

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA
SOUZA**

**ESCOLA TÉCNICA DA CIDADE DE MAUÁ
ENSINO MÉDIO INTEGRADO AO TÉCNICO DE QUÍMICA**

Ana Beatriz Viana Esteves

Danielle Ayumi Tsumura

Julia Xavier da Silva

Pedro Santos Giungi Mendes

Vinicius Dias Rosa

**ESTUDOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO
HIDROGÊNIO VERDE**

Mauá – SP

2024

Ana Beatriz Viana Esteves
Danielle Ayumi Tsumura
Julia Xavier da Silva
Pedro Santos Giungi Mendes
Vinícius Dias Rosa

**ESTUDOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO
HIDROGÊNIO VERDE**

Desenvolvimento de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Química da ETEC de Mauá, orientados pelos professores Jeferson Eduardo e Camila Oliveira, como requisito parcial para obtenção do título de Técnico em Química

MAUÁ – SP
2024

RESUMO

Sintetizando os conceitos abordados no projeto, este estudo possibilitará uma análise embasada em experimentos práticos acerca da produção de hidrogênio. O gás será gerado com intuito de ser convertido em energia elétrica, por intermédio de uma célula combustível de hidrogênio. Será retratada a teoria de produção do gás, investigando e adaptando-a conforme os resultados obtidos, garantindo um procedimento de desenvolvimento científico que visa a observação e adaptação dos meios existentes de produção.

Palavras-chaves: hidrogênio; produção de hidrogênio; experimentos práticos; energia elétrica; célula a combustível de hidrogênio

ABSTRACT

Summarizing the concepts addressed in the project, this study will enable an analysis based on practical experiments regarding hydrogen production. The gas will be generated with the aim of being converted into electrical energy through a hydrogen fuel cell. The theory of gas production will be revisited, investigated, and adapted according to the results obtained, ensuring a scientific development procedure aimed at observing and adapting existing production methods.

Keywords: Hydrogen; hydrogen production; practical experiments; electrical energy; hydrogen fuel cell.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de eletrólise aquosa	14
Figura 2 – Corrosão dos eletrodos	26
Figura 3 - Experimento um	27
Figura 4 - Eletrólise do experimento um	27
Figura 5 - Eletrodos de papel alumínio	28
Figura 6 - Reator do experimento três	29
Figura 7 - Reator improvisado	30
Figura 8 - Reator quatro	31

SUMÁRIO

1.	8	
1.1.	Tema	8
1.2.	Justificativa	9
1.3.	Objetivo	9
1.4.	Hipótese	9
1.5.	Pergunta norteadora	10
2.	11	
2.1.	Gás Hidrogênio	11
2.1.1.	11	
2.2.	Hidrogênio Verde	12
2.3.	Hidróxido de sódio	12
2.4.	Eletrólise	13
2.4.1.	Oxirredução	14
2.4.2.	14	
2.5.	Eletrodo	15
2.5.1.	Eletrodo de Cobre	16
2.6.	Placa Solar	16
2.7.	Bateria	17
2.8.	Célula Combustível	17
3.	19	
4.	20	
4.1.	Primeiro experimento	20
4.2.	Segundo experimento	20
4.3.	Terceiro experimento	20
4.4.	Quarto experimento	21
4.5.	Quinto experimento	22
5.	23	
5.1.	Experimento 1	24
5.2.	Experimento 2	26
5.3.	Experimento 3	27

5.4.	Experimento 4	28
5.5.	Experimento 5	29
6.	30	
7.	31	

1. INTRODUÇÃO

1.1. Tema

Lara Richter (2023) assinala “-[...] o hidrogênio verde é aquele produzido a partir de energias renováveis como, por exemplo, através da energia solar ou eólica, sem produção de CO_2 [...]”. Por ser considerado um combustível sustentável, ou seja, sem emissões de gases poluentes na atmosfera. O gás hidrogênio pode ser empregado em diversas cadeias industriais, como no refino do petróleo, na produção de aço e fertilizantes, processamento de alimentos e nos transportes. (Capurso; et al, 2020; Zuben, et al, 2022).

Por ser considerado um combustível sustentável, ou seja, sem emissões de gases poluentes na atmosfera. O gás hidrogênio pode ser empregado em diversas cadeias industriais, como no refino do petróleo, na produção de aço e fertilizantes, processamento de alimentos e nos transportes. (Capurso; et al, 2020; Zuben, et al, 2022).

Além de combustível, o gás hidrogênio pode ser utilizado como instrumento de armazenamento de energia elétrica renovável (eólica e solar), capaz de ser transportado (no estado sólido, líquido, gasoso e/ou via produtos químicos) em longas distâncias, criando conexões entre oferta e demanda, e aumentando a flexibilidade do sistema energético. (Abdin, et al, 2020 apud Paiva 2022).

Especialistas dizem que até 2050, o hidrogênio verde pode ocupar um quarto de todo o mercado energético mundial, trazendo um grande potencial, impulsionando a transição energética. (KOVAČ; PARANOS; MARCIUŠ, 2021 *apud* LARA E RICHTER, 2023).

Zeng Zhang diz que;

A eletrólise da água representa apenas 4% da produção mundial de hidrogênio. Suas principais vantagens são a alta pureza do hidrogênio obtido, simplicidade do processo, produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia mitigando impactos ambientais, geração distribuída de energia incluindo localidades isoladas da rede de distribuição (ZENG; ZHANG, 2009 *apud* VIOLA 2015).

1.2. Justificativa

O estilo de vida em que a sociedade vive, apresenta demandas energéticas cada vez maiores ao decorrer dos anos. A Agência Internacional de Energia (AIE), através de um relatório publicado no final de 2019, aponta que, a crescente demanda mundial energética sofrerá um aumento entre 25% e 30% até o ano de 2040, ainda dependendo da queima de combustíveis fósseis, significando o aumento de dióxido de carbono (CO_2), agravando ainda mais as mudanças climáticas. (RODRIGO LORENSETTI 2023).

O dióxido de carbono (CO_2) é um dos grandes responsáveis pela poluição no efeito estufa, o alto consumo de dióxido de carbono leva a várias alterações climáticas, como a formação de chuvas ácidas, poluição no ar, desequilíbrio do efeito estufa e o aumento na temperatura da terra. (RODRIGO LORENSETTI 2023).

No entanto o hidrogênio verde (H_2V) no meio ambiente apresenta muitas vantagens, pois além de ser uma energia/fonte renovável, não emite nenhum tipo de gás poluente durante sua combustão. Segundo Daniela Mueller de Lara, Marc François Richter “[...] constata-se que o hidrogênio produzido de forma ambientalmente correta, permite reduzir significativamente as emissões de CO_2 [...]”.

1.3. Objetivo

O estudo tem como objetivo a análise dos conceitos envolvendo a produção de hidrogênio verde como meio de energia sustentável e a realização de experimentos práticos desenvolvendo diferentes métodos de produção do gás, visando a produtividade e a maior otimização possível deste recurso.

1.4. Hipótese

Os combustíveis fósseis são atualmente uma das principais fontes de energia, além de gerar diversos subprodutos bastante usufruídos pela sociedade. Estes combustíveis vêm sendo explorados há muitas décadas, a exploração do petróleo como forma de energia gera diversos impactos à saúde humana e ao meio ambiente, como poluição do ar atmosférico, mares e aumento do efeito estufa, contribuindo significativamente para o aquecimento global com a liberação de gases proveniente da queima desses combustíveis. Gases como o dióxido de carbono, metano e dióxido de enxofre. (Oliveira, Cruz, Ferreira, 2024). Diante do exposto, na atualidade nota-se

uma demanda crescente de fontes de energia renováveis, isto é, que possuam desde a obtenção, até seu fim um caráter não gradativo ao meio ambiente, utilizando recursos naturais abundantes como meio de obtenção energética. O artigo “Estudos de produção de energia a partir do gás hidrogênio” visa conceber uma perspectiva acerca da prática de produção do hidrogênio renovável, expondo as etapas para obtenção do gás e todo o processo de melhorias e adaptações do projeto, analisando se o hidrogênio verde pode vir a atender as demandas crescentes da humanidade e do planeta terra.

1.5. Pergunta norteadora

Como gerar energia a partir do gás hidrogênio?

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.4. Gás Hidrogênio

O gás hidrogênio (H_2) é um elemento formado por dois átomos de Hidrogênio (primeiro elemento da tabela periódica), compartilhando assim dois elétrons por uma ligação covalente. Essa partícula é abundante na superfície terrestre e está presente em praticamente em todas as coisas, sendo o elemento químico mais leve da tabela periódica. Em condições normais (20°C e 1 atm), esse gás não apresenta odor, é inflamável, incolor e insípido, sendo mais rarefeito que o próprio ar, com densidade de 0,0889 kg/m³, atingindo o estado líquido em uma temperatura de -253 °C. (JUNGES, 2019 apud NÓBREGA, 2022).

Sua descoberta foi de forma peculiar, Robert Boyle (1627–1691), ao realizar alguns experimentos, produziu gás hidrogênio, mas acabou confundindo-o com o ar comum. Anos mais tarde, o químico Henry Cavendish (1731–1810) foi pioneiro em desvendar a verdadeira natureza do hidrogênio, através de um experimento em que adicionava ácido a limalhas de metal. (WEST, 2014).

2.4.1. Gás Oxigênio

O gás oxigênio (O_2) é de extrema importância para a vida, o oxigênio é o terceiro elemento mais abundante no universo, compondo 21% da atmosfera terrestre, sendo a segunda substância química mais eletronegativa da tabela periódica. É incolor em forma de gás, mas em forma líquida apresenta cor azul. O elemento representa cerca de metade da massa da crosta terrestre, dois terços da massa do corpo humano e nove décimos da massa da água. A obtenção desse gás pode ser feita de duas maneiras: pela extração do ar liquefeito através de um processo denominado destilação fracionada e pela eletrólise da água ou através do aquecimento do clorato de potássio ($KClO_3$). (CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA-IV REGIÃO, 2022).

Sua descoberta é usualmente atribuída a C.W. Scheele e J. Priestley (em 1773/74), ainda que diversos outros pesquisadores anteriores, incluindo Leonardo da Vinci, tenha feito observações relevantes, porém sem isolar e caracterizar o gás. (CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA - IV REGIÃO, 2022).

2.5. Hidrogênio Verde

O hidrogênio verde é uma forma sustentável de produção de hidrogênio, que é considerado um combustível limpo e renovável. Sendo vantajoso em relação a sua capacidade de armazenamento de energia. (PORTAL DA INDÚSTRIA, [s.d]).

Segundo o Presidente da *International Association for Hydrogen Energy* (IAHE), T. Nejat Veziroglu, o hidrogênio verde não emite gases de efeito estufa durante sua produção e uso.

A produção de hidrogênio verde é feita através da eletrólise da água, utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica. Ao contrário do hidrogênio convencional, que é produzido a partir de combustíveis fósseis, como o gás natural. (VEZIROGLU T. Neja, 2011)

Em suma, ele tem diversas aplicações, sendo utilizado como combustível em veículos elétricos movidos a célula de combustível, como armazenamento de energia renovável, em processos industriais, como matéria-prima na produção de amônia, e até mesmo na geração de eletricidade em usinas termoelétricas. (CNN, Brasil, 2022)

No entanto, a produção em grande escala de hidrogênio verde ainda enfrenta desafios, como o alto custo da eletricidade renovável e a necessidade de infraestrutura adequada para o transporte, armazenamento e distribuição do hidrogênio. Apesar disso, o hidrogênio verde tem um grande potencial para desempenhar um papel importante na transição para uma matriz energética mais sustentável e livre de emissões de carbono. (Iberdrola, 2024)

2.6. Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio é uma típica base de Arrhenius, pois quando dissociado em água, libera íons hidroxila (OH^-). A soda cáustica é uma base forte com alto poder corrosivo, podendo causar graves queimaduras em contato com a pele. (Rev. Virtual Quim, 2012).

O uso de hidróxido de sódio ($NaOH$) é conveniente, ao invés de outras bases, sais ou ácidos, pois pode ser obtido com facilidade e cada um de seus íons troca apenas um elétron com os eletrodos, resultando em um cálculo que conduz diretamente à carga elementar. (Cad. Bras. Ens. Fís, 2009). Apesar da taxa de geração de hidrogênio ser influenciada pela concentração de $NaOH$, através de

pesquisas percebe-se um efeito de saturação para valores elevados, o que indica uma estagnação na taxa de produção para certas concentrações. (IEA, 2023).

O uso das soluções de $NaOH$ datam do século XVIII, porém o pioneirismo da fabricação industrial do hidróxido de sódio sólido comercial é atribuída ao processo LeBlanc (1853). O químico francês Nicolas LeBlanc (1742-1806) é o inventor do processo de fabricação da soda a partir do sal marinho. Sua invenção foi feita em decorrência de um concurso nacional patrocinado pela Academia Real das Ciências da França, em 1781. Nos dias atuais, o hidróxido de sódio é preparado majoritariamente por métodos eletrolíticos, usando-se solução aquosa de cloreto de sódio. (Rev. Virtual Quim, 2012).

2.7. Eletrólise

A eletrólise é um processo químico que ocorre de forma não espontânea envolvendo uma oxirredução, a partir de uma corrente elétrica contínua. (Rezende, 2021).

Este processo pode ser dividido em eletrólise ígnea onde, processa-se com base em um processo de fusão e eletrólise aquosa é a reação química de oxirredução ocasionando a dissociação da água (H_2O) produzindo assim gás hidrogênio (H_2) e gás oxigênio (O_2) como representada abaixo:

Equação 1- Dissociação da água

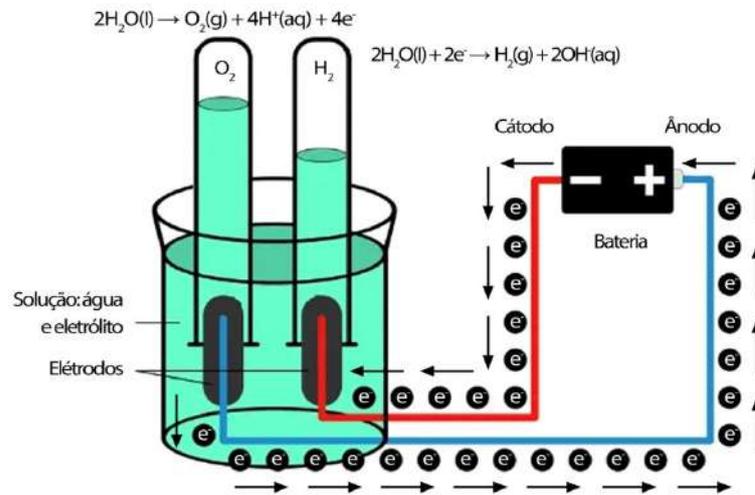


Fonte: LARA E RICHTER,2023

Segundo Brown,

[...] a eletrólise da água é uma reação química desencadeada a partir de uma fonte externa de energia o que a torna não espontânea, ocorrendo a partir de reações parciais que se realizam nos eletrodos – o anodo e o catodo – na presença de um eletrólito que se entende como um condutor de energia [...] (BROWN et al., 2005 apud VIOLA 2015).

A estrutura de uma eletrólise é composta de um eletrolisador que une os eletrodos que estão submersos em uma solução eletrolítica (solução com um eletrólito) conforme na imagem abaixo:

Figura 1 - Esquema de eletrólise aquosa

Fonte: GOMES, 2022

2.7.1. Oxirredução

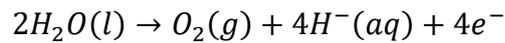
Uma reação eletroquímica é quando há uma passagem de corrente elétrica, seja ela com íons ou elétrons. A eletrólise é um processo eletroquímico havendo o procedimento de oxirredução que é descrito como o ganho ou perda de elétrons, denominado como oxidação e redução. (WOLYNEC, 2013 *apud* ARAUJO, 2021).

A oxidação é caracterizada pela perda de elétrons, vinculado ao aumento do número de oxidação (NOX), logo, o elemento que gera a oxidação é denominado de agente oxidante. Já na redução, terá um ganho de elétrons, logo o número de oxidação (NOX) diminui, o elemento que causa a redução é nomeado como agente redutor. (ATIKINS, 2012 *apud* ARAUJO, 2021).

2.7.2. Formação dos Gases

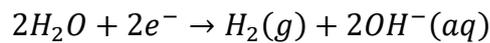
O processo de formação dos gases provém da dissociação da água através de uma eletrólise. Nesta reação, necessita-se de uma solução de ácido ou base com dois eletrodos submersos nesta solução, a corrente elétrica é transmitida para os eletrodos (ânodo e cátodo) e pelo eletrólito. (GOMES, 2022).

O ânodo em sua vez é o eletrodo positivo onde o Oxigênio oxida e representado na equação a seguir:

Equação 2 - Oxidação do Oxigênio

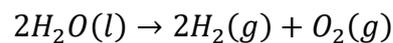
Fonte: GOMES, 2022.

O eletrodo negativo conhecido como catodo sofrerá a redução do Hidrogênio, como mostrado abaixo:

Equação 3 - Redução do Hidrogênio

Fonte: GOMES, 2022.

Desse modo, resultando na reação global:

Equação 4 – Equação global

Fonte: GOMES, 2022.

2.8. Eletrodo

O eletrodo é um condutor de corrente elétrica, ele permite que a corrente elétrica que está entrando e saindo, entre em contato com a substância ou com a solução, possibilitando que a eletrólise que está sendo realizada, aconteça. Na eletroquímica, o eletrodo executa um papel muito importante, sendo ele usado na eletrólise, galvanoplastia e em células combustíveis. Sua presença é notável no dia a dia: como nos carros (bateria do veículo, sistema de ar condicionado), bem como em tratamentos estéticos. (PEREIRA *et al*, 2012).

Na eletrólise vão existir dois tipos de eletrodo: o eletrodo convencional e o eletrodo poroso. O eletrodo convencional é um condutor metálico que permite a passagem de corrente elétrica, seja ele em meio líquido, sólido ou a vácuo. Já o eletrodo poroso, possui uma estrutura com poros como o grafite, que permite tanto a passagem de líquidos, quanto a passagem de gases. (PEREIRA *et al*, 2012).

Dependendo da eletrólise realizada, o tipo de eletrodo e sua estrutura pode se tornar uma grande influência para a reação. Dentre vários eletrodos, os mais utilizados são: eletrodo de cobre, eletrodo de platina, eletrodo de níquel, eletrodo de grafite, eletrodo de alumínio e entre outros. (PEREIRA *et al*, 2012).

2.8.1. Eletrodo de Cobre

A denominação cobre é de origem latina, *cuprum*. Embora não tenham determinado uma data exata em que o cobre começou a ser utilizado e popularizado, acredita-se que seu uso tenha começado há mais de 7000 anos. A aplicação do cobre marcou um avanço significativo para as civilizações antigas, que transitam da Idade da Pedra para a Idade do Bronze, que se iniciou a 3300 a.C. (RODRIGUES *et al*, 2012).

O cobre é um metal de transição altamente utilizado devido às suas propriedades físicas e químicas. Ele é um dos melhores condutores de corrente elétrica, além de possuir alta condutividade térmica e ductilidade, fazendo assim com que ele seja altamente empregado em fios, construções civis e cabos elétricos. (COUTINHO *et al.*, 2009)

O eletrodo de cobre é amplamente utilizado em processos eletroquímicos, como na eletrólise, galvanoplastia, células galvânicas, entre outros. O cobre é escolhido como eletrodo devido a sua condutividade elétrica e à sua estabilidade nas reações. Na eletrólise, o cobre pode ser tanto cátodo (eletrodo negativo), quanto ânodo (eletrodo positivo). Quando o eletrodo de cobre é usado como cátodo, ele recebe elétrons, fazendo com que os íons metálicos da solução sofram redução. Já no ânodo, o cobre acaba liberando íons Cu^{2+} , fazendo com que o eletrodo se oxide. (COUTINHO *et al.*, 2009)

2.9. Placa Solar

Energia solar é uma fonte renovável e limpa que converte a luz solar em energia elétrica. (TORSONI *et al*, 2019). Ela é uma energia bem conhecida, mas não é tão popularizada, pois os seus custos são muito altos para a produção dos seus materiais. Para gerar energia solar, é necessária a utilização de placas solares.

A placa solar é um equipamento que gera energia fotovoltaica. A energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá, por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico. (IMHOFF, 2007).

Segundo Matavelli. (2013, p.17):

“A energia elétrica é obtida da conversão direta da luz por meio do efeito fotovoltaico. Esse efeito, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz (CRESESB, 2006). O primeiro aparato fotovoltaico foi montado em 1876 e apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial (CRESESB, 2006). A unidade fundamental do processo de conversão é a célula fotovoltaica. O conjunto de células compreende os painéis fotovoltaicos”.

2.10. Bateria

Atualmente, entende-se que tanto as pilhas, ou células eletroquímicas, como as baterias, são dispositivos nos quais a energia química se converte em energia elétrica, de modo espontâneo. Porém, a pilha é o dispositivo formado somente por dois eletrodos (cátodo e o ânodo) e um eletrólito, enquanto o termo bateria se aplica aos dispositivos formados por um conjunto de pilhas conectadas em série ou em paralelo. (R. L. *et al.*, 2017).

2.11. Célula Combustível

Segundo o Caderno de estudos química ANGLO ALFA 4 (2022, p.94) uma pilha ou célula de combustível é uma célula eletroquímica que produz energia elétrica continuamente, utilizando um combustível (geralmente hidrogênio ou metanol) e um oxidante. É chamada assim porque os produtos da reação de oxirredução que ocorre na célula são os mesmos produtos de uma reação de combustão. Uma das vantagens desse tipo de célula eletrolítica é que os reagentes podem ser repostos, permitindo que o dispositivo funcione de forma contínua, o que confere uma autonomia potencialmente indefinida, enquanto houver combustível e oxidante. (ANGLO ALFA 4, 2022).

As células de combustível são importantes dispositivos que podem funcionar como geradores de energia eficientes. Se comparado com usinas termelétricas, que aproveitam cerca de 30% do calor liberado na queima de combustíveis para conservação em energia elétrica, a célula combustível pode-se atingir rendimentos superiores a 80%. (ANGLO ALFA 4, 2022).

Além disso, as células de combustível são cada vez mais utilizadas em aplicações de transporte, como em veículos movidos a hidrogênio, e também em

geradores portáteis ou sistemas de energia para áreas remotas, onde a eficiência e a sustentabilidade são essenciais. Em veículos, por exemplo, a célula de combustível de hidrogênio produz eletricidade para alimentar motores elétricos, com a única emissão sendo vapor d'água, o que a torna uma alternativa muito mais ecológica em relação aos motores de combustão interna. A tecnologia é amplamente reconhecida por sua eficiência energética e pela sustentabilidade que proporciona, uma vez que a única emissão dos veículos movidos a hidrogênio é o vapor d'água. Além disso, as células de combustível também oferecem uma solução promissora para áreas remotas, fornecendo energia limpa de forma contínua e eficiente. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY [IEA], 2021; US DEPARTMENT OF ENERGY, 2020).

3. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido utilizando uma abordagem experimental para investigar a viabilidade da produção de hidrogênio verde, com foco em práticas sustentáveis e no uso de recursos acessíveis e renováveis. O planejamento inicial foi estruturado para testar a produção de hidrogênio utilizando energia proveniente de uma placa solar, integrando diretamente fontes renováveis ao processo.

O desenvolvimento da pesquisa envolve a utilização de diversos materiais e equipamentos, com ênfase na escolha de fontes sustentáveis e eficientes para a produção de hidrogênio. Entre os materiais utilizados, destacam-se recipientes de vidro e garrafas PET, que servem como reatores para processos de eletrólise. Eletrodos de cobre e alumínio foram escolhidos por sua capacidade de conduzir corrente elétrica e facilidade de manuseio. As soluções eletrolíticas utilizadas consistem em hidróxido de sódio ($NaOH$) e cloreto de sódio ($NaCl$), escolhidos por sua eficácia na condução de corrente elétrica durante a eletrólise úmida.

Foi prevista a utilização de um painel solar como fonte de energia para alimentar o sistema de eletrólise, com o objetivo de integrar recursos renováveis no processo de produção de hidrogênio. A energia gerada pelo painel solar será convertida em corrente contínua, que será aplicada aos eletrodos para dividir a água em hidrogênio e oxigênio.

A montagem dos reatores foi cuidadosamente planejada para avaliar diferentes geometrias e configurações de materiais, garantindo que a produção de hidrogênio fosse eficiente e segura. As tampas dos recipientes foram adaptadas para a instalação dos eletrodos e de tubos plásticos transparentes, que permitem visualizar o processo e transportar os gases produzidos. Esses componentes foram vedados com selante de silicone para evitar vazamentos e garantir a separação dos gases.

A seleção dos materiais e procedimentos baseou-se na sua eficácia, durabilidade e segurança. Esta metodologia abrangente tem sido essencial para avaliar múltiplos cenários e melhorar a produção de hidrogênio em sistemas sustentáveis, permitindo análises críticas e superando obstáculos ao longo do processo experimental.

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.4. Primeiro experimento

Iniciaram-se os testes utilizando um pote de vidro com tampa de rosca e dois eletrodos de cobre, como eletrólito usou-se ácido sulfúrico (H_2SO_4) que foi diluído em água sendo assim uma solução de 2 litros a 0,1M de ácido sulfúrico.

Para montagem do reator foi-se necessário fazer três furos na tampa de plástico do pote, dois buracos para entrarem-se os eletrodos e outro buraco para instalar-se um tubo de plástico que é utilizado para envazar-se o gás hidrogênio para outro lugar, os eletrodos e o tubo foram grudados junto à tampa por uma cola de silicone visto que o recipiente deveria ser vedado, logo com o equipamento pronto providenciou-se uma fonte de impressora com regulagem de 12V a 24V e 5A.

Aproveitando a estrutura do reator já montada, foram revestidos os eletrodos de uma tubulação transparente, com intuito de separar os gases produzidos, com objetivo de utilizá-los em uma célula de combustível.

4.5. Segundo experimento

O teste foi realizado utilizando papel alumínio compactado e moldado em um formato cilíndrico alongado, para que o mesmo servisse como um eletrodo sólido convencional.

Preparou-se 500mL de uma solução de $NaOH$ 2M, e conectam-se aos eletrodos dois eletrodos improvisados de papel alumínio compactado, que fizeram a conexão com a fonte de energia, a mesma possui 12V e 5A.

4.6. Terceiro experimento

Para a concepção do experimento foi esquematizado um reator, cujo funcionamento depende do funcionamento de uma eletrólise alcalina controlada, além de uma tubulação que foi utilizada para captar os gases produzidos.

Utilizaram-se os seguintes materiais para a criação do reator:

- Recipiente de vidro com capacidade volumétrica de 500mL e sua tampa;
- Duas hastes de alumínio foram utilizadas como eletrodos, ambas com circunferência aproximada de 3 mm;

- Tubo plástico transparente, utilizado como saída dos gases produzidos;
- Cola de silicone, foi utilizada para fixar o eletrodo em sua base, além de funcionar como vedante, impedindo que os gases produzidos na reação escapem entre possíveis frestas.

Após devidamente montado, o reator foi abastecido com uma solução de 500mL de hidróxido de sódio 2M, tal solução foi submetida a realização da eletrólise aquosa.

Montado o reator, abasteceu-se o mesmo com uma corrente elétrica contínua de 12V com amperagem de 50A, interligando a fonte de energia aos eletrodos, respectivamente nos pólos negativo e positivo.

4.7. Quarto experimento

Após realizados os experimentos anteriores, notou-se alguns problemas referentes à estrutura de funcionamento do reator. Como por exemplo, a impossibilidade de separar os gases H_2 e O_2 uma vez que ambos são gerados dentro do mesmo sistema. Este fator impediria que o gás Hidrogênio fosse utilizado de maneira isolada dentro de uma célula de combustível, atrasando o avanço do projeto e gerando mais demanda de trabalho.

Tendo isso em mente, foi realizada a concepção de uma nova estrutura de reator, onde os polos negativo e positivo são isolados um do outro, porém, ainda utilizando a mesma solução eletrolítica, garantindo o funcionamento da eletrólise normalmente e isolando a saída dos gases.

Foram utilizados os seguintes materiais e reagentes para a criação do reator:

- Duas garrafas pet com capacidade volumétrica de dois litros equipadas com suas respectivas tampas
- Um cano de uma polegada de circunferência e cerca de 7 cm de comprimento
- Solução aquosa de $NaCl$
- Dois arames de alumínio que serviram como eletrodos
- Duas tubulações de plástico utilizadas para a captação dos gases produzidos

Foram separadas as garrafas para o experimento, e foi feito um buraco em ambas, respectivamente do tamanho do cano que conecta as duas. Após conectadas as garrafas pelo cano, encheram-se ambas da solução eletrolítica de *NaCl*, e posicionaram-se os eletrodos acoplados às tampas das garrafas, vedando-os para que não houvesse o risco de vazamento dos gases. Após devidamente preparado o reator, ligou-se os eletrodos a fonte de energia elétrica, que respectivamente possui 12V e 50A, iniciando a eletrólise e dando início a produção dos gases.

4.8. Quinto experimento

No último experimento, desenvolveu-se uma usina de eletrólise com materiais feitos de PVC com o intuito de tornar o reator estruturalmente superior aos anteriores, e garantindo a ausência de qualquer vazamento, os materiais utilizados foram:

- 1 metro de cano de PVC esgoto de duas polegadas;
- Dois Cotovelos de cano de PVC esgoto duas polegadas;
- Uma conexão T de cano de PVC esgoto duas polegadas;
- Uma luva de cano de PVC esgoto duas polegadas;
- Dois tampões de cano de PVC esgoto duas polegadas;
- Eletrodos de alumínio e cobre;
- Solução de *NaCl* um molar;
- Dois tubos de plástico.

Para a montagem da usina, pegou-se o tubo de 1 metro e cortou-se em três pedaços de forma que dois tubos tivessem 30 cm e o terceiro tivesse 40 cm, para montar-se a base da estrutura, pegou-se os dois cotovelos e colou-se a conexão de T mantendo-se os três buracos para cima, em um destes colou-se a luva que serve para conectar-se o tubo a parte lisa do cotovelo. Após isso colou-se os tubos aos buracos de forma que o da ponta esquerda fosse o de 40 cm e ao topo dos tubos de 30 cm colou-se os tampões.

Em cada tampão furou-se quatro buracos, um para o tubo de plástico e os outros três para eletrodos de forma que se um eletrodo fosse desgastado havia outros dois para substituí-los.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4. Experimento 1

O primeiro experimento realizado proporcionou o entendimento de que seria necessária a utilização de um eletrodo resistente o bastante para que a corrosão não o consumisse completamente, devido ao grande trabalho envolvido na troca do eletrodo em caso de consumo total, concluiu-se que o eletrodo ideal para o sistema seria de uma espessura intermediária, de cerca de 3 milímetros de circunferência, para que sua troca demorasse um maior intervalo de tempo para ocorrer, além de proporcionar uma maior superfície de contato que contribui diretamente para uma maior produção de gás hidrogênio.

A imagem abaixo mostra o estado de corrosão no qual foram deixados os eletrodos de cobre do experimento um.

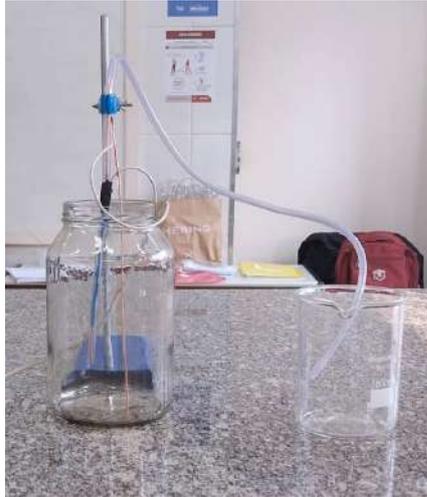
Figura 2 – Corrosão dos eletrodos



Fonte: autoria própria

A imagem abaixo mostra o reator um com uma tubulação revestindo o eletrodo de polo negativo, com intuito de possibilitar a captura específica dos gases produzidos.

Figura 3 - Experimento um



Fonte: Autoria própria

A tentativa de isolar a saída de gases através de uma tubulação acoplada ao eletrodo não foi eficiente, devido à quantidade insignificante de gases produzida, que não foi suficiente para suprir as demandas mínimas de hidrogênio.

A fotografia abaixo retrata o momento em que a eletrólise ocorre, formando bolhas de gás em ambos os polos, respectivamente, polo negativo borbulhando hidrogênio e polo positivo borbulhando oxigênio.

Figura 4 - Eletrólise do experimento um



Fonte: Autoria própria

5.5. Experimento 2

O segundo experimento utilizou papel alumínio compactado como eletrodo, duas hastes foram feitas, ambas foram apoiadas sobre um suporte improvisado, realizada a eletrólise foi revelado um fator prejudicial em relação ao papel alumínio, sua baixa resistência, tal fato corrobora com uma baixa vida útil do metal, fazendo com que ele se degrade rapidamente. Concluindo assim que o eletrodo de papel alumínio não é o mais indicado para produção de hidrogênio. Optou-se por utilizar um tipo diferente de eletrodo, com intuito de analisar se haveria uma maior vida útil do mesmo, além de verificar se a mudança possibilitaria uma maior produtividade de hidrogênio. Tal raciocínio foi concebido devido à lógica de que o polo negativo da célula eletrolítica será a responsável pela saída do gás hidrogênio, sendo assim, quanto maior o potencial de redução do eletrodo utilizado, maior será a facilidade de produzir gás hidrogênio por meio da reação de redução. Baseado na tabela de redução dos elementos químicos, o cobre possui um potencial de redução de $-0,34$, enquanto o alumínio possui um potencial de redução de $+1,66$, ou seja, um valor consideravelmente maior, que em teoria resultaria em uma maior produção de hidrogênio.

Figura 5 - Eletrodos de papel alumínio



Fonte: Autoria própria

5.6. Experimento 3

No terceiro experimento notou-se inicialmente a formação de uma quantidade consideravelmente alta de bolhas assim que a energia foi ligada, indicando uma latente produção de gases como subproduto das reações químicas ocasionadas pela eletrólise. O intuito era utilizar a energia proveniente de uma placa solar, porém, foi realizada uma sequência de testes que comprovaram que a amperagem fornecida pela placa era insuficiente para carregar um sistema de armazenamento de energia eficiente, como uma bateria de chumbo ácido por exemplo. Tal ideia teve que ser deixada de lado devido aos fatos expostos anteriormente, por isso utilizou-se uma fonte convencional de 50 Amperes 12 Volts.

Na fotografia do reator construído no experimento três, a imagem retrata a formação de uma quantidade consideravelmente alta de bolhas, dentre elas o desejado gás hidrogênio.

Figura 6 - Reator do experimento três



Fonte: Autoria própria

A tubulação embutida no frasco foi presa a um balão de festa infantil, e com o passar do tempo, notou-se que o balão se enchia gradualmente por consequência dos gases produzidos. Porém, foram notados alguns fatores problemáticos em decorrência ao procedimento, o balão utilizado possuía uma resistência ao enchimento considerável, e por isso não se permitia encher com os gases produzidos, congestionando o sistema sem a liberação dos gases O_2 e H_2 . Também se percebeu que devido à alta concentração de $NaOH$ e a alta amperagem fornecida ao sistema, houve um superaquecimento do reator que ocasionou no seu desligamento por motivos de segurança.

5.7. Experimento 4

Finalizado o quarto experimento notou-se a produção de gás saindo do polo negativo, possivelmente gerando hidrogênio ao decorrer do tempo, porém, não houve permissão para testá-lo devido ao risco de explosão em cadeia. A nova concepção de reator teoricamente funcionou, porém, por se tratar de um protótipo feito com tempo e custos muito reduzidos, houve um problema de vazamento, localizado na conexão entre as garrafas e o cano, impossibilitando a utilização do reator por muito mais tempo.

Abaixo é apresentada a fotografia do reator construído no experimento quatro, possuindo uma estrutura rudimentar e improvisada que serviu como um teste simples para a prática de conceitos básicos, utilizados posteriormente na concepção do sexto experimento.

Figura 7 - Reator improvisado



Fonte: Autoria própria

5.8. Experimento 5

O quinto e último experimento corrigiu os erros estruturais que o experimento 4 possuía, servindo como um reator eletrolítico que detinha um formato capaz de isolar os dois gases produzidos de maneira eficiente, possibilitando a utilização deles em uma célula de combustível de hidrogênio. O único contraponto foi à falta de tratamentos finais quanto ao acabamento vedante do reator, tal fator foi limitante para o projeto tendo em vista que o prazo de entrega do trabalho havia terminado, impossibilitando a entrega do reator final.

A fotografia abaixo revela o último reator construído ao final do projeto, seu formato e meio de funcionamento segue a lógica observada no reator cinco, porém com uma estrutura melhor trabalhada, sendo mais resistente, seguro e confiável.

Figura 8 - Reator quatro



Fonte: Autoria própria

O reator cinco possuía a estrutura e a lógica de funcionamento mais assertiva dentre todos os reatores, visto que todas as concepções anteriores serviram de estudo para chegar a ele, o mesmo, detinha de compartimentos na qual alojaram-se os eletrodos, fazendo com que os gases produzidos não se misturassem no processo, possibilitando a utilização deles em uma célula de combustível. O experimento seis só pôde ser testado uma vez, devido ao tempo de entrega do trabalho ter terminado,

estima-se que se reparados os erros de vedação das tampas, o reator funcionaria perfeitamente, sendo capaz de produzir e separar os gases hidrogênio e oxigênio.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do desenvolvimento deste projeto, constatou-se o crescente interesse e investimento global em fontes de energia sustentável, evidenciando uma transição significativa em direção a tecnologias baseadas em recursos renováveis. Esse contexto reforça a relevância de iniciativas que busquem acompanhar as tendências atuais e contribuir para um futuro mais sustentável. Apesar das limitações enfrentadas, como o tempo insuficiente para aprofundar e refinar as etapas do experimento, os resultados alcançados refletem progresso e aprendizado significativos ao longo do processo.

O projeto teve como objetivo explorar a viabilidade da geração de energia utilizando gás hidrogênio e oxigênio, com base nos princípios das células de combustível. Embora a geração prática de energia não tenha sido concretizada, foi possível desenvolver um esquema conceitual que, teoricamente, poderia atender aos requisitos propostos. Isso demonstra um avanço no amadurecimento da ideia inicial e na compreensão dos desafios tecnológicos envolvidos.

A evolução do experimento ao longo dos testes destacou o potencial de tecnologias sustentáveis e as barreiras que ainda precisam ser superadas para sua implementação prática. Mesmo sem alcançar o resultado final esperado, os aprendizados adquiridos oferecem uma base sólida para futuras investigações e aprimoramentos. Esse projeto reforça a importância de persistir na busca por soluções energéticas inovadoras, alinhadas às demandas contemporâneas por eficiência, sustentabilidade e redução de impactos ambientais.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, Maria Eloisa da Silva; DIAS, Alanna Kerlen Costa; SANTOS, Helica Magalhães; SIMÕES, Rodrigo Kennedy; CIRILO, Mara Patricia; SPINOLA, Thais Pirâmides; ANÍCIO, Laíza Duarte; ANDRADE, Taís Késsia Paulo de; OLIVEIRA, Thiago Marcel. Eletroquímica. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, [S. l.], v. 7, n. 10, p. 1478–1483, 2021. DOI: 10.51891/rease.v7i10.2675. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/2675>. Acesso em: 28 abr. 2024.

ASHAR, N. G.; GOLWALKAR, K. R. Processes of Manufacture of Sulfuric Acid. In: *A Practical Guide to the Manufacture of Sulfuric Acid, Oleums, and Sulfonating Agents*. Cham: Springer International Publishing, 2013. p. 9–30. Acesso em: 09 set. 2024.

BATISTA, Carolina. Ácido sulfúrico. *Toda Matéria*, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/acido-sulfurico/>. Acesso em: 2 set. 2024

BATISTA, Carolina. Hidróxido de sódio. *Toda Matéria*, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/hidroxido-de-sodio/>. Acesso em: 30 abr. 2024.

CADERNO DE ESTUDOS QUÍMICA - ANGLO ALFA. *Caderno de estudos química*. 1. ed. 4. impressão. Plirall, 2022.

CARNEIRO, Rafael Luiz et al. Aspectos essenciais das baterias chumbo-ácido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento. *Revista Virtual de Química*, v. 3, pág. 889-911, 2017.

CAMPOS, V. R. Sulfuric acid (CAS No. 7664-93-9). *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 3, p. 210–214, 2011. Acesso em: 09 set. 2024.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA - IV REGIÃO. Elementos químicos: oxigênio. Disponível em: <https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-oxigenio/>. Publicado em: 27 fev. 2022. Acesso em: 11 nov. 2024.

COUTINHO, Cláudia F. B. *et al.* Estudo do comportamento eletroquímico de substâncias complexantes utilizando eletrodo de cobre. São Carlos - SP, Brazil: SciELO brazil, 2009.

DE LARA, Daniela Mueller; RICHTER, Marc François. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. *Novos Cadernos NAEA*, v. 26, n. 1, 2023. Acesso em: 07 abr. 2024.

DE NÓBREGA, Mariana Furtado Ribeiro et al. Hidrogênio Verde: uma revisão de processos de produção do hidrogênio oriundos de fontes renováveis de energia. *Natural Resources*, v. 12, n. 2, p. 75-85, 2022.

DIAS, Diogo Lopes. Eletrólise em meio aquoso. Manual da química, *Ano da Publicação*. Disponível em: <https://www-manualdaquimica-com.cdn.ampproject.org/>. Acesso em: 2024.

FELTRE, R. Ácidos importantes. In: Química Geral. 6. ed. São Paulo: Moderna, 2004. v. 1p. 194. Acesso em: 09 set. 2024.

FERNANDES, Ricardo Ferreira. Eletrólise. *Revista de Ciência Elementar*, v. 3, n. 1, 2015. Acesso em: 28 abr. 2024.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. Hidróxido de sódio. Manual da química. Disponível em: <https://www-manualdaquimica-com.cdn.ampproject.org/>. Acesso em: 2024

GUERRA, Luís Filipe Sanches. Eletrólise da água para produção de gás de síntese. 2015. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Acesso em: 28 abr. 2024.

HODGE, C. A. Sulfuric Acid Production. In: Pollution Control in Fertilizer Production. [s.l.] CRC Press, 1994. p. 177–202. Acesso em: 09 set. 2024.

IEA, 2023. Global Hydrogen Review 2023, International Energy Agency, Paris
IEA - International Energy Agency. (2021). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. Recuperado de www.iea.org

JIANG, A. et al. Sulfuric Acid Burns. In: Kanerva's Occupational Dermatology. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 2587–2593. Acesso em: 09 set. 2024.

LANA, Luana Teixeira Costa et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. *Engenharias On-line*, v. 2, pág. 21-33, 2015.

LUÍS FILIPE SANCHES, Eletrólise da água para produção de gás de síntese. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/bitstream> acesso em 24 de outubro 2024

MULLER, T. L. Sulfuric Acid and Sulfur Trioxide. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. [s.l.] Wiley, 2006. Acesso em: 09 set. 2024.

PALHARES, Dayana D. et al. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. 2016. Acesso em: 28 abr. 2024.

PALMER, A. N.; HILL, C. A. Sulfuric acid caves. In: Encyclopedia of Caves. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 1053–1062. Acesso em: 09 set. 2024.

PAIVA, Suelya da Silva Mendonça de. Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Acesso em: 09 abr. 2024.

REZENDE, Lucas de Almeida. Desenvolvimento e análise experimental de um gerador de hidrogênio por eletrólise. 2021. Acesso em: 14 maio 2024.

R. L., Carneiro *et al.* Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento. 3. ed. Revista Virtual Química, 2017. v. 9. ISBN 889-911.

RODRIGUES, Mônica Aparecida; SILVA, Priscila Pereira ; GUERRA, Wendell. Cobre. Qnesc, 15042012. N° 3, p p. v. .343.

SOUZA, Líria Alves. "Hidróxido de Sódio"; Brazil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/hidroxido-de-sodio.htm>. Acesso em 30 de abril de 2024.

TORSONI, Guilherme Botega; MIRANDA, João Kikuta; APARECIDO, Lucas Oliveira. Influência da direção da placa solar na geração de energia. *Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)* , v. 1, 1 conjunto. 2019.

US Department of Energy (DOE). (2020). *Hydrogen and Fuel Cells Program 2020 Annual Progress Report*. Recuperado de www.energy.gov

VIOLA, Luigi. Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica. 2015. Acesso em: 12 mar. 2024.

WEST, John B. Henry Cavendish (1731–1810): hydrogen, carbon dioxide, water, and weighing the world. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*, v. 307, n. 1, p. L1-L6, 2014. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/ajplung.00067.2014>. Acesso em: 11 nov. 2024.

