater as a raw material is a promising alternative for the production of clean and renewable energy. In addition to contributing to the generation of clean energy, this approach can also help in the treatment and reuse of wastewater, which is essential for the conservation of water resources and the preservation of the environment. However, there are still challenges to be faced, such as energy efficiency and process cost. To advance in the production of hydrogen by water electrolysis using wastewater as a raw material, future research is needed in several areas. Collaboration between academic institutions, governments, and industries is critical to the advancement of this promising technology and contributes significantly to the transition to a more sustainable economy with less environmental impact. Ecological and economic evaluations are complementary and provide crucial information for decision-making on the feasibility of hydrogen production by water electrolysis using wastewater. The joint analysis of these aspects allows identifying the benefits and challenges of the technology, as well as its potential as a sustainable alternative for hydrogen production.

Keywords: hydrogen, electrolysis, wastewater, sustainability, clean energy.

1. Introdução

A produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água é uma área de pesquisa em constante evolução devido a sua importância como fonte de energia limpa e renovável (CHEN et al., 2020; SILVA, 2011; GOMES, 2022). Ultimamente, a principal fonte de hidrogênio é proveniente de fontes fósseis (ROUBAUD et al., 2018). No entanto, a produção de hidrogênio a partir de águas residuárias é uma alternativa interessante, pois não só contribui para a obtenção de energia limpa, mas também para o tratamento dessas águas (JU et al., 2018; GIDDEY et al., 2014).

A eletrólise da água é um método promissor para a produção de hidrogênio, pois utiliza água como matéria-prima e não emite gases de efeito estufa. No entanto, esse processo ainda enfrenta desafios em relação à eficiência e ao custo. Uma das maneiras de superar esses desafios é utilizar águas residuárias como fonte de matéria-prima para a eletrólise da água (). Essa abordagem pode tornar o processo mais sustentável, reduzir o impacto ambiental dos efluentes e, ao mesmo tempo, produzir hidrogênio de forma mais econômica (JU et al., 2018; GIDDEY et al., 2014; CHEN et al., 2020).

A utilização de águas residuárias como recurso para a produção de hidrogênio por eletrólise da água tem sido amplamente estudada (SHARMILA et al., 2020; CHEN et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2015; ROQUE et al., 2021). Diferentes métodos e materiais têm sido avaliados para melhorar a eficiência do processo e maximizar a produção de hidrogênio (GOMES, 2022; SHARMILA et al., 2020; BOLT et al., 2020). Essa abordagem não só contribui para a geração de energia limpa, mas também para o tratamento e reaproveitamento de águas residuárias, o que é essencial para a conservação dos recursos hídricos e a preservação do meio ambiente (GOMES, 2022; PAULA et al., 2016; JESUS et al., 2020).

A utilização de águas residuárias como fonte de água para a eletrólise da água tem o potencial de impulsionar o desenvolvimento de uma indústria de hidrogênio verde, fornecendo uma alternativa viável e sustentável para a produção de energia limpa e renovável (PAULA et al., 2016; PEDROZA et al., 2021). Além disso, essa abordagem pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição energética global (Ferreira, 2023; PENTEADO et al., 2012).

Este artigo de revisão tem como objetivo apresentar os principais avanços na produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias como fonte de matéria-prima. Serão discutidos os desafios enfrentados atualmente, como a eficiência energética e o custo do processo, bem como as oportunidades oferecidas por essa abordagem sustentável e econômica.

2. Processos e Mecanismos de Eletrólise

A eletrólise da água é um processo eletroquímico que envolve a decomposição da água em hidrogênio e oxigênio por meio da passagem de corrente elétrica através de um eletrólito (SILVA, 2011; ROUBAUD et al., 2018; BOLT et al., 2020; TORQUATO et al., 2022). O processo ocorre em uma célula eletrolítica, que é composta por dois eletrodos (ânodo e cátodo) e um eletrólito (GOMES, 2022; PAIVA et al., 2016). A eletricidade é aplicada aos eletrodos, causando a oxidação da água no ânodo e a redução da água no cátodo, resultando na produção de hidrogênio e oxigênio (SILVA, 2011; ADAMES et al., 2021; MARQUES et al., 2017).

Existem diferentes tipos de células eletrolíticas utilizadas na eletrólise da água, como células de membrana, células de troca iônica e células de eletrólise alcalina (JU et al., 2018; GOMES, 2022). Cada tecnologia utiliza diferentes materiais e condições de operação para produzir hidrogênio e oxigênio (JU et al., 2018). A eletrólise da água pode ser realizada em diferentes condições, como temperatura, pressão e pH, e a eficiência do processo depende dessas condições (CHEN et al., 2020; LAMEIRAS, 2019).

O mecanismo da eletrólise da água é complexo e envolve reações eletroquímicas que ocorrem nos eletrodos e na solução eletrolítica (SHARMILA et al., 2020; GIDDEY et al., 2014). Na primeira etapa do processo, ocorre a oxidação da água no ânodo,

liberando oxigênio e prótons (H^+) (SILVA, 2011; CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2022). Na segunda etapa, os prótons são reduzidos no cátodo, produzindo hidrogênio (SILVA, 2011; MOURA et al., 2012). A reação global é representada pela equação: $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$.

A qualidade da água utilizada na eletrólise da água é essencial para garantir a eficiência do processo (GIDDEDY et al., 2014; TORQUATO et al., 2022). Algumas tecnologias, como a eletrólise alcalina, requerem água de alta qualidade para garantir a eficiência do processo (ADAMES et al., 2021).

A eletrólise da água também pode ser combinada com outras tecnologias, como a fotocatalise heterogênea, para aumentar a eficiência da produção de hidrogênio (MARQUES et al., 2017).

3. Desafios no Tratamento de Águas Residuárias

O tratamento de águas residuárias é um desafio importante para a produção de hidrogênio por eletrólise da água. As águas residuárias contêm uma grande variedade de contaminantes, incluindo matéria orgânica, nutrientes, metais pesados e compostos orgânicos persistentes (ROUBAUD et al., 2018). O tratamento eficiente de águas residuárias é essencial para garantir a eficiência e a sustentabilidade da produção de hidrogênio por eletrólise da água (JU et al., 2018).

Um dos principais desafios no tratamento de águas residuárias é a presença de contaminantes que podem afetar a eficiência da eletrólise e a vida útil dos eletrodos. A concentração de contaminantes pode variar de acordo com a fonte de água residuária, o que também pode afetar a eficiência da produção de hidrogênio. Além disso, a presença de compostos orgânicos pode ser uma fonte de carbono para a produção de hidrogênio, mas também pode causar problemas de corrosão nos eletrodos (JU et al., 2018; Gomes, 2022).

Outro desafio é a remoção de contaminantes e nutrientes presentes nas águas residuárias. O processo de eletrólise pode ser afetado pela presença de sólidos suspensos, matéria orgânica, nutrientes e metais pesados nas águas residuárias. Esses contaminantes podem afetar a eficiência da eletrólise e a qualidade do hidrogênio produzido (GIDDEDY et al., 2014; TORQUATO et al., 2022).

A variação das características das águas residuárias ao longo do tempo pode afetar a estabilidade do processo de eletrólise (SHARMILA et al., 2020; TENHUMBERG & BÜKER, 2020). Além disso, a presença de compostos inibidores pode afetar a eficiência da eletrólise (ROQUE et al., 2021).

O uso de águas residuárias na eletrólise da água também pode gerar subprodutos indesejados durante o processo. A presença de contaminantes pode levar à formação de subprodutos indesejados durante a eletrólise, o que pode afetar a eficiência da produção de hidrogênio (CHEN et al., 2020; PEDROZA et al., 2016).

Além dos desafios relacionados à qualidade da água, o tratamento de águas residuárias pode gerar grandes quantidades de lodo, que precisa ser tratado e disposto adequadamente (GOMES, 2022). Essa questão ambiental e econômico deve ser considerado na busca por soluções sustentáveis para a produção de hidrogênio a partir de águas residuárias (PEDROZA et al., 2016).

Em conclusão, o tratamento de águas residuárias apresenta diversos desafios que afetam

a produção de hidrogênio por eletrólise da água. A presença de contaminantes, a variação na composição da água residuária, a formação de subprodutos indesejados e a geração de lodo são alguns dos aspectos que devem ser abordados para garantir a eficiência e a sustentabilidade do processo de eletrólise utilizando águas residuárias.

4. Integração da Eletrólise no Tratamento de Águas Residuárias

A integração da eletrólise da água no tratamento de águas residuárias pode ser realizada de diferentes maneiras, oferecendo oportunidades para tornar o processo mais sustentável e econômico. Diversos estudos apontam para os benefícios dessa abordagem, explorando suas potenciais aplicações e vantagens. Neste capítulo, são discutidos algumas dessas abordagens e suas implicações no tratamento de águas residuárias e produção de hidrogênio.

- a) Utilização de células de eletrólise em série com reatores anaeróbios: pode ser uma estratégia interessante para o tratamento de águas residuárias. Um estudo realizado por Roubaud et al. (2018) demonstrou que a catalisação da reação de evolução de hidrogênio com bicarbonato pode diminuir a tensão necessária em células de eletrólise alimentadas com águas residuárias domésticas. Isso pode melhorar a eficiência do tratamento e reduzir os custos operacionais.
- b) Utilização de células de eletrólise em paralelo com reatores aeróbios: conforme sugerido por Ju et al. (2018), pode proporcionar uma forma sustentável de produção de hidrogênio, permitindo a remoção de nutrientes e a produção de biogás durante o tratamento de águas residuárias. Com essa estratégia, é possível aumentar a eficiência do tratamento de águas residuárias e reduzir a demanda por energia elétrica externa.
- c) Utilização de células de eletrólise em série com reatores aeróbios: de acordo com Chen et al. (2020) essa configuração permite a remoção de contaminantes e poluentes da água, ao mesmo tempo em que produz hidrogênio como subproduto, tornando o processo de tratamento mais eficiente e sustentável.
- d) Utilização de águas residuárias como fonte de água e nutrientes para a eletrólise: pode ser uma solução sustentável e eficaz, reduzindo a necessidade de água potável e fertilizantes. Giddey et al. (2014) enfatizam que a eletrólise da água pode ajudar a remover contaminantes e nutrientes das águas residuárias, tornando-as mais seguras para descarte ou reutilização.
- e) Eletrólise como pré-tratamento, tratamento biológico e pós-tratamento: a integração da eletrólise pode ser realizada em diferentes estágios do tratamento de águas residuárias, conforme evidenciado por Sharmila et al. (2020). Essa abordagem abrange desde o pré-tratamento até o tratamento biológico e pós-tratamento. A utilização de águas residuárias como recurso para a produção de hidrogênio pode reduzir os custos de tratamento e fornecer uma fonte de energia limpa e renovável.
- f) Eletrofloculação e utilização de membranas seletivas: Roque et al. (2021) ressaltam a importância da eletrofloculação como uma técnica que pode ser utilizada para remover os compostos inibidores presentes nas águas residuárias, aumentando a eficiência da eletrólise. Além disso, a utilização de membranas seletivas pode ajudar a separar os compostos indesejados e aumentar a eficiência da produção de hidrogênio.

A integração da eletrólise da água no tratamento de águas residuárias apresenta uma série de vantagens, como a redução dos custos de produção de hidrogênio, o aumento da eficiência do tratamento de águas residuárias e a utilização de fontes de água alternativas. Essas alternativas podem contribuir significativamente para a sustentabilidade do processo e para a produção de energia limpa e renovável. No entanto, é fundamental considerar as características específicas das águas residuárias e os objetivos do tratamento ao implementar essa integração.

5. Utilização de Águas Residuárias na Produção de Hidrogênio

A utilização de águas residuárias como novo recurso é uma abordagem sustentável. Através de tratamentos adequados, as águas residuárias podem ser transformadas em fontes valiosas de água para irrigação, recarga de aquíferos e outras aplicações, reduzindo a demanda por água potável e contribuindo para a conservação de recursos hídricos (ROUBAUD et al., 2018).

Além disso, a utilização de águas residuárias pode ser uma forma de aproveitamento e transformação em energia limpa e renovável, como a produção de hidrogênio por eletrólise da água (JU et al., 2018). Esse processo pode reduzir a demanda por água potável, diminuir a quantidade de águas residuárias descartadas no meio ambiente, produzir energia renovável (GIDDERY et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015).

O potencial da utilização de águas residuárias é uma tendência crescente em todo o mundo. As águas residuárias podem ser tratadas e reutilizadas para fins agrícolas, industriais e até mesmo para consumo humano (SHARMILA et al., 2020).

A produção de hidrogênio por eletrólise utilizando águas residuárias pode ser uma solução para a recuperação de recursos valiosos presentes, se tornando fonte de energia limpa e renovável (CHEN et al., 2020; BOLT et al., 2020).

Os benefícios da utilização de águas residuárias na produção de hidrogênio pode reduzir os custos de produção de hidrogênio e tornar a produção mais sustentável. A água tratada proveniente de águas residuárias pode ser utilizada na eletrólise da água, reduzindo a dependência de fontes de água potável para a produção de hidrogênio (TENHUMBERG et al., 2020; PAULA et al., 2016).

Além disso, o hidrogênio produzido a partir de águas residuárias pode ser utilizado em veículos movidos a células de combustível, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa. Isso torna a produção de hidrogênio uma alternativa interessante para a geração de energia em locais onde há escassez de água potável (MOURA et al., 2020; ROQUE et al., 2021).

As tecnologias e desafios da utilização de águas residuárias na produção de hidrogênio requer tecnologias adequadas. O tratamento das águas residuárias para remover contaminantes e poluentes é essencial para garantir a eficiência do processo de eletrólise da água (SILVA, 2011; PEDROZA et al., 2012).

Diversos estudos têm explorado a utilização de materiais eletrocatalisadores para reduzir a tensão da célula e melhorar a eficiência da eletrólise. Além disso, a utilização de biochar e ferro pode auxiliar na produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água (MARQUES et al., 2017; AMIKAM et al., 2020).

No entanto, é importante destacar que a utilização de águas residuárias na produção de hidrogênio requer tecnologias adequadas de tratamento e eletrocatalisadores eficientes

para garantir a viabilidade e eficiência do processo. A pesquisa nessa área é fundamental para impulsionar a adoção dessa tecnologia e enfrentar os desafios relacionados ao tratamento de águas residuárias e à produção sustentável de hidrogênio.

6. Otimização de Sistemas Piloto

A eletrólise da água com águas residuárias como fonte de matéria-prima oferece uma estratégia eficaz e sustentável para a produção de hidrogênio. Para superar desafios técnicos e econômicos, a otimização de sistemas piloto é crucial (AMIKAM et al., 2020). A seguir, são discutidos os principais pontos desta otimização, conforme destacado por estudos científicos.

Os sistemas piloto permitem testar diversas configurações e condições operacionais para avaliar a eficiência do processo (GIDDEY et al., 2014). A seleção apropriada de materiais dos eletrodos, por exemplo, pode aumentar a eficiência da eletrólise e melhorar a produção de hidrogênio, uma vez que promovem reações catalíticas que reduzem a tensão necessária para a eletrólise (OLIVEIRA et al., 2015; ROUBAUD et al., 2018).

A escolha do eletrólito usado no processo é outro aspecto crucial (CHEN et al., 2020). A composição do eletrólito, junto com o ajuste da corrente elétrica e o controle de temperatura e pH, podem afetar a eficiência da produção de hidrogênio (SILVA, 2011; PAULA; ILHA, 2016).

Avaliar a eficiência energética é fundamental para a otimização de sistemas piloto (JU et al., 2018). Fatores como a densidade da corrente, o tipo de eletrodo e de eletrólito podem influenciar a eficiência do processo, portanto, a otimização destes pode reduzir custos e tornar o processo mais competitivo (CGEE, 2022; MOURA et al., 2020).

Em algumas ocasiões, a seleção de microrganismos apropriados pode ser necessária, especialmente quando a eletrólise é combinada com processos microbiológicos (SHARMILA et al., 2020; ROUBAUD et al., 2018). Esta escolha pode impactar a taxa de produção de hidrogênio (PENTEADO et al., 2012).

Portanto, para alcançar uma produção eficiente e sustentável de hidrogênio, é preciso uma escolha criteriosa de materiais dos eletrodos, otimização das condições operacionais e uma avaliação rigorosa da eficiência energética (JESUS et al., 2020; SHARMILA et al., 2020; JU et al., 2018; CHEN et al., 2020).

Assim, a otimização de sistemas piloto é essencial para o sucesso do desenvolvimento e implementação de tecnologias para produção de hidrogênio através da eletrólise da água com águas residuárias (GOMES, 2022; MARQUES et al., 2017).

7. Influência de Fatores na Eficiência da Produção de Hidrogênio

A produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias como fonte de matéria-prima é uma abordagem promissora para a geração sustentável de hidrogênio. No entanto, a eficiência desse processo é influenciada por diversos fatores que devem ser cuidadosamente considerados para a otimização do processo e a maximização da produção de hidrogênio.

Dentre os principais fatores que afetam a eficiência da eletrólise da água estão a concentração de matéria orgânica, a temperatura, o pH, a carga hidráulica e a carga orgânica (ROUBAUD et al., 2018).

Além disso, a presença de compostos inibidores e poluentes, a composição da água residual, a densidade de corrente, a pressão e a escolha dos materiais dos eletrodos também são fatores que exercem influência sobre a eficiência da eletrólise. A concentração de íons na água, a corrente elétrica aplicada e a carga orgânica dos efluentes são outros fatores relevantes (SHARMILA et al., 2020; CHEN et al., 2020; PEDROZA et al., 2012).

Estudos têm demonstrado que a utilização de águas residuárias com alta condutividade elétrica pode aumentar a eficiência da eletrólise (MOURA et al., 2021). Por outro lado, a presença de contaminantes pode afetar negativamente a eficiência do processo, mas a escolha adequada dos materiais dos eletrodos pode minimizar esse efeito (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2022).

A temperatura e a pressão também têm um papel importante na eficiência da eletrólise da água. Temperaturas mais altas e pressões mais baixas geralmente resultam em maior eficiência (GOMES, 2022). A concentração do eletrólito e a corrente elétrica aplicada são fatores que influenciam a condutividade elétrica da solução e a taxa de produção de hidrogênio (SILVA, 2011; OTENIO et al., 2008).

A compreensão da influência desses fatores é essencial para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para a produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias como matéria-prima. É importante avaliar esses fatores em conjunto para otimizar o processo e aumentar a eficiência do processo de eletrólise da água, contribuindo para a geração eficiente e limpa de hidrogênio.

8. Avaliação Ecológica e Econômica

A produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias como fonte de matéria-prima é uma tecnologia em desenvolvimento, e a sua avaliação ecológica e econômica são fundamentais para determinar sua viabilidade como uma alternativa sustentável para a produção de hidrogênio. Nesse contexto, diversos estudos têm sido realizados para analisar o impacto ambiental e os custos associados a essa tecnologia.

A avaliação ecológica abrange a análise do ciclo de vida do processo, considerando desde a extração dos recursos até o descarte dos resíduos. Isso envolve a avaliação do impacto ambiental da produção de hidrogênio a partir de águas residuárias e a comparação com outras tecnologias de produção de energia. Segundo Roubaud et al. (2018), a utilização de águas residuárias como fonte de água pode reduzir os custos de produção, enquanto que a produção de energia limpa pode trazer benefícios ambientais.

Além disso, a avaliação ecológica também inclui a análise da pegada de carbono, a fim de quantificar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao processo. Nesse sentido, Gomes (2022) destaca a importância de avaliar os impactos ambientais, como a redução de emissões de gases de efeito estufa, para a produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias.

Já a avaliação econômica envolve a análise dos custos de produção de hidrogênio e a comparação com outras fontes de energia. De acordo com Chen et al. (2020), é importante avaliar o custo-benefício do processo e sua viabilidade financeira, considerando os custos de investimento, operação e manutenção, bem como os benefícios ambientais e econômicos gerados pelo processo.

Ju et al. (2018) ressaltam que a avaliação econômica também deve considerar a análise

de mercado para o hidrogênio produzido, visando identificar oportunidades comerciais e a competitividade da tecnologia em relação a outras fontes de energia.

Outros estudos, como o de Tenhumberg e Bükler (2020), destacam que a avaliação econômica deve levar em conta os custos de tratamento das águas residuárias, os custos de eletricidade e a eficiência do processo.

É importante ressaltar que a avaliação ecológica e econômica são complementares e fornecem informações para a tomada de decisões sobre a viabilidade da produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias. A análise conjunta desses aspectos permite identificar os benefícios e desafios da tecnologia, bem como suas potencialidades como uma alternativa sustentável para a produção de hidrogênio.

9. Conclusão e Principais Descobertas

A eletrólise da água, com o uso de águas residuárias como matéria-prima, surge como uma alternativa promissora para a geração de energia limpa e renovável. Essa abordagem pode não apenas aprimorar a eficiência do tratamento de águas residuárias, mas também reduzir os custos operacionais, tornando a produção de hidrogênio mais sustentável.

No entanto, é importante ressaltar que a tecnologia ainda enfrenta desafios significativos em termos de eficiência energética, custos, e influência de fatores como qualidade da água residuária e a presença de contaminantes requer considerações cuidadosas e abordagens específicas para não comprometer a eficiência do processo.

Essa integração também se destaca como uma solução potencial em locais com escassez de água potável. A reutilização de águas residuárias como fonte de eletrólitos pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis, diminuir a demanda por água potável e gerar receita adicional para as estações de tratamento.

Ainda assim, as principais descobertas indicam a necessidade de aprimoramentos e estudos mais aprofundados para alcançar maior eficiência e viabilidade econômica. A colaboração entre instituições acadêmicas, governos e indústrias é importante para o avanço dessa tecnologia. Desafios técnicos, operacionais e econômicos devem ser superados para tornar a eletrólise da água, utilizando águas residuárias, uma tecnologia viável e amplamente adotada.

10. Recomendações para Pesquisas Futuras

Para avançar na produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias como fonte de matéria-prima, são necessárias pesquisas futuras em diversas áreas. A seguir são apresentadas recomendações para trabalhos científicos com o objetivo de promover uma produção mais eficiente e sustentável de hidrogênio a partir de águas residuárias.

- a) **Otimização das Condições de Operação:** é fundamental otimizar as condições operacionais da eletrólise da água para maximizar a produção de hidrogênio. Isso inclui o estudo de parâmetros como temperatura, pH, densidade de corrente elétrica, tempo de reação, entre outros. A compreensão dos mecanismos de reação é essencial para ajustar os processos de acordo com as características das águas residuárias em questão.
- b) **Avaliação da Eficiência em Escala Industrial:** para viabilizar a produção em

larga escala, é necessário avaliar a eficiência do processo de eletrólise da água utilizando águas residuárias em sistemas piloto em larga escala. Isso permitirá verificar a viabilidade técnica e econômica do processo quando aplicado em condições industriais reais.

- c) **Impacto Ambiental e Estratégias de Minimização:** avaliar o impacto ambiental do processo de produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias é essencial. Estudos devem ser realizados para identificar possíveis impactos negativos e desenvolver estratégias para minimizá-los, tornando o processo mais sustentável e amigável ao meio ambiente.
- d) **Avaliação da Viabilidade Econômica:** é importante conduzir pesquisas econômicas detalhadas para avaliar a viabilidade financeira da produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias. Isso inclui a análise dos custos de investimento, operacionais e de manutenção, bem como a identificação de fontes de financiamento e incentivos governamentais.
- e) **Estudo de Diferentes Tipos de Águas Residuárias:** investigar a influência de diferentes tipos de águas residuárias na produção de hidrogênio para entender a diversidade de resíduos e suas características específicas. Isso permitirá adaptar o processo de eletrólise da água para diferentes origens de águas residuárias, maximizando a produção de hidrogênio em cada caso.
- f) **Desenvolvimento de Materiais de Eletrodo e Eletrólito:** a pesquisa deve focar na busca por materiais de eletrodo e eletrólito mais eficientes e duráveis. Materiais avançados podem aumentar a eficiência da eletrólise e reduzir a degradação dos eletrodos ao longo do tempo, contribuindo para a melhoria da tecnologia.
- g) **Integração com Sistemas de Tratamento de Águas Residuárias:** a pesquisa deve explorar a integração da eletrólise da água com sistemas de tratamento de águas residuárias existentes. Isso pode aumentar a eficiência global do processo e reduzir os custos operacionais, aproveitando sinergias entre as tecnologias.
- h) **Utilização de Hidrogênio Produzido:** estudar as possibilidades de utilização do hidrogênio produzido a partir de águas residuárias em diferentes setores para avaliar o potencial de aplicação comercial. Estudos podem ser realizados para verificar a viabilidade do uso do hidrogênio como vetor energético ou combustível em diversos contextos industriais e de transporte.
- i) **Avaliação de Impactos Sociais e Culturais:** além dos aspectos técnicos, é interessante avaliar os impactos sociais e culturais da produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias considerando a aceitação pública da tecnologia, o envolvimento das comunidades locais e a inclusão de diferentes atores no processo decisório.

O avanço na produção de hidrogênio por eletrólise da água utilizando águas residuárias como fonte de matéria-prima requer pesquisas contínuas em várias áreas. A otimização das condições de operação, a avaliação da eficiência em escala industrial, a análise do impacto ambiental e econômico, a utilização de diferentes tipos de águas residuárias e o desenvolvimento de materiais avançados para eletrodos e eletrólitos são algumas das recomendações para pesquisas futuras. A colaboração entre pesquisadores, empresas e governos é fundamental para o avanço e para a promoção de um futuro mais sustentável.

Referências

- ADAMES, Luan Vieira et al.** Produção de hidrogênio em reator anaeróbio de fluxo contínuo utilizando glicerol bruto oriundo da produção de biodiesel. *Química Nova*, v. 44, n. 4, p. 486-491, 2021.
- AMIKAM, Gidon; FRIDMAN-BISHOP, Noga; GENDEL, Youri.** Biochar-Assisted Iron-Mediated Water Electrolysis Process for Hydrogen Production. *ACS Omega*, [s.l.], v. 5, n. 50, p. 31908-31917, 2020.
- BOLT, Andre; DINÇER, Ibrahim; AGELIN-CHAAB, Martin.** Experimental study of hydrogen production process with aluminum and water. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s.l.], v. 45, n. 57, p. 30805-30814, 2020.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE).** Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis – Informe ISES. Primeira edição – Hidrogênio renovável. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2022. 45 p. il. ISBN 978-65-5775-043-8 (Digital). CDU - 662.769.2.
- CHEN, Cong et al.** Characteristics and anode reaction of organic wastewater-assisted coal electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s.l.], v. 45, n. 2, p. 1635-1644, 2020.
- DA SILVA, C. H. F.; CARVALHO, A. M.; TÔRRES, E. S.** Laboratório experimental para produção de hidrogênio e seu uso como vetor energético. Belo Horizonte: CEMIG, 2008. 8 p.
- Ferreira, Nicolau.** O Amanhecer Do Hidrogênio Verde Está a Ser Desenhado a Partir de Bruxelas. PÚBLICO, 15 Apr. 2023, www.publico.pt/2023/04/15/azul/reportagem/amanhecer-hidrogenio-verde-desenhado-partir-bruxelas-2045417. Accessed 15 Apr. 2023.
- GIDDEY, S.; KULKARNI, A.; BADWAL, S. P. S.** Low emission hydrogen generation through carbon assisted electrolysis. *Journal of Power Sources*, [s.l.], v. 196, n. 22, p. 9236-9241, 2014.
- GOMES, João.** Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio: o ressurgimento de uma tecnologia. *Revista de Ciência Elementar*, [s.l.], v. 10, n. 3, p. 1-6, jun. 2022.
- JESUS, Fernanda Lamede Ferreira de et al.** Águas residuárias para irrigação no Brasil: uma abordagem química, física e microbiológica. *Irriga, Botucatu*, v. 25, n. 3, p. 562-589, jul./set. 2020.
- JU, HyungKuk et al.** A comprehensive review of carbon and hydrocarbon assisted water electrolysis for hydrogen production. *Applied Energy*, [s.l.], v. 231, p. 502-533, 2018.
- LAMEIRAS, Fortunato Lobo.** O Hidrogênio como Vetor de Energia. Rio de Janeiro: Escola Superior de Guerra, 2019. 72 p.
- MARQUES, Fabielle C. et al.** Estratégias e materiais utilizados em fotocatalise heterogênea para geração de hidrogênio através da fotólise da água. *Química Nova*, São Paulo, v. 40, n. 5, p. 561-571, 2017.
- MOURA, Priscila Gonçalves et al.** Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. *Water reuse: a sustainable alternative for Brazil. Revista DAE*, São Paulo, v. 68, n. 231, p. 1-12, set./dez. 2020.
- OLIVEIRA, L.C.C.B.; PIGNATA, R.M.; DANTAS, S.C.** Corrosão alcalina do alumínio para produção de hidrogênio considerando diferentes geometrias, temperaturas e concentrações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: UFSC, 2015. p. 1-8.
- OTENIO, Marcelo Henrique et al.** Avaliação em escala laboratorial da utilização do processo eletrolítico no tratamento de águas. *Química Nova*, v. 31, n. 3, p. 508-513, 2008.
- PALHARES, D. D. F. et al.** Produção de hidrogênio por eletrólise da água e energia solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Fortaleza. Anais eletrônicos... COBEQ, 2016.
- PAULA, Heber Martins de; ILHA, Marina Sangoi de Oliveira.** Uso da Moringa oleifera no tratamento de águas residuárias de usinas de concreto: mapeamento sistemático. *Moringa oleifera use in concrete plants wastewater treatment: mapping study. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 50-60, 2016.
- PEDROZA, Eduardo; STURNIOLO, Alejandro; JOSÉ, Marcio.** Hidrogênio verde e o papel do reúso e da dessalinização: as oportunidades na América Latina no desafio global de água e energia. [S.l.]: [s.n.],

2022.

PENTEADO, Eduardo Delosso. Influência da origem e do pré-tratamento do inóculo na produção de hidrogênio a partir de águas residuárias em biorreatores anaeróbios. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

ROQUE, Milena Martins et al. Comparação dos eletrodos de ferro e alumínio para o tratamento de efluentes da lavagem de máquinas de terminal intermodal por eletrofloculação. *Revista Processando o Saber*, [s.l.], v. 13, p. 278-294, 2021.

ROUBAUD, E. et al. Catalysis of the hydrogen evolution reaction by hydrogen carbonate to decrease the voltage of microbial electrolysis cell fed with domestic wastewater. *Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France*, 2018.

SHARMILA, V. Godvin et al. A review on evaluation of applied pretreatment methods of wastewater towards sustainable H₂ generation: Energy efficiency analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s.l.], v. 44, n. 1, p. 46-63, 2020.

SILVA, Marco Antonio Oliveira da. Estudos eletroquímicos de eletrólise a membrana polimérica para produção de hidrogênio. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TENHUMBERG, Nils; BÜKER, Karsten. Ecological and Economic Evaluation of Hydrogen Production by Different Water Electrolysis Technologies. *Chemical Engineering & Technology*, [s.l.], v. 44, n. 1, p. 45-54, 2020.

TORQUATO, Lilian Danielle de Moura et al. Produção biológica de hidrogênio a partir de lodos de diferentes sistemas de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA AGROPECUÁRIA, AGRÍCOLA E AMBIENTAL (CBMAAA), 1., 2016, Jaboticabal. Anais eletrônicos... Jaboticabal: UNESP, 2016.