



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências
Câmpus de Rosana

PEDRO DA MOTA CANDIDO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR DE GÁS HHO DO TIPO *WET*
CELL PARA DIFERENTES ELETRODOS**

Rosana - SP
2024

PEDRO DA MOTA CANDIDO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR DE GÁS HHO DO TIPO *WET CELL* PARA DIFERENTES ELETRODOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energia

Orientadora: Profa. Dra. Claudia Gonçalves de Azevedo

Rosana - SP
2024

C217a

Candido, Pedro da Mota

Análise de um desempenho de um gerador de gás HHO do tipo wet cell para diferentes eletrodos / Pedro da Mota Candido. -- Rosana, 2024

57 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientadora: Claudia Gonçalves de Azevedo

1. GERADOR DE GÁS HHO. 2. WET CEL. 3. ELETRODOS. 4. ELETROLÍTO. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências
Câmpus de Rosana

PEDRO DA MOTA CANDIDO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. Kleber Rocha de Oliveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Claudia Gonçalves de Azevedo
Orientadora/UNESP-Rosana

Profa. Dra. Leticia Sabo Boschi
UNESP-Rosana

Prof. Dr. Kleber Rocha de Oliveira
UNESP-Rosana

Novembro/2024

dedico este trabalho aos meus pais e a meu irmão, que sempre me apoiaram nas minhas decisões e me deram forças para atingir meus objetivos com êxito.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais e meu irmão, que sempre estiveram ao meu lado, nas decisões mais difíceis que moldaram minha jornada durante esses anos como aluno de graduação da Unesp-Rosana. Sem eles ao meu lado não teria forças para continuar esta trilha que está somente se iniciando com a conclusão deste belo curso.

Agradeço também meus amigos, Nikolas, Arthur, João Pedro, Vinicius, Mateus e Maria Eduarda, que tornaram esta árdua jornada mais leve e cheia de recordações. Amigos que acabaram se tornando parte da minha família. Também agradeço a minha namorada, que está sempre ao meu lado para dar o suporte, e que torna os meus dias mais iluminados.

Agradeço também a minha orientadora, por todo o apoio e oportunidade que surgiram ao longo da graduação, de realizar trabalhos de iniciação científica e pelo suporte para conseguir entregar este trabalho com êxito, apesar das dificuldades.

Aproveito esta oportunidade, para agradecer também a todos os colaboradores da UHE Porto Primavera, que no ano de 2024 fizeram parte do meu dia a dia, me ensinaram tanto em tão pouco tempo, e me acolheram como um filho. Me sinto muito orgulhoso em fazer parte desta bela família.

Agradeço a Deus, por me dar condições para concluir o curso de Engenharia de Energia na UNESP.

“Se encontrando a desgraça e o triunfo conseguires
Tratar da mesma forma a esses dois impostores; (...) tua é a terra com tudo o que existe no
mundo, E o que mais -- tu serás um homem, ó meu filho!”
- Rudyard Kipling

RESUMO

Ao longo das últimas décadas tem se observado um aumento na busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis e eficientes para o armazenamento e distribuição da energia a fim de reduzir e/ou eliminar as emissões de gases geradas na produção industrial, de modo que a comunidade científica e industrial tem desenvolvido estudos e pesquisas cada vez mais avançados na busca por novos métodos de produção de energia renovável. Nesse cenário, o hidrogênio tem se mostrado uma opção viável a ser avaliada e estudada, sendo um combustível alternativo que possibilita uma contribuição para a transição energética e indispensável no processo de descarbonização. O presente trabalho tem como objetivo investigar a produção de gás HHO em um gerador do tipo *wet cell* através da eletrólise da água, explorando o efeito de diferentes eletrólitos, bem como diferentes eletrodos na produção do gás. Os resultados demonstraram que um aumento na tensão aplicada, assim como na concentração do eletrólito, resulta em uma maior produção de gás HHO. A solução de KOH apresentou um desempenho superior em relação à solução de NaOH, especialmente nos testes com os eletrodos de aço inox e cobre, que geraram as maiores vazões e potências, ressaltando a importância dos materiais eletrodos e das concentrações escolhidas para a otimização da produção de hidrogênio. Além disso, foram analisadas as temperaturas alcançadas durante os experimentos, que se mostraram relativamente constantes para os mesmos eletrodos, indicando uma estabilidade do sistema. A análise de potência revelou que a maior eficiência de conversão de energia elétrica em hidrogênio ocorreu na concentração de 35 g/L de KOH.

PALAVRAS-CHAVE: Gás HHO. Eletrólise. Energias renováveis. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Over the past few decades, there has been an increasing focus on the development of new, sustainable, and efficient technologies for energy storage and distribution in order to reduce and/or eliminate the greenhouse gas emissions generated in industrial production. As a result, the scientific and industrial communities have been conducting increasingly advanced studies and research in the search for new methods of renewable energy production. In this context, hydrogen has proven to be a viable option to be assessed and studied, as it is an alternative fuel that contributes to the energy transition and is indispensable in the decarbonization process. This study aims to investigate the production of HHO gas in a wet-cell type generator through water electrolysis, exploring the effect of different electrolytes as well as different electrodes on gas production. The results showed that an increase in the applied voltage, as well as in the electrolyte concentration, results in higher HHO gas production. The KOH solution outperformed the NaOH solution, especially in tests with stainless steel and copper electrodes, which generated the highest flow rates and power outputs, emphasizing the importance of electrode materials and electrolyte concentrations for optimizing hydrogen production. Furthermore, the temperatures reached during the experiments were analyzed and remained relatively stable for the same electrodes, indicating system stability. The power analysis revealed that the highest efficiency in converting electrical energy into hydrogen occurred at a KOH concentration of 35 g/L.

KEYWORDS: HHO gas. Electrolysis. Renewable energies. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2023.	15
Figura 2 – Demanda de hidrogênio nos principais países e no resto do mundo.....	16
Figura 3 - Principais rotas para a produção de hidrogênio.	19
Figura 4 - Célula eletrolítica.....	21
Figura 5 - Reator eletrolítico	24
Figura 6 - Soluções eletrolíticas de NaOH	25
Figura 7 - Fonte de alimentação.	25
Figura 8 - Diagrama esquemático da bancada de testes.	26
Figura 9 - Medição de vazão do gás HHO, da tensão e corrente elétrica.....	26
Figura 10 - Início da produção do gás HHO.....	28
Figura 11 - Corrente versus tensão utilizando o eletrólito NaOH	31
Figura 12 - Vazão de gás HHO versus tensão utilizando o eletrólito NaOH.....	32
Figura 13 - Potência versus tensão utilizando o eletrólito NaOH	33
Figura 14 - Eficiência utilizando a solução de NaOH	34
Figura 15 - Corrente versus tensão utilizando o eletrólito KOH.	36
Figura 16 - Vazão de gás HHO versus tensão utilizando o eletrólito KOH.....	37
Figura 17 – Potência versus tensão utilizando o eletrólito KOH.....	38
Figura 18 - Eficiência do gerador utilizando a solução de KOH.....	39
Figura 19 - Eletrodos após as reações químicas de oxirredução utilizando a solução de eletrólito KOH: (a) Alumínio, (b) Aço Inox, (c) Latão e (d) Cobre.....	41
Figura 20 - Resultados obtidos da simulação para a solução de NaOH	43
Figura 21 - Resultados obtidos da simulação para a solução de KOH.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formas de Produção de Hidrogênio.....	18
Tabela 2 – Condições experimentais para análise do reator eletrolítico.....	27
Tabela 3 – Temperatura média no reator eletrolítico utilizando o eletrólito NaOH	35
Tabela 4 – Temperatura média no reator eletrolítico utilizando o eletrólito KOH.	40
Tabela 5 – Apresentação dos dados obtidos meio da simulação numérica.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos.....	12
<i>1.1.1. Objetivo Geral.....</i>	<i>12</i>
<i>1.1.2. Objetivos Específicos.....</i>	<i>13</i>
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1. Brasil e sua Matriz Elétrica	14
2.2. Hidrogênio como fonte de energia	15
2.3. Processo de eletrólise para produção de hidrogênio	19
2.4. Célula geradora de gás HHO.....	20
<i>2.4.1. Variáveis que afetam a eficiência da eletrólise.....</i>	<i>22</i>
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1. Reator Eletrolítico	24
3.2. Aparato experimental.....	24
3.3. Determinação da Potência e Eficiência do reator eletrolítico.....	27
3.4. Simulação da produção de gás HHO	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. Resultados obtidos utilizando o eletrólito NaOH.....	31
4.2. Resultados obtidos utilizando o eletrólito KOH	35
4.3. Resultados obtidos da simulação numérica.....	41
5. CONCLUSÃO.....	46
6. REFERÊNCIAS.....	48
ANEXOS	54

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, governantes de diferentes países estão utilizando estratégias energéticas para reduzir suas emissões nocivas ao meio ambiente, principalmente emissões de dióxido de carbono (Kindra, Maksimov, 2023). Com isso nos últimos anos, a busca por fontes de energia alternativas e sustentáveis tornou-se uma prioridade global, impulsionada por desafios significativos como as mudanças climáticas, a escassez de recursos naturais e a crescente demanda por energia (*International Energy Agency*, 2021).

Nesse contexto, o hidrogênio tem emergido como uma solução promissora. Conhecido como o combustível do futuro, o hidrogênio é o elemento mais abundante no universo e apresenta um grande potencial para ser utilizado em diversas aplicações, desde transporte até geração de eletricidade, além de atuar como um armazenamento eficiente de energia (*Hydrogen Council*, 2020).

Devido a suas características únicas, o hidrogênio, destaca-se como um vetor energético promissor, capaz de contribuir significativamente para a transição energética global, uma vez que permite a produção de energia de forma limpa.

Quando queimado ou utilizado em células de combustível, seu único subproduto é o vapor d'água, tornando-o uma alternativa atrativa em comparação com combustíveis fósseis, que emitem dióxido de carbono e outros poluentes (*Hydrogen Council*, 2020).

Há diferentes maneiras de se produzir o hidrogênio. Algumas das principais tecnologias de produção incluem, a eletrolise da água, processo que utiliza a eletricidade para separar a molécula da água em hidrogênio e oxigênio, podendo ser essa eletricidade oriunda de fontes renováveis, chamado de hidrogênio verde (IRENA, 2019). Outra maneira de obter hidrogênio é por meio da reforma do Gás Natural, técnica mais comum, porém envolve a emissão de CO₂, dependendo da captura e armazenamento de carbono para se tornar uma técnica sustentável (*Global CCS Institute*, 2021); a gasificação de biomassa se torna uma abordagem que transforma matéria orgânica em hidrogênio, contribuindo para economia circular de resíduos (Leal, 2024).

A eletrólise, por exemplo, embora promissora, ainda apresenta limitações em termos de eficiência energética e requer investimentos significativos em infraestrutura (*Fuel Cell and Hydrogen Energy Association*, 2022), de modo que a eficiência e o custo dessa tecnologia ainda são desafios a serem superados (IRENA, 2019).

A escolha do eletrólito e do material do eletrodo desempenha um papel crucial na

otimização do processo, influenciando diretamente a taxa de produção de hidrogênio e a eficiência energética do sistema (García *et al.*, 2020).

Embora sejam encontrados na literatura estudos sobre a eletrólise, muitos deles ainda carecem de uma análise sistemática que considere a interação entre diferentes eletrólitos e materiais de eletrodos (Santos, 2023)

Portanto, a análise do desempenho de geradores de hidrogênio é fundamental para entender como otimizar esses sistemas e torná-los viáveis economicamente, sendo a eficiência dos geradores, determinada pela quantidade de hidrogênio produzido com relação à energia consumida, um indicador chave do seu desempenho (U.S. *Department of Energy*, 2021). Outros fatores, como a durabilidade dos componentes, a operação em diferentes condições ambientais e a integração com fontes de energia renovável, também merecem atenção.

O desenvolvimento do presente trabalho visa preencher essa lacuna, investigando como a variação nas concentrações de hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), bem como o uso de eletrodos de diferentes materiais, impacta o desempenho de geradores de hidrogênio.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo investigar as características operacionais de um gerador de gás HHO, bem como avaliar sua eficiência para diferentes condições de operação, visando contribuir para o entendimento do papel do hidrogênio como vetor energético e sua importância no futuro da matriz energética global.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um reator eletrolítico a fim de analisar o efeito de diferentes eletrólitos, bem como diferentes eletrodos na produção de gás HHO. O desempenho do sistema de geração de gás HHO será analisado para diferentes concentrações de dois eletrólitos, hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), bem como eletrodos de materiais diferentes, sendo eles, aço inox 304, alumínio, latão e cobre.

Será determinada a geração de gás de eletrólise em função da tensão aplicada, a corrente em função da variação da tensão aplicada na célula, potência consumida em função da voltagem aplicada no sistema, bem como a temperatura na célula eletrolítica em função da corrente aplicada para as diferentes concentrações de KOH e NaOH para todos os eletrodos. Por fim

será realizada uma comparação entre os eletrólitos e eletrodos a fim de determinar as condições que levem a uma maior produção de hidrogênio.

1.1.2. Objetivos Específicos

Este trabalho visa avaliar a utilização de diferentes materiais de eletrodo e eletrólitos na produção de hidrogênio, analisando a influência de tensão, corrente e concentração de eletrólito. Também será determinada a potência e eficiência do gerador de HHO, com simulações numéricas usando Matplotlib. A comparação entre dados experimentais e simulados ajudará a identificar discrepâncias e otimizar as condições para maior produção de hidrogênio.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Brasil e sua Matriz Elétrica

A energia desempenha um papel fundamental no progresso em uma sociedade. Atualmente, os combustíveis fósseis desempenham o papel de serem a principal fonte de energia para atender à crescente demanda, impulsionada pelo aumento populacional e pelos avanços tecnológicos. No entanto, o uso desses combustíveis tem gerado sérios problemas globais, como mudanças climáticas, conflitos energéticos e escassez de recursos.

Gases poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis são os principais causadores da poluição do ar, e pelo agravamento do aquecimento global, como o dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), as emissões de CO₂ alcançaram um nível recorde de 37,4 bilhões de toneladas em 2023. Para limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C até 2100, a IEA (2021) estima que as emissões de gases de efeito estufa (GEE) precisam ser reduzidas a zero até 2050.

Essa estimativa revela uma contradição preocupante, enquanto as emissões continuam a aumentar, milhões de pessoas ainda carecem de acesso à eletricidade e a métodos de cozimento limpos.

No Brasil, a geração de eletricidade a partir de fontes não renováveis caiu de 12,3% em 2022 para 11,0% em 2023 (EPE, 2024). Os dados da EPE (2024) mostram que as principais fontes de geração de energia foram a hidráulica, com 58,9%, seguida pela eólica, com 13,2%, e a solar, com 7,0%.

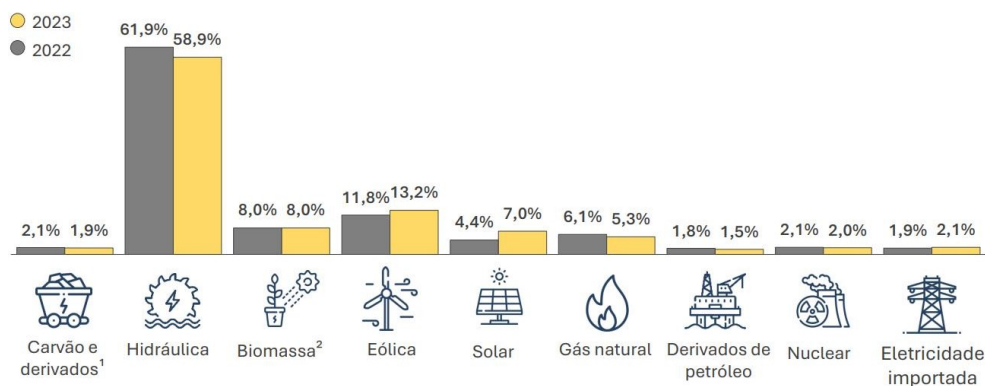
A Figura 1 apresenta a matriz elétrica brasileira do ano de 2023, que apresentou uma queda da geração a partir de gás natural de 7,9% e de óleo diesel de 24,6% bem como um aumento da geração solar fotovoltaica em 68,1% e eólica em 17,4%.

Apesar da crescente capacidade de geração a partir de fontes renováveis, cerca de 3 milhões de pessoas ainda dependem de sistemas isolados que utilizam óleo diesel como principal fonte de eletricidade (GALLINA *et al.*, 2022).

Diante dos impactos ambientais negativos da queima de combustíveis fósseis, há um crescente interesse na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que utilizem fontes de energia renováveis, como biogás e hidrogênio para ser uma alternativa aos combustíveis fósseis na geração de energia elétrica, ou implementado como fonte de combustível nos transportes e,

assim, diminuir as emissões de gases poluentes.

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2023.



Fonte: BEN, 2024

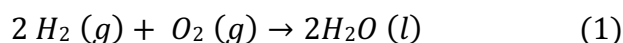
2.2. Hidrogênio como fonte de energia

A crescente demanda por fontes de energia limpas e sustentáveis, aliada às preocupações globais com as mudanças climáticas e a degradação ambiental, torna a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de geração de hidrogênio uma prioridade urgente (*International Energy Agency*, 2021).

O hidrogênio (H₂) é o elemento mais abundante no universo e o mais simples da tabela periódica, sendo encontrado predominantemente na forma de gás em condições normais. Esse gás é incolor, inodoro e insípido, além de ser muito mais leve que o ar.

Devido à sua capacidade de gerar energia sem emitir poluentes típicos de combustíveis fósseis, é amplamente considerado uma das opções mais limpas e promissoras para a transição energética. Sua combustão, por exemplo, resulta apenas em água e calor, sem liberar dióxido de carbono (CO₂) ou outros gases prejudiciais ao meio ambiente (Silva *et al.*, 2023).

A reação de combustão do hidrogênio pode ser representada pela seguinte equação química (Equação 1):



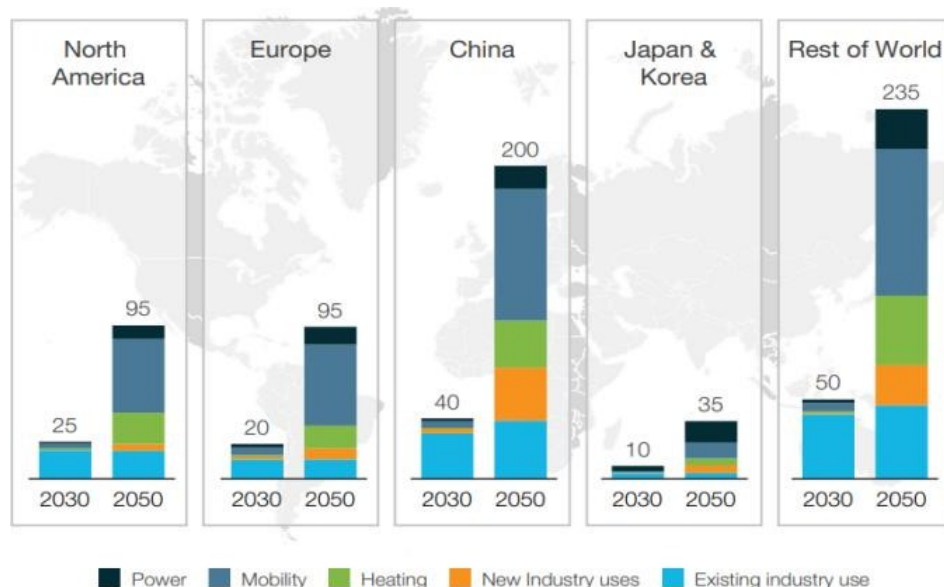
Embora o hidrogênio não seja uma fonte de energia primária, como os combustíveis fósseis ou a eletricidade, ele atua como um portador de energia. Isso significa que pode ser gerado, armazenado e transportado para ser utilizado em diversas aplicações, desde a geração

de eletricidade até o transporte e processos industriais. Quando produzido de forma limpa, utilizando fontes renováveis como energia solar ou eólica, o hidrogênio pode desempenhar um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, é importante destacar que a produção de hidrogênio a partir de fontes fósseis, como o gás natural, pode gerar significativas emissões de CO₂ (Oliveira *et al.*, 2022).

O hidrogênio já é amplamente utilizado em setores tradicionais, como a indústria química, para a produção de amônia (fundamental para fertilizantes), refino de petróleo e na fabricação de gases industriais. No entanto, com o aumento da conscientização sobre as mudanças climáticas e a crescente demanda por soluções energéticas mais limpas, o hidrogênio vem ganhando espaço em diversas aplicações. A sua utilização tem se expandido para os setores de transporte, como em veículos movidos a célula de combustível, e para o armazenamento de energia em larga escala, aproveitando a capacidade do hidrogênio de ser armazenado e reconvertido em eletricidade quando necessário (IEA, 2023).

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2021) apontou a necessidade de desenvolver novas tecnologias para o hidrogênio, apontando-o como um elemento crucial na transição para um futuro de baixas emissões de carbono. O planejamento da IEA para 2050 sugere que o hidrogênio pode ser responsável por uma parcela significativa da redução de emissões no setor energético global. A demanda global por hidrogênio, especialmente no contexto de um cenário de "zero emissões", deverá crescer consideravelmente até 2050, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Demanda de hidrogênio nos principais países e no resto do mundo.



Fonte: Hydrogen Council, 2021

O hidrogênio se destaca como uma fonte de energia de baixo ou zero carbono, especialmente em setores que enfrentam dificuldades para a eletrificação. Isso permite uma melhor integração com fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica. Sua versatilidade é um fator-chave para a descarbonização global, pois pode descentralizar diversas áreas do mercado energético.

Algumas propriedades relevantes do hidrogênio são, a alta densidade energética por unidade de massa, cerca de três vezes maior que a gasolina; um elemento não poluente após a sua combustão, gerando apenas vapor d'água como subproduto. Outra característica é a versatilidade, podendo ser utilizado em diversas aplicações, desde combustível para veículos até como matéria-prima na produção de amônia e metanol.

Embora o hidrogênio seja um elemento leve, ele apresenta uma densidade energética por unidade de volume superior em comparação a combustíveis como gasolina e gás natural. Essa característica o torna atraente, especialmente em sua forma líquida ou quando armazenado em materiais como biomassa, água ou combustíveis fósseis (Lewis, 2022).

A Tabela 1 apresenta as diversas formas de se produzir hidrogênio, cada uma com suas vantagens e desvantagens.

Outra característica que torna o hidrogênio uma alternativa muito viável para substituir os combustíveis fósseis, é a sua ampla gama de aplicações em diferentes setores. Nos transportes, veículos movidos a hidrogênio, utilizam células de combustível que convertem hidrogênio em eletricidade, oferecendo uma alternativa limpa aos veículos movidos a combustíveis fósseis.

A infraestrutura para abastecimento de hidrogênio está em crescimento, especialmente em regiões que investem em tecnologias limpas. Na indústria química, é uma matéria-prima essencial na produção de amônia, que é fundamental para a fabricação de fertilizantes. Também é utilizado na produção de metanol, plásticos e outros produtos químicos. No armazenamento de energia, pode atuar como um meio de armazenamento para excedentes de energia gerada a partir de fontes renováveis.

Durante períodos de baixa demanda, a eletricidade pode ser utilizada para produzir hidrogênio, que pode ser armazenado e convertido de volta em eletricidade quando necessário, por meio da sua queima em termoeletricas. Por fim, na indústria metalúrgica, é utilizado como agente redutor em processos de produção de aço, substituindo métodos tradicionais que utilizam carvão, reduzindo assim as emissões de CO₂ (IEA, 2023).

Tabela 1 - Formas de Produção do hidrogênio.

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Eletrólise da água	Decomposição da água em hidrogênio e oxigênio usando eletricidade, podendo ser alimentada por fontes renováveis	- Zero emissões - Sustentável - Escalável - Versátil	- Custo elevado - Eficiência limitada
Reforma de Gás Natural	Reação de metano com vapor de água para gerar hidrogênio, com CO ₂ como subproduto	- Custo baixo - Alta produção em larga escala - Tecnologia estabelecida	- Emissões de CO₂ - Dependência de gás natural - Necessidade de captura de carbono
Gaseificação da Biomassa	Conversão de resíduos orgânicos em hidrogênio via calor e pressão	- Renovável - Utiliza resíduos - Menos poluente	- Baixa eficiência - Custo alto - Logística desafiadora - Não escalável
Fermentação Anaeróbica	Microrganismos decompõem matéria orgânica sem oxigênio, gerando hidrogênio	- Processo sustentável - Baixo impacto ambiental	- Baixa produção - Tecnologia em fase experimental - Não viável

Fonte: Adaptado de Silva, 2024.

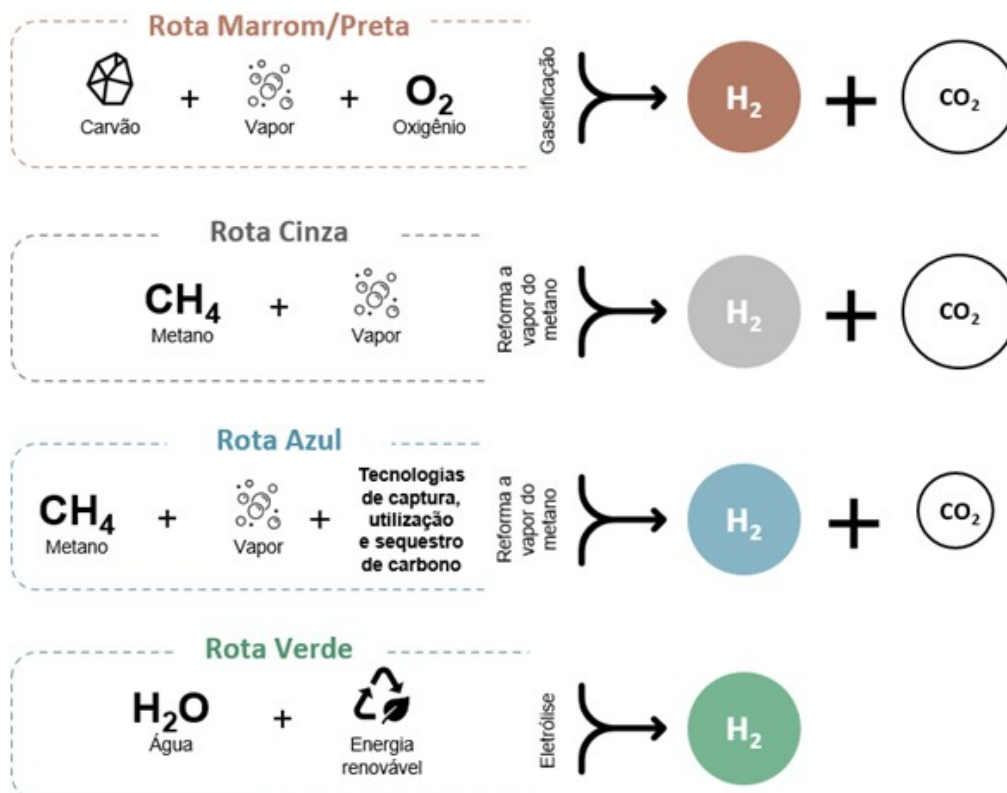
No Brasil, a produção e o uso industrial de hidrogênio já possuem uma base consolidada, mas, como apontado por Silva *et al.* (2021), a ampliação de iniciativas no setor energético exige investimentos contínuos em pesquisa, inovação e desenvolvimento tecnológico.

Para que esses projetos se tornem viáveis em larga escala, é fundamental promover o avanço de novas tecnologias, além de criar a infraestrutura necessária para a produção, armazenamento, transporte e distribuição do hidrogênio. Igualmente importante é o progresso na padronização e certificação das indústrias envolvidas nesse processo, para garantir a eficiência e a segurança das operações.

2.3. Processo de eletrólise para produção de hidrogênio

Diversas tecnologias estão sendo exploradas para a produção de hidrogênio, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Principais rotas para a produção de hidrogênio.



Fonte: Gas Energy, 2023.

A produção global de hidrogênio atinge cerca de 70 milhões de toneladas por ano, sendo que a maior parte (aproximadamente 76%) é originada do gás natural, e cerca de 23% provêm do carvão.

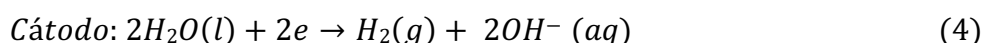
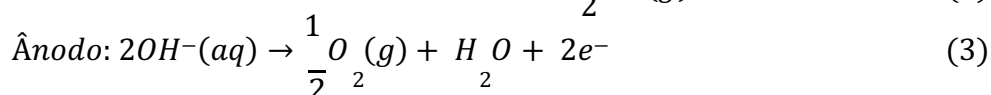
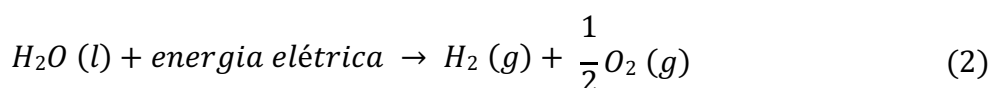
Por outro lado, a eletrólise da água representa uma parcela muito pequena dessa produção, com menos de 0,1%, sendo que a eletricidade utilizada nesse processo vem, predominantemente, de fontes renováveis, como a solar, eólica e hidrelétrica (Instituto de Energia, 2023).

Além disso, métodos como a gaseificação, reforma e processos biológicos oferecem alternativas para a produção de hidrogênio a partir de biomassa e biocombustíveis. Abordagens inovadoras que incorporam energia nuclear e solar concentrada estão sendo exploradas para

aplicar ciclos termoquímicos na dissociação da molécula de água, permitindo assim a produção de hidrogênio de forma eficiente.

Conforme aponta Souza e Lima (2022), a eletrólise da água é um processo de separação da molécula de H₂O em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) por meio de diversas rotas de conversão, como os processos termoquímicos, fotoquímicos, fotoeletroquímicos e bioquímicos. Esse processo é reversível, e envolve a aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos imersos em um eletrólito, gerando a corrente elétrica necessária para a decomposição da água.

As reações gerais que ocorrem durante o processo da eletrólise da água para a produção de hidrogênio são descritas pelas Equações 2, 3 e 4:



Essas reações produzem uma mistura de gases H₂ e O₂ em proporções estequiométricas, frequentemente referida como gás HHO, gás hidroxila, oxihidrogênio ou gás de Brown (Silva, 2023).

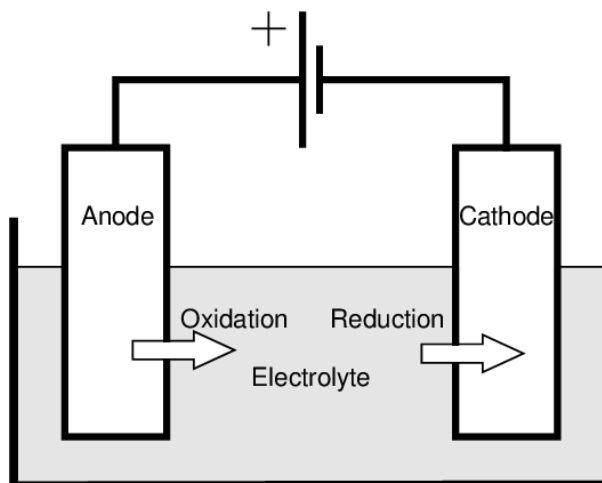
2.4. Célula geradora de gás HHO

Uma célula eletrolítica é uma estrutura fundamental que envolve dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica, possibilitando a ocorrência de reações de oxidação e redução.

A solução eletrolítica, fundamental para melhorar a condutividade elétrica durante o processo de eletrólise, é normalmente composta por uma mistura de água e um eletrólito iônico. Embora o eletrólito não participe diretamente das reações químicas, ele facilita a condução da corrente elétrica entre os eletrodos. Entre os eletrólitos mais comuns estão substâncias ácidas e básicas, como o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e o ácido sulfúrico (H₂SO₄), que são amplamente utilizados devido à sua alta capacidade de dissociação iônica, essencial para aumentar a eficiência da eletrólise (Almeida *et al.*, 2023; Silva e Oliveira, 2023; Zhang *et al.*, 2022).

A Figura 4 apresenta um diagrama esquemático de uma célula eletrolítica, destacando as etapas do processo de eletrólise da água.

Figura 4 - Célula eletrolítica.



Fonte: Brossard, A.; Bunker, R., 2021.

Conforme apontado por Ferreira *et al.* (2023), um dos principais obstáculos na eletrólise da água é o alto consumo de energia, o que torna a produção de hidrogênio uma alternativa cara. Para superar esse desafio, uma abordagem promissora é a combinação do processo de eletrólise com fontes de energia renováveis, como a energia solar ou eólica. Essa integração não apenas reduz os custos operacionais, mas também contribui para a sustentabilidade do processo, tornando a produção de hidrogênio ambientalmente atrativo.

Os geradores de HHO são classificados em dois tipos principais, com base em sua construção: as células úmidas (*wet cell*) e as células secas (*dry cell*). Nas células úmidas, os eletrodos estão conectados e submersos na solução eletrolítica. Embora apresentem uma produção de gás HHO superior em comparação às células secas, essas células enfrentam o problema da acumulação de bolhas de oxigênio nos ânodos, que podem levar à corrosão dos eletrodos metálicos. Além disso, a dissipação de calor é menos eficiente, resultando em menor eficácia do sistema (Silva, senevirathne e Warnasooriya, 2015).

As células secas, em comparação com as células úmidas, apresentam uma estrutura onde os eletrodos são mantidos isolados da solução eletrolítica, que fica armazenada em um compartimento separado conectado ao gerador. Nesse sistema, a solução circula durante o processo de produção de gás HHO, ajudando a dissipar o calor gerado pela reação. Além disso,

as células secas podem ser configuradas com arranjos bipolares de eletrodos, o que resulta em uma menor corrente elétrica necessária para gerar o gás, aprimorando a eficiência do processo (Pereira *et al.*, 2024).

Uma análise conduzida por Rocha e Oliveira (2024) investigou as diferenças entre geradores de células secas e úmidas, considerando fatores como a concentração de NaOH, a configuração dos eletrodos, e as condições operacionais, incluindo corrente elétrica, tensão e temperatura.

Os resultados do estudo indicaram que as células secas não só geram maior volume de gás HHO sob condições operacionais semelhantes, mas também se destacam por uma gestão mais eficaz do calor gerado e menor desgaste dos eletrodos, o que resulta em maior durabilidade e eficiência.

Além disso, as células secas oferecem uma vantagem significativa em termos de manutenção, uma vez que seu design compacto facilita a operação e reduz os custos, tornando-as uma solução viável para aplicações industriais e experimentais em grande escala (Costa *et al.*, 2024).

2.4.1. Variáveis que afetam a eficiência da eletrólise

A eletrólise é um processo eletroquímico que utiliza a corrente elétrica para promover reações químicas não espontâneas, sendo amplamente utilizado na produção de gases como hidrogênio e oxigênio, além da eletrodeposição de metais.

A eficiência deste processo é influenciada por diversas variáveis, que podem ser agrupadas em categorias como características dos eletrodos, propriedades do eletrólito, condições operacionais e variáveis ambientais.

A eficiência do processo de eletrólise é fortemente influenciada por uma série de fatores operacionais, como a qualidade do eletrólito, o material e a configuração dos eletrodos, a corrente elétrica aplicada, além das condições de temperatura e pressão no sistema (Nascimento *et al.*, 2023).

A escolha do tipo e concentração do eletrólito é particularmente importante, pois ela afeta diretamente a condutividade iônica, um fator crucial para a eficácia das reações eletroquímicas.

Eletrólitos com concentrações mais altas favorecem uma maior condutividade, facilitando a transferência de íons e, conseqüentemente, aumentando o número de reações que ocorrem na célula eletrolítica.

Entre os eletrólitos mais utilizados estão soluções de hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e cloreto de sódio (NaCl), sendo os compostos alcalinos os mais escolhidos devido à sua eficiência e menor corrosividade (Martins *et al.*, 2024).

Outro aspecto crucial é o material utilizado para os eletrodos. Eletrodos que não contaminem o gás HHO gerado e que sejam resistentes à corrosão são fundamentais para garantir a longevidade do sistema e reduzir os custos de manutenção. Embora metais nobres, como platina e ouro, apresentem excelente resistência à corrosão e alta atividade eletroquímica, seu custo elevado limita sua aplicação em larga escala.

Em contraste, materiais como o aço inoxidável, que apresentam uma boa resistência à corrosão a um custo mais acessível, têm sido amplamente empregados, especialmente em sistemas de eletrólise de pequena e média escala (Silva *et al.*, 2024).

A temperatura também desempenha um papel significativo na eficiência do processo. Em condições de altas temperaturas, a resistência do eletrólito e dos eletrodos pode aumentar, o que pode diminuir a eficiência da eletrólise e causar a evaporação da água, prejudicando a operação. Em sistemas alcalinos, a faixa de temperatura ideal geralmente varia entre 40 e 90 °C, sendo que temperaturas mais altas podem acelerar as reações, mas também exigem um controle cuidadoso para evitar perdas de eficiência.

Adicionalmente, a operação sob pressões elevadas pode resultar em bolhas de hidrogênio menores, o que reduz as perdas ôhmicas e aumenta a solubilidade do gás na solução, otimizando a produção de hidrogênio (Souza *et al.*, 2024).

Os parâmetros operacionais, como a corrente elétrica aplicada, a tensão e o tempo de operação, são cruciais para determinar a eficiência do processo de eletrólise. Uma corrente elétrica muito alta pode causar superaquecimento e danos aos eletrodos, enquanto uma corrente muito baixa pode resultar em uma produção ineficiente de gás.

A tensão aplicada deve ser suficiente para superar a tensão de decomposição dos compostos presentes, e a otimização desses parâmetros é essencial para maximizar a eficiência do sistema. Além disso, o controle do tempo de operação é fundamental, já que uma eletrólise prolongada pode levar a perdas de energia e a uma diminuição da eficiência.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Reator Eletrolítico

O reator eletrolítico foi desenvolvido a partir da carcaça de um filtro de água de acrílico, com um diâmetro interno de 8,0 cm e altura de 20,0 cm, proporcionando um volume útil de 1000 mL. O uso de acrílico é vantajoso devido a sua resistência química e transparência, que permite observar as interações no interior do reator. Na tampa superior do reator foram feitos dois furos com diâmetro de 6,3 mm para a inserção dos eletrodos e um furo na lateral para a coleta do gás produzido.

Os eletrodos são de formato cilíndrico, com diâmetro de 1/4 in e comprimento na região interna do reator em torno de 230 mm. Os eletrodos foram posicionados de modo a ficar 5 cm acima do fundo do reator para manter o contato iônico entre a região anódica e a região catódica. Desse modo, a região inferior do reator ficou livre para possibilitar o fluxo de íons e permitiu que a corrente elétrica pudesse circular nos eletrodos.

A Figura 5 mostra o reator eletrolítico (célula eletrolítica) desenvolvido para a produção de gás HHO.

Figura 5 - Reator eletrolítico



Fonte: Elaborado pelo autor.

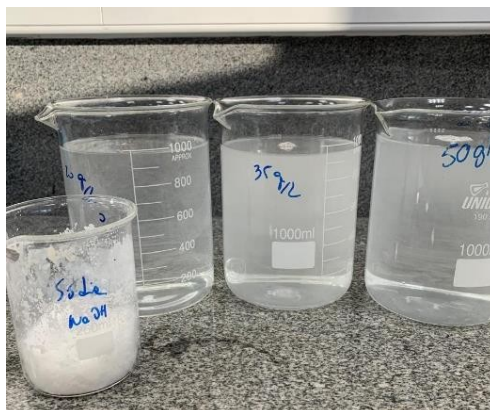
3.2. Aparato experimental

O desempenho do sistema de geração de gás HHO foi analisado para diferentes concentrações de dois eletrólitos, hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH),

bem como eletrodos de materiais diferentes, sendo eles, aço inox 304, alumínio, latão e cobre.

As soluções eletrolíticas empregadas nos testes foram preparadas utilizando água deionizada e hidróxido de sódio (NaOH) e água deionizada e hidróxido de potássio (KOH), em concentrações de 20, 35 e 50 g/L. A Figura 6 mostra as soluções de NaOH preparadas para os experimentos.

Figura 6 - Soluções eletrolíticas de NaOH.



Fonte: Próprio Autor

O fornecimento de energia necessária para o processo de eletrólise foi feito a partir da utilização de uma fonte retificadora com entrada de corrente alternada (CA) e tensão de saída em corrente contínua (CC) de 12V com uma corrente máxima de 30 A. A Figura 7 mostra a fonte utilizada nos experimentos.

Figura 7 - Fonte de alimentação.



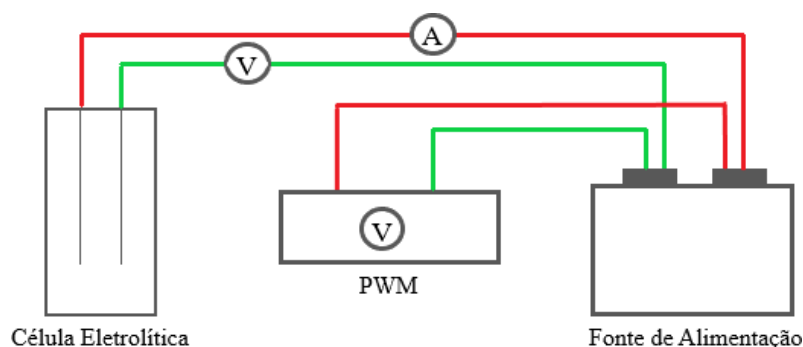
Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de analisar o efeito da tensão e corrente na geração de gás HHO, foi utilizado um dispositivo PWM (*Pulse Width Modulation*) de 12 V e 30 A, que permite a variação da tensão e corrente para otimizar o processo, haja vista que este dispositivo ajusta a largura dos pulsos,

restringindo a corrente utilizada pelo reator eletrolítico, de modo a permitir a variação da corrente utilizada de 0 a 30 A.

A Figura 8 apresenta o diagrama esquemático da bancada de testes utilizada para avaliar o desempenho do reator eletrolítico para a produção de gás HHO.

Figura 8 - Diagrama esquemático da bancada de testes.

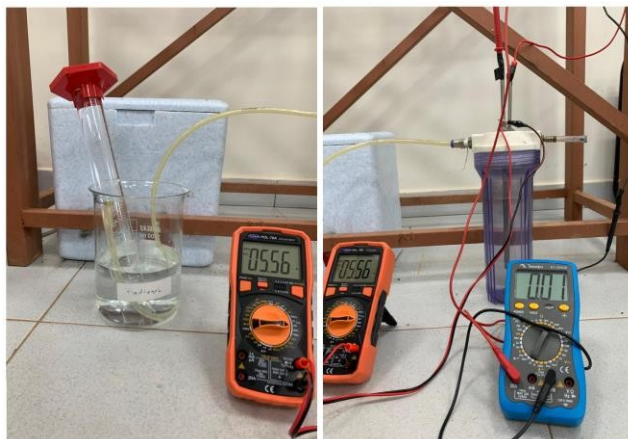


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a medição da tensão e corrente elétrica foram utilizados 2 multímetros e para a medição da temperatura no reator eletrolítico foi utilizado um termômetro infravermelho. A vazão de gás HHO gerado pelo reator eletrolítico foi determinada a partir do método de deslocamento de volume. O gás HHO produzido é direcionado para uma proveta graduada, previamente preenchida com água, e invertida dentro de um béquer contendo água.

A Figura 9 apresenta o sistema para medição de vazão do gás HHO, da tensão e corrente elétrica.

Figura 9 - Medição de vazão do gás HHO, da tensão e corrente elétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. Determinação da Potência e Eficiência do reator eletrolítico

O desempenho do reator eletrolítico foi analisado para diferentes condições de teste, visando analisar o efeito do tipo e concentração de eletrólito, variação de tensão e tipo de eletrodo na produção de gás HHO. A Tabela 2 apresenta as condições de testes adotadas, sendo I_{PWM} e V_{PWM} a corrente elétrica e tensão fornecida pelo PWM.

Tabela 2 - Condições experimentais para análise do reator eletrolítico.

Eletrodo	Concentração (g/L)	Solução	I_{PWM} (A)	V_{PWM} (V)
Aço Inox 304 Alumínio Cobre Latão	20	KOH	2,5	5
		NaOH	2,5	5
		KOH	1,3	4
		NaOH	1,3	4
		KOH	0,9	3
		NaOH	0,9	3
		KOH	0,2	2
		NaOH	0,2	2
Aço Inox 304 Alumínio Cobre Latão	35	KOH	2,5	5
		NaOH	2,5	5
		KOH	1,3	4
		NaOH	1,3	4
		KOH	0,9	3
		NaOH	0,9	3
		KOH	0,2	2
		NaOH	0,2	2
Aço Inox 304 Alumínio Cobre Latão	50	KOH	2,5	5
		NaOH	2,5	5
		KOH	1,3	4
		NaOH	1,3	4
		KOH	0,9	3
		NaOH	0,9	3
		KOH	0,2	2
		NaOH	0,2	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise desses parâmetros é crucial para otimizar a geração de HHO e para uma melhor compreensão do funcionamento do reator eletrolítico. As soluções eletrolíticas foram preparadas previamente, misturando água deionizada com hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações desejadas.

Após a preparação das soluções, os eletrodos foram imersos na mistura, sendo em seguida fornecida a energia (tensão), iniciando assim a produção do gás HHO. A Figura 10 mostra o início da produção das bolhas de gás HHO.

Figura 10 - Início da produção do gás HHO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calcular a potência do reator de HHO foram realizadas medições da tensão nos terminais do reator, V_{fonte} e da corrente elétrica $I_{célula}$ que circula pela célula eletrolítica. Essas medições foram feitas com a ajuda de um multímetro e um amperímetro.

A potência elétrica gerada pela célula eletrolítica pode ser calculada utilizando a Equação 5.

$$P_{reator} = V_{fonte} \times I_{célula} \quad (5)$$

Sendo P_{reator} a potência gerada (em watts), V_{fonte} representa a tensão fornecida pela fonte de alimentação (em volts) e $I_{célula}$ é a corrente que passa pela célula eletrolítica (em amperes) (Yilmaz & Kilic, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

A eficiência do gerador de hidrogênio é determinada pela relação entre o volume de gás HHO produzido e a energia elétrica consumida durante sua produção.

O gás HHO gerado, composto por 2 moles de hidrogênio (H₂) e 1 mol de oxigênio (O₂), tem aproximadamente 66,7% de seu volume composto por hidrogênio (Chen & Liu, 2020). Como o hidrogênio é o único componente utilizado como combustível, a eficiência na produção de HHO pode ser calculada pela Equação 6:

$$\eta_{HHO} = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{consumida}}} \times 100 \quad (6)$$

Sendo η_{HHO} a eficiência do gerador de hidrogênio em percentual (%), $E_{\text{útil}}$ é a energia útil do sistema (W) e $E_{\text{consumida}}$ é a energia consumida pelo sistema (W).

Para calcular a energia útil, utiliza-se a Equação 7. Estes cálculos permitem avaliar o desempenho do sistema em converter energia elétrica em hidrogênio e verificar a viabilidade do uso do HHO como combustível.

$$E_{\text{útil}} = m_{HHO} \times PCI \quad (7)$$

Em que m_{HHO} é a vazão mássica (kg/s) e PCI é o Poder Calorífico Inferior ($\approx 120\text{MJ/m}^3$).

Para obter a vazão mássica do sistema utiliza-se a Equação 8.

$$m_{HHO} = Q_{HHO} \times D_{HHO} \quad (8)$$

Sendo D_{HHO} a densidade ($\approx 0,0838 \text{ kg/m}^3$) e Q_{HHO} a vazão de gás HHO.

Para calcular a energia consumida faz-se uso da Equação 9.

$$E_{\text{consumida}} = P_{\text{gerador}} \times t \quad (9)$$

Onde P_{gerador} é a Potência do gerador (W) e t é o tempo (s) da reação.

3.4. Simulação da produção de gás HHO

A simulação de dados é uma etapa relevante do processo pois permite analisar o comportamento dos dados obtidos experimentalmente, garantindo a avaliação das variáveis que influenciam na produção de gás HHO.

Para realizar a simulação foi utilizado o *software* Matplotlib. Para isso, foram definidas as principais variáveis a serem analisadas, que incluem o tipo de eletrodo (aço inoxidável, alumínio, cobre, latão), a solução eletrolítica (NaOH ou KOH), a concentração das soluções (20 g/L, 35 g/L, 50 g/L) e os parâmetros operacionais (corrente, tensão e potência).

O Matplotlib é uma biblioteca de visualização de dados em Python utilizada para criar gráficos estáticos, interativos e animados. Sua lógica é baseada em uma estrutura orientada a objetos, onde figuras contêm eixos, e cada eixo é usado para plotar dados. A biblioteca oferece uma ampla variedade de gráficos, como de linhas, dispersão, barras e histogramas, que podem ser personalizados em termos de cores, tipos de linha, títulos, eixos e outras características visuais.

O Matplotlib se integra bem com outras bibliotecas, permitindo a manipulação de dados antes de sua visualização. Por meio de gráficos detalhados é possível visualizar e interpretar os resultados das simulações, além de comparar diferentes cenários e parâmetros.

O modelo computacional foi desenvolvido para simular as condições de operação do reator eletrolítico, a partir da Equação 5, para calcular a produção de gás HHO, em ml/min, com base nas medições de corrente e tensão, assim como a potência gerada.

Foi montado um *script*, apresentado no Anexo 1, no *software* Matplotlib onde foi possível simular a produção do gás HHO no período de 1h.

A simulação foi executada considerando diferentes cenários, permitindo a análise da produção de HHO sob várias combinações de eletrodos e soluções, e a partir da simulação é possível indicar qual o melhor eletrodo e concentração para a produção do gás HHO por minuto.

A simulação também possibilita a identificação de combinações otimizadas de materiais e condições operacionais.

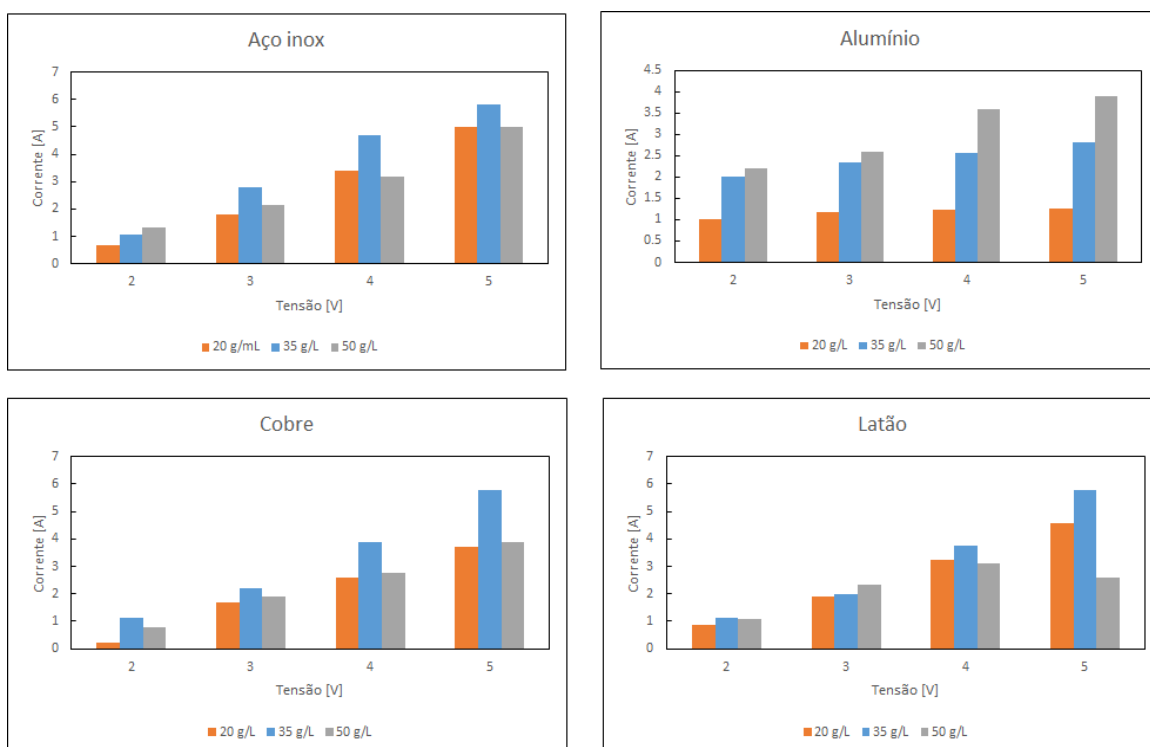
Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais para validar a precisão do modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados obtidos utilizando o eletrólito NaOH

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam os resultados obtidos da corrente, vazão de gás HHO e potência para cada um dos eletrodos utilizando o eletrólito NaOH.

Figura 11 - Corrente versus tensão utilizando o eletrólito NaOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 11 verifica-se que uma variação na tensão da célula conduz a variação de corrente, respeitando a lei de Ohm, onde a corrente que flui por um resistor é proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional ao valor de sua resistência.

Verifica-se ainda, que o valor da corrente sofre uma variação com o aumento da concentração da solução de NaOH gerado pela resistividade elétrica da solução e condutividade elétrica dos materiais, demonstrando que quanto maior a concentração da solução eletrolítica utilizada, maior será a corrente obtida para os eletrodos.

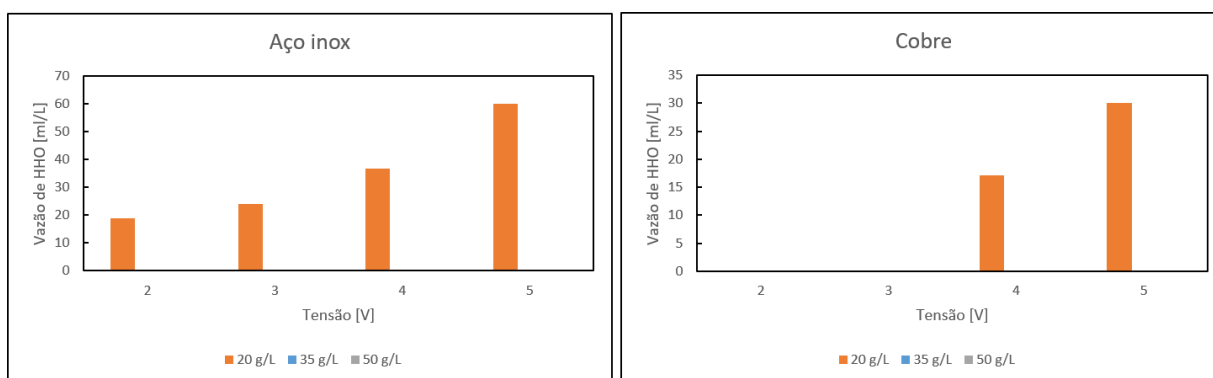
De modo geral, um aumento na tensão conduz a um aumento na corrente e um aumento na concentração da solução eletrolítica utilizada conduz a aumento da corrente obtida para uma mesma tensão.

Verifica-se que para a utilização de diferentes concentrações e diferentes eletrodos, a corrente se altera de maneira diferente para cada material, entretanto todos os eletrodos apresentaram o mesmo comportamento.

Para o aço inox, cobre e latão, a máxima corrente foi obtida para a concentração de 35g/L e tensão de 5V, sendo a corrente igual a 5,8 A. Para o alumínio, a máxima corrente foi obtida para a concentração de 35g/L e tensão de 5V, sendo a corrente igual a 3,9.

De modo geral, para todos os eletrodos e para todas as concentrações de solução foi possível observar produção de gás HHO, entretanto, para os eletrodos de alumínio e latão, bem como concentrações de 35 e 50g/L, a quantidade de gás produzido foi extremamente baixa, não sendo possível realizar a sua quantificação. Desse modo, foi possível medir a vazão somente para o aço inox e o cobre.

Figura 12 - Vazão de gás HHO versus tensão utilizando o eletrólito NaOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

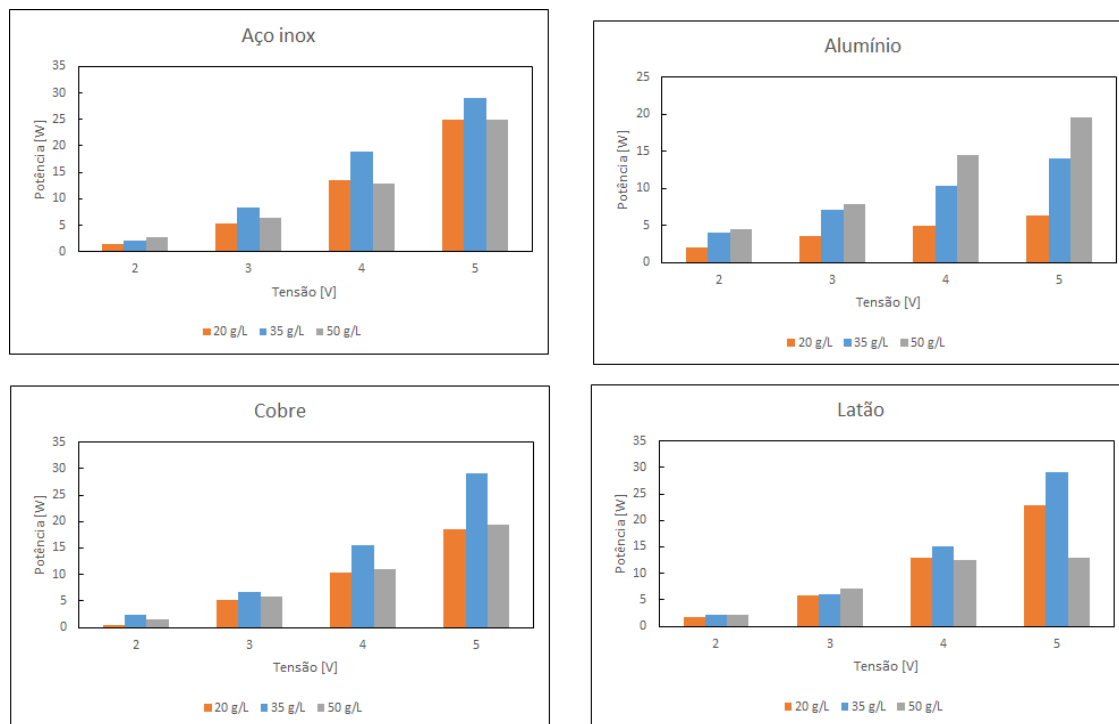
A partir da Figura 12 verifica-se que um aumento na tensão conduz a um aumento na vazão de gás, de modo que a vazão máxima foi de 60ml/L para o aço inox e 30ml/L para o cobre, sob uma tensão de 5V.

A partir da Figura 13 verifica-se que um aumento na tensão conduz a um aumento na potência da célula. Quanto maior a tensão aplicada e maior a concentração da solução, maior a potência gerada.

Cabe ressaltar que a concentração de 35g/L de NaOH forneceu a maior potência para os eletrodos de aço inox, cobre e latão, sendo a potência igual a 29 W. Para o eletrodo de alumínio,

a máxima potência foi de 19,5 W para a concentração de 50g/L de NaOH.

Figura 13 - Potência versus tensão utilizando o eletrólito NaOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse dos dados de vazão e do Poder Calorífico Inferior do gás HHO é possível a determinação da eficiência na produção de hidrogênio para os diferentes eletrodos e concentrações de eletrólito. A partir dos resultados obtidos é possível observar uma tendência e algumas contradições em relação à expectativa de que a eficiência aumente com a potência aplicada.

Para realizar os cálculos de eficiência do gerador de gás HHO foi utilizada a Equação 6, sabendo que:

- Q_{HHO} é a vazão do HHO em m^3/min (convertido de ml/min),
- PCI_{HHO} é o Poder Calorífico Inferior do HHO,
- $P_{gerador}$ é a potência consumida em W.

Abaixo, encontra-se uma exemplificação dos cálculos realizados para obter a eficiência do gerador para a solução eletrolítica NaOH.

Para o eletrodo de Aço Inox 304 na Vazão = 60,00 ml/min e Potência = 25 W:

1. Vazão em m³/min:

$$Q_{HHO} = 60 \times 0,0838 = 5,028 \text{ m}^3/\text{min}$$

2. Energia útil do HHO:

$$\text{Energia útil} = 5,028 \times 120 = 603,36 \text{ J}$$

3. Energia consumida:

$$\text{Energia consumida} = 25 \times 60 = 1500 \text{ J}$$

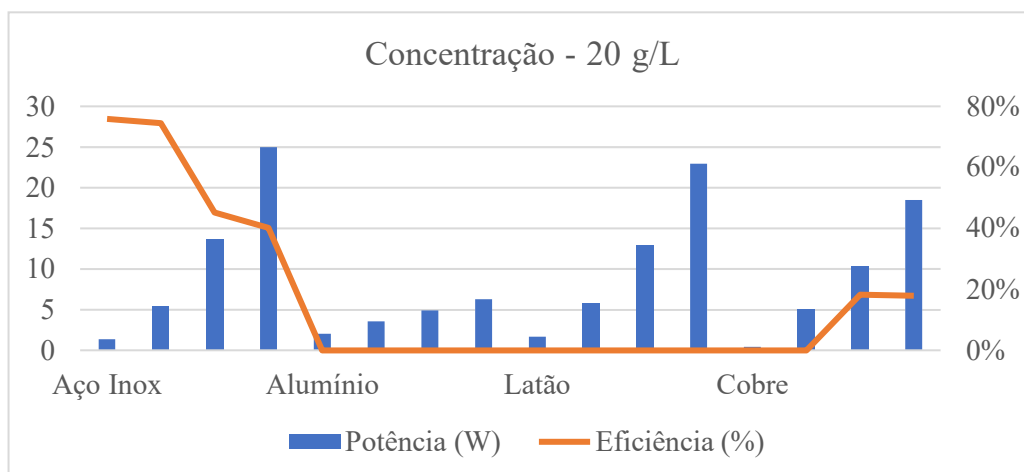
4. Eficiência:

$$\eta = \frac{603,36}{1500} \times 100 = 40\%$$

Nota-se que, devido ao curto tempo adotado para realizar os experimentos (6 minutos para todas as condições), a única concentração que produziu o gás HHO foi a de 20 g/L. Foi adotado um tempo de 6 minutos por experimento, para garantir que todas as condições experimentais sejam tratadas da mesma maneira. Isso se deve ao fato de que concentrações maiores requerem um tempo maior para iniciar a produção de HHO. Os eletrodos que tiveram produção significativa de HHO foi o aço inox 304 e o cobre.

A Figura 14 apresenta a eficiência energética (η) em relação à potência (W) do gerador.

Figura 14 - Eficiência utilizando a solução de NaOH.



Fonte: Próprio Autor

A partir da Figura 14 verifica-se que para a concentração de 20 g/L, o aço inox 304

obteve a maior eficiência de 76% a 1,38 W, sendo o melhor desempenho observado. O cobre apresentou eficiência de 18% a 17,14 W. Contudo, em potências mais altas, a eficiência diminui, evidenciando que, embora o aumento de potência inicialmente melhore a eficiência, há uma queda à medida que a potência cresce. Isso pode ser atribuído a perdas térmicas e à resistência do eletrólito, que limitam a conversão de energia em hidrogênio.

A Tabela 3 apresenta os valores da temperatura média no reator eletrolítico para cada eletrodo e concentração da solução NaOH.

Tabela 3 - Temperatura média no reator eletrolítico utilizando o eletrólito NaOH.

Eletrodo	Concentração (g/L)	Temperatura (°C)
Aço inox	20	26,75
	35	26,33
	50	27,28
Alumínio	20	25,40
	35	25,95
	50	25,95
Latão	20	28,10
	35	28,83
	50	28,80
Cobre	20	27,48
	35	27,32
	50	26,73

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que, para o mesmo eletrodo, a temperatura média no reator eletrolítico não tem variação significativa, sendo praticamente independente da concentração da solução de eletrólito.

4.2. Resultados obtidos utilizando o eletrólito KOH

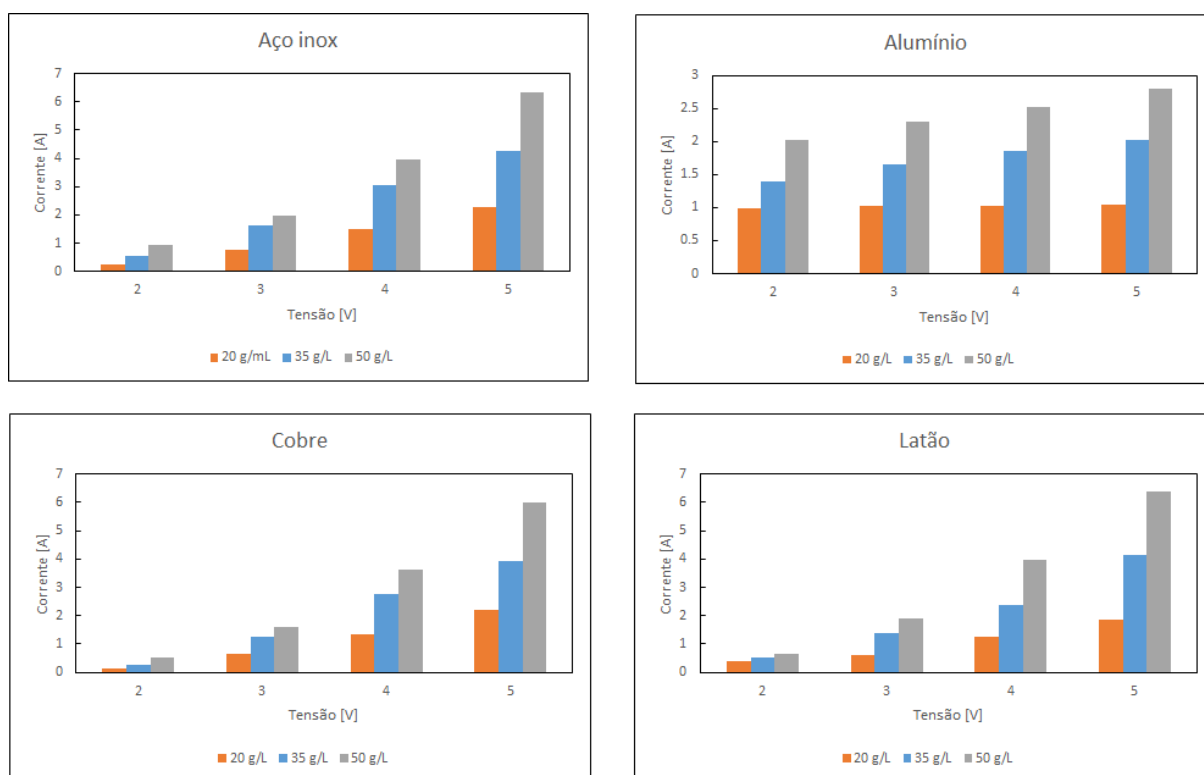
As Figuras 15, 16 e 17 apresentam resultados obtidos para cada um dos eletrodos utilizando o eletrólito KOH.

A partir da Figura 15 verifica-se que, ao utilizar a solução eletrolítica de KOH, um

aumento na tensão aplicada no eletrodo conduz a um aumento na corrente, bem como um aumento na concentração da solução de KOH conduz a um aumento no valor da corrente.

Pode-se observar que, para os 4 eletrodos, quanto maior a concentração da solução eletrolítica utilizada, maior a corrente obtida. A partir das análises do gráfico, observa-se que a corrente aumenta significativamente com o aumento da tensão e o aumento da concentração, tornando o estudo desses gráficos importantes para o do estudo da corrente, pois com a utilização de diferentes concentrações e com diferentes eletrodos, a corrente se altera de maneira consistente.

Figura 15 - Corrente versus tensão utilizando o eletrólito KOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, todos os eletrodos apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, um aumento da tensão e da concentração resulta no aumento do valor da corrente elétrica.

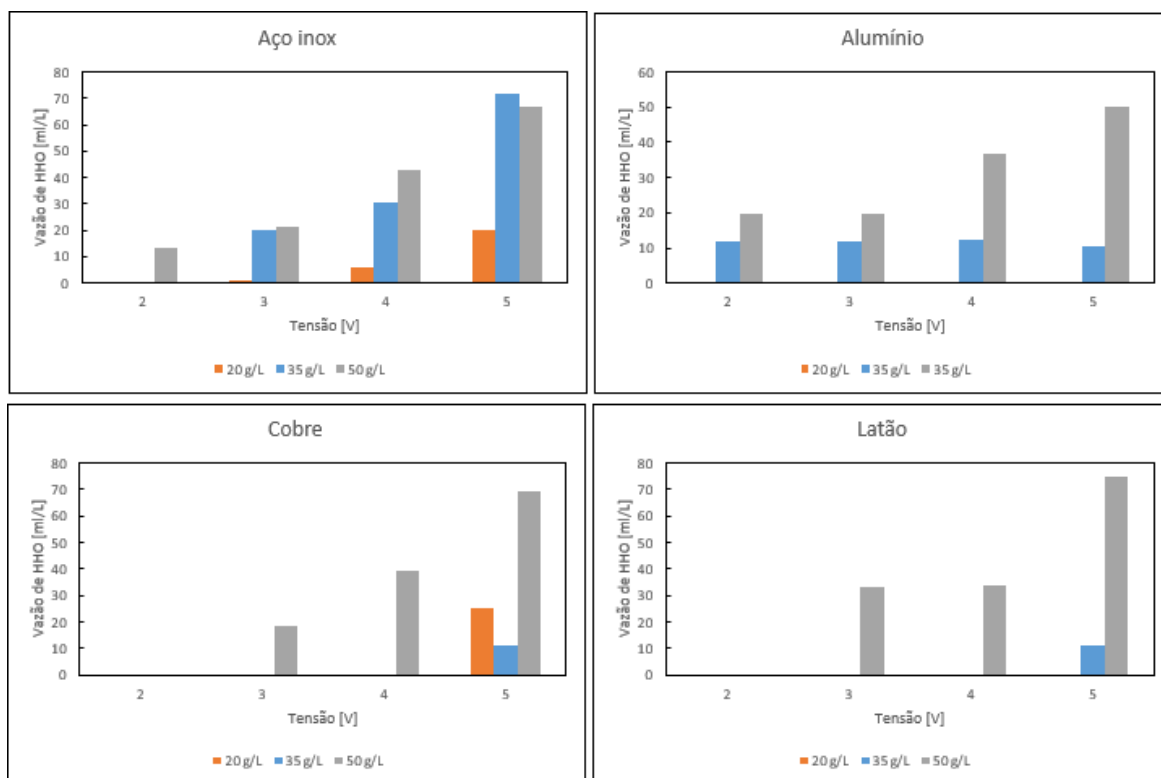
Para todos os eletrodos, a máxima corrente foi obtida para a tensão de 5V e concentração de 50g/L de KOH sendo os valores máximos de 6,31 A para o aço inox, 2,8 A para o alumínio, 6 A para o cobre e 6,4 A para o latão.

Assim, para todos os eletrodos e para todas as concentrações de solução de KOH foi

possível observar a produção de gás HHO, entretanto, para determinadas condições de testes, a quantidade de gás produzida foi extremamente baixa, não sendo possível realizar a sua quantificação.

A partir da Figura 16 verifica-se que a solução eletrolítica de KOH com concentração 20g/L não obteve um resultado tão significativo, sendo possível observar uma vazão de HHO sob condições de 35g/L e 50g/L.

Figura 16 - Vazão de gás HHO versus tensão utilizando o eletrólito KOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto a tensão, observa-se que quanto maior a tensão, maior a produção de gás HHO, que está diretamente relacionada a maiores concentrações da solução. O material dos eletrodos também tem influência na produção do gás, sendo que materiais mais nobres produzem em menores concentrações, porém em altas tensões.

De modo geral, a maior produção de gás foi obtida para o eletrodo de latão sob a tensão de 5 V e a concentração de 50g/L, atingindo 75 ml/min.

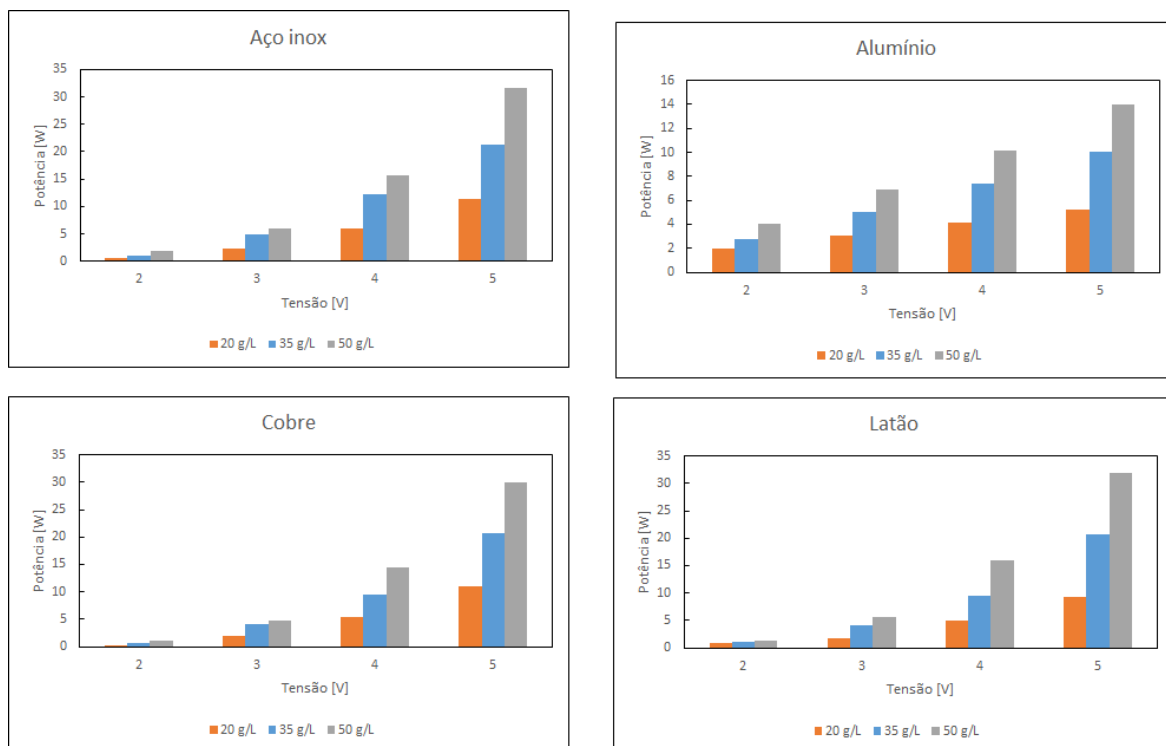
A partir da Figura 17 verifica-se que a solução de KOH tem um comportamento mais estável quando comparado com a solução de NaOH.

De modo geral, um aumento na tensão conduz a um aumento na potência, conforme era

esperado, assim como uma concentração mais alta resulta em uma potência maior.

Para o eletrodo de alumínio obteve-se uma potência aproximada de 6W em uma concentração de 20g/L, e uma potência de 14W em uma concentração de 50g/L, sob uma tensão de 5V.

Figura 17 – Potência versus tensão utilizando o eletrólito KOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma como realizado para a solução de NaOH, abaixo encontra-se uma exemplificação dos cálculos para obter a eficiência do gerador para a solução eletrolítica KOH, a partir da Equação 6.

Eletrodo de Alumínio, concentração de 50 g/L para Vazão = 18,56 ml/min e Potência = 4,83 W:

1. Vazão em m³/min:

$$D_{HHO} = 18,56 \times 0,0838 = 1,5553 \text{ m}^3/\text{min}$$

2. Energia útil do HHO:

$$\text{Energia útil} = 1,5553 \times 120 = 186,639 \text{ J}$$

3. Energia consumida:

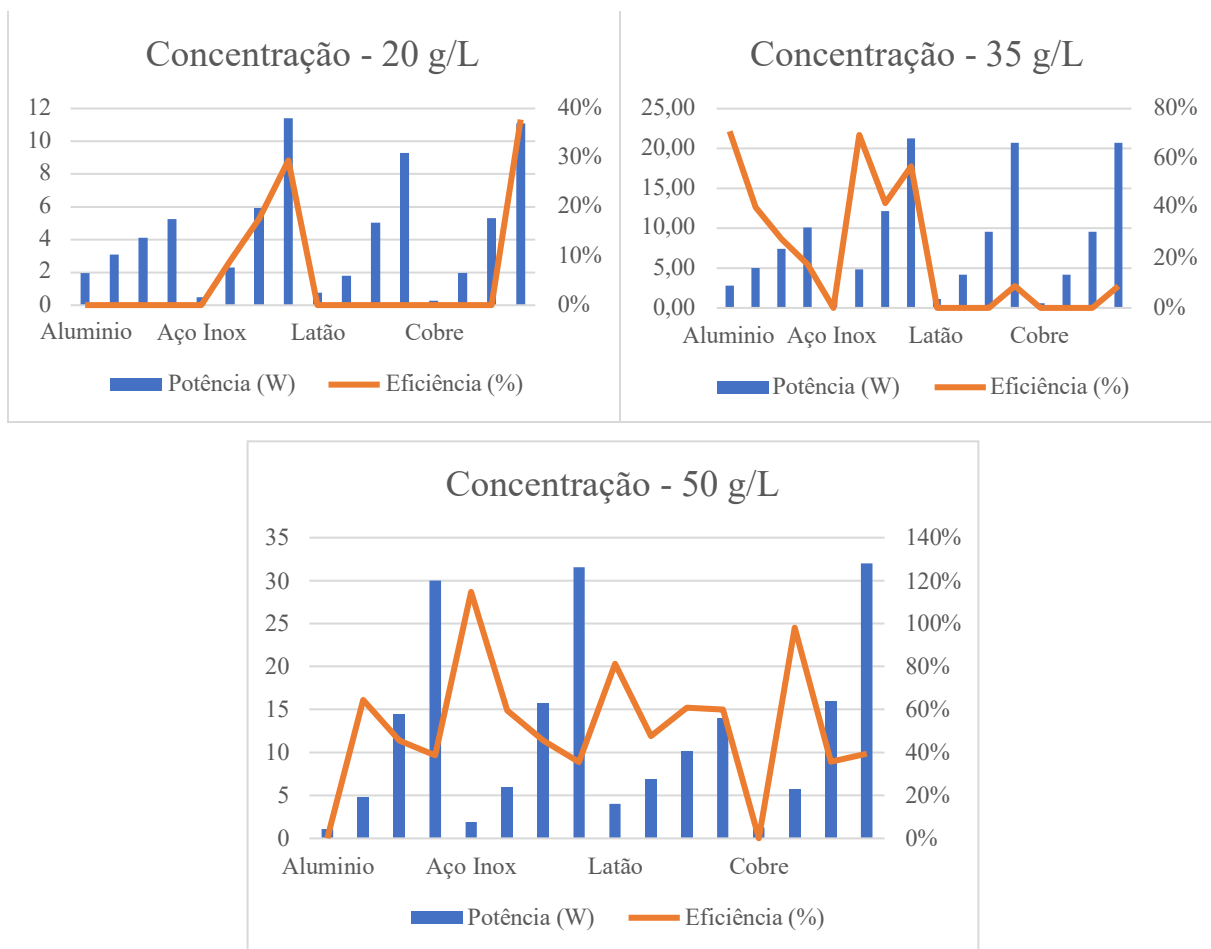
$$Energia\ consumida = 4,83 \times 60 = 289,8 \text{ J}$$

4. Eficiência:

$$\eta = \frac{186,639}{289,8} \times 100\% = 64\%$$

A Figura 18 apresenta a eficiência do gerador utilizando a solução de KOH. Experimentos também utilizar o tempo de 6 minutos para se medir a vazão de gás HHO produzido.

Figura 18 - Eficiência do gerador utilizando a solução de KOH



Fonte: Próprio Autor

A partir da Figura 18 nota-se que a eficiência para a solução de KOH foi muito superior em comparação com a de NaOH, com todas as três concentrações apresentando a produção do gás HHO.

A concentração de 50 g/L apresentou o melhor resultado, com todos os eletrodos

produzindo hidrogênio com a eficiência estando diretamente relacionada com a potência aplicada. Para esta solução, o eletrodo que apresentou a melhor eficiência foi o eletrodo de cobre, na concentração de 50 g/L, com aproximadamente 90% de eficiência na produção do gás.

A Tabela 4 apresenta os valores da temperatura média no reator eletrolítico para cada eletrodo e concentração da solução KOH.

Tabela 4 – Temperatura média no reator eletrolítico utilizando o eletrólito KOH.

Eletrodo	Concentração (g/L)	Temperatura (°C)
Aço inox	20	27,80
	35	26,73
	50	26,76
Alumínio	20	29,25
	35	27,95
	50	27,01
Latão	20	28,75
	35	28,83
	50	27,03
Cobre	20	29,30
	35	30,98
	50	29,24

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, verifica-se o mesmo comportamento observado na utilização do eletrólito NaOH, ou seja, as temperaturas não variam para o mesmo eletrodo.

A Figura 19 demonstra os eletrodos após as reações químicas de oxirredução utilizando a solução de eletrólito KOH. Observa-se que o lado direito do eletrodo apresenta maior alteração devido ao aumento da reação de oxidação no ânodo. Isso pode ser explicado pelo processo de oxirredução, essencial na eletrólise para a produção de hidrogênio. No ânodo, os elétrons são removidos dos átomos do eletrodo, formando íons metálicos que se combinam com o oxigênio gerado, resultando na formação de compostos óxidos (Rydberg et al., 2016). À medida que a corrente elétrica aumenta, a reação de oxidação se intensifica, acelerando a formação de óxidos metálicos e comprometendo a eficiência do eletrodo (Zhu et al., 2019).

Esse efeito é mais pronunciado no lado direito da Figura 19, onde a corrente é mais alta, o que pode prejudicar a superfície do eletrodo e reduzir a eficiência na produção de hidrogênio.

Figura 19 - Eletrodos após as reações químicas de oxirredução utilizando a solução de eletrólito KOH: (a) Alumínio, (b) Aço Inox, (c) Latão e (d) Cobre



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. Resultados obtidos da simulação numérica

Utilizando um modelo computacional, foram gerados dados representativos com base nas condições experimentais estabelecidas, como o tipo de eletrodo, solução eletrolítica, concentrações e variáveis operacionais (corrente, tensão e potência). A Tabela 5 apresenta os dados, calculados por meio da simulação numérica, da produção do gás HHO, em ml/min, no

período de 1h.

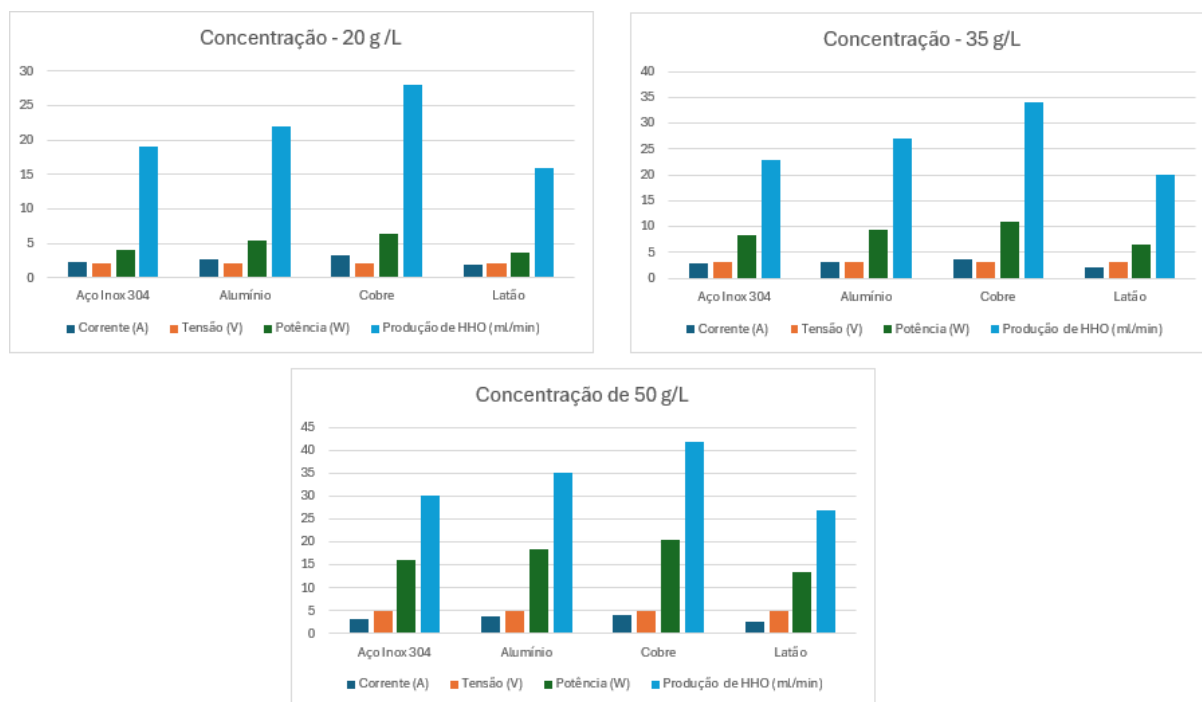
Tabela 5 – Apresentação dos dados obtidos meio da simulação numérica.

Eletrodo	Solução	Concentração (g/L)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Produção (ml/min)
Aço Inox 304	KOH	50	3,5	5	17,5	33
Aço Inox 304	NaOH	50	3,2	5	16,0	30
Aço Inox 304	KOH	35	3,0	3	9,0	26
Aço Inox 304	NaOH	35	2,8	3	8,4	23
Aço Inox 304	KOH	20	2,5	2	5,0	21
Aço Inox 304	NaOH	20	2,3	2	4,0	19
Alumínio	KOH	50	4,0	5	20,0	38
Alumínio	NaOH	50	3,7	5	18,5	35
Alumínio	KOH	35	3,5	3	10,5	31
Alumínio	NaOH	35	3,1	3	9,3	27
Alumínio	KOH	20	3,0	2	6,0	25
Alumínio	NaOH	20	2,7	2	5,4	22
Cobre	KOH	50	4,5	5	22,5	45
Cobre	NaOH	50	4,1	5	20,5	42
Cobre	KOH	35	4,0	3	12,0	38
Cobre	NaOH	35	3,6	3	10,8	34
Cobre	KOH	20	3,5	2	7,0	30
Cobre	NaOH	20	3,2	2	6,4	28
Latão	KOH	50	3,0	5	15,0	29
Latão	NaOH	50	2,7	5	13,5	27
Latão	KOH	35	2,5	3	7,5	22
Latão	NaOH	35	2,2	3	6,6	20
Latão	KOH	20	2,0	2	4,0	18
Latão	NaOH	20	1,8	2	3,6	16

Fonte: Próprio Autor

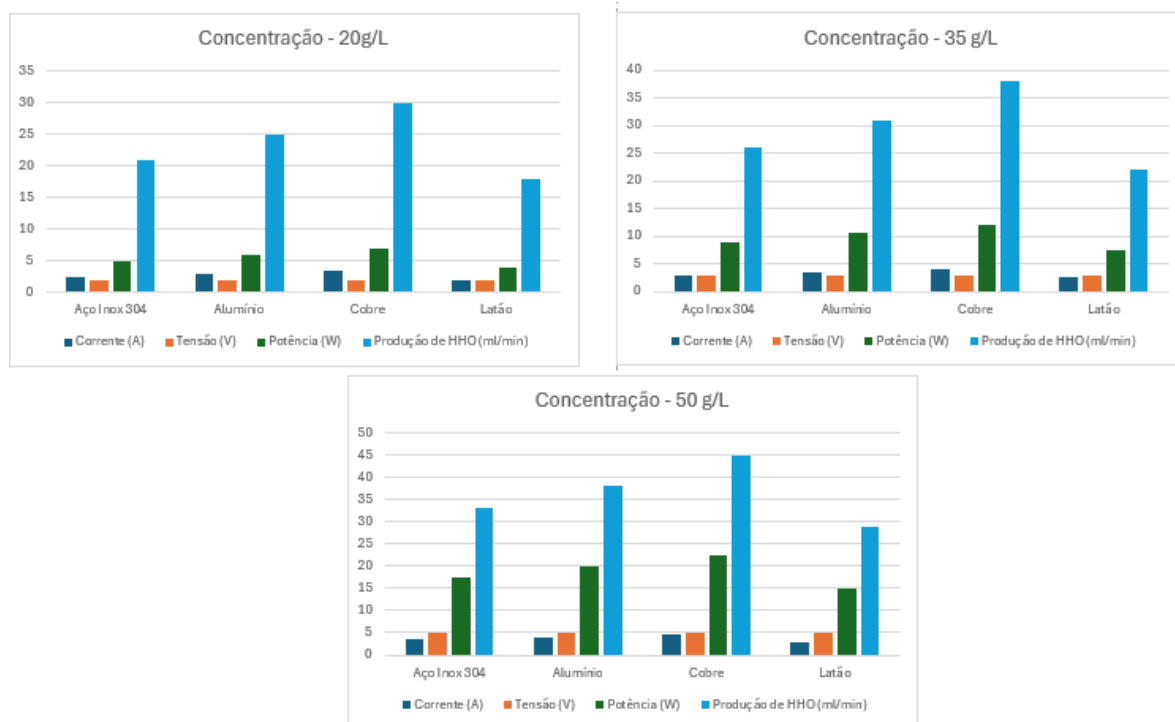
As Figuras 20 e 21 apresentam os resultados obtidos da simulação para a corrente, vazão de gás HHO e potência para as mesmas condições adotadas nos ensaios experimentais para cada eletrólito.

Figura 20 - Resultados obtidos da simulação para a solução de NaOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Resultados obtidos da simulação para a solução de KOH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, os resultados demonstram uma variação na produção de gás HHO em função do tipo de eletrodo e da solução eletrolítica utilizada. Verifica-se que o eletrodo de cobre apresentou o melhor desempenho, com uma produção máxima de 45 ml/min quando combinado com KOH a 50 g/L.

Em contrapartida, o latão mostrou-se o menos eficiente, com uma produção máxima de apenas 29 ml/min, também utilizando KOH a 50 g/L.

Importante observar-se o impacto das soluções eletrolíticas. A solução de KOH revelou um desempenho superior em comparação com a solução de NaOH em todas as concentrações testadas.

Por exemplo, a produção de HHO com KOH a 50 g/L e aço inox foi de 33 ml/min, enquanto com NaOH a mesma concentração produziu apenas 30 ml/min. Essa tendência se manteve nas concentrações de 35 g/L e 20 g/L, evidenciando a eficácia do KOH como eletrólito em comparação com NaOH.

O efeito da concentração do eletrólito também desempenhou um papel crucial na eficiência da produção de hidrogênio.

Aumentos nas concentrações de KOH resultaram em uma maior produção de HHO, como evidenciado pelos dados:

- Com KOH a 50 g/L, a produção de H₂ com cobre alcançou 45 ml/min.
- A 35 g/L, a produção caiu para 38 ml/min, e a 20 g/L, reduziu para 30 ml/min.

Essa relação mostra que concentrações mais altas favorecem a reação eletrolítica, mas também é necessário considerar a eficiência energética. Em algumas instâncias, a eficiência energética pode ser comprometida por concentrações excessivamente altas, que podem aumentar a resistência no sistema.

Por meio dos dados obtidos é possível realizar uma comparação entre materiais dos eletrodos, os eletrodos de cobre e alumínio mostraram-se os mais eficientes na produção de HHO, enquanto o aço inox e o latão tiveram desempenhos inferiores. Os resultados indicam que:

- **Cobre:** Produção máxima de 45 ml/min com KOH a 50 g/L.
- **Alumínio:** Máxima produção de 38 ml/min sob as mesmas condições.
- **Aço inox:** Produção máxima de 33 ml/min, evidenciando que, apesar de ser um material comum, sua eficiência é inferior à do cobre e do alumínio.
- **Latão:** Consistentemente o menos eficiente, com uma produção máxima de 29

ml/min.

Esses resultados sugerem que a condutividade elétrica e a reatividade dos materiais utilizados como eletrodos têm um impacto significativo na eficiência do processo de eletrólise.

A potência calculada para cada condição experimental mostra que o cobre e o alumínio não só produziram mais H_2 , mas também apresentaram potências mais altas (22,5 W e 20 W, respectivamente, para KOH a 50 g/L). A relação entre a potência e a produção de H_2 é um indicativo de eficiência do sistema. A análise da potência em relação à corrente e tensão sugere que materiais com melhor condutividade proporcionam maior geração de energia, traduzindo-se em mais produção de hidrogênio.

Por fim, com base nos dados, a melhor situação para a produção do gás HHO é com uso do eletrodo de cobre em solução de KOH na concentração de 50g/L aplicando uma tensão de 5V. Nesta condição, a produção de hidrogênio é de 45 ml/min.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada no presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de diferentes materiais de eletrodos e soluções eletrolíticas para a produção de hidrogênio (HHO) através do processo de eletrólise. Foram utilizadas soluções de NaOH e KOH, com diferentes concentrações, para avaliar a eficiência dos eletrodos de alumínio, latão, aço inox e cobre. Os resultados obtidos demonstraram que a eficiência da produção de hidrogênio é fortemente influenciada tanto pelo tipo de eletrólito quanto pelo material do eletrodo, além da tensão aplicada e da concentração da solução.

O reator, feito de material acrílico, demonstrou estabilidade durante a produção de hidrogênio. Cada tipo de eletrodo e cada solução eletrolítica teve um desempenho distinto, dependendo da concentração utilizada.

Observou-se que, em geral, o aumento da tensão e da concentração da solução eletrolítica resulta a um aumento na corrente elétrica e, conseqüentemente, na produção de hidrogênio. Entre os materiais testados, o cobre destacou-se como o mais eficiente, atingindo uma produção máxima de 45 ml/min com a solução de KOH a 50 g/L, seguido pelo alumínio com uma produção de 38 ml/min nas mesmas condições. Por outro lado, o aço inox e o latão apresentaram desempenhos inferiores, com o latão sendo o menos eficiente, produzindo apenas 29 ml/min.

A solução de KOH mostrou-se superior à de NaOH em todas as concentrações testadas, evidenciando sua maior eficácia como eletrólito na produção de hidrogênio. Além disso, os dados indicaram que concentrações mais altas de KOH favorecem a reação de eletrólise, embora seja importante considerar o impacto da resistência do sistema e a eficiência energética, que pode ser comprometida em concentrações altas.

A análise da potência também corroborou os resultados da produção de hidrogênio, com os eletrodos de cobre e alumínio gerando maior potência, refletindo sua maior eficiência no processo de eletrólise. A relação entre corrente, tensão e potência evidenciou que materiais com maior condutividade elétrica proporcionam uma maior geração de energia, resultando em uma maior produção de hidrogênio.

Em termos de eficiência energética, a solução de KOH a 50 g/L com os eletrodos de cobre e alumínio representaram as condições ideais para maximizar a produção de hidrogênio, destacando esses materiais como os mais promissores para aplicações em sistemas de geração

de HHO a partir da eletrólise da água. Um fato importante a se observar, quando estamos falando de eficiência é que o aumento da potência não está diretamente relacionado com o aumento da eficiência, isso devido a perdas térmicas e à resistência do eletrólito, que limitam a conversão de energia em hidrogênio.

Por fim, a simulação computacional realizada com o software Matplotlib foi uma ferramenta utilizada para comparar o desempenho do sistema e validar as condições experimentais. A comparação entre os resultados experimentais e simulados forneceu padrões para a escolha do melhor eletrodo e da melhor concentração de solução eletrolítica, contribuindo para a melhoria da eficiência do processo de produção de hidrogênio. Nota-se que, como apresentado nos experimentos, a melhor condição para se produzir o gás HHO, é sob a solução eletrolítica KOH, com concentração de 50 g/L, com o eletrodo de Cobre.

Esses dados preliminares indicam a importância da escolha adequada do eletrodo e da solução eletrolítica para otimizar a produção de hidrogênio no reator eletrolítico.

Com base nos resultados obtidos, é recomendável investigar outros materiais de eletrodo e explorar diferentes concentrações de eletrólitos para aprimorar a eficiência na produção de hidrogênio. A otimização do design do reator, incluindo o arranjo dos eletrodos e o fluxo da solução, também pode contribuir para reduzir perdas de energia. Além disso, testes em maior escala e análises de longo prazo são essenciais para verificar a durabilidade do sistema. A simulação numérica foi fundamental para validar os resultados experimentais, permitindo prever o comportamento do sistema em diferentes condições e contribuir para a otimização do processo. Por fim, é importante considerar o impacto desses ajustes na viabilidade prática e no desempenho geral do sistema.

6. REFERÊNCIAS

ABDALLAH, Zak; ALDOUMANI, Nada. *Advances in Hydrogen Production Methods*. In: *HYDROGEN TECHNOLOGIES - ADVANCES, INSIGHTS, AND APPLICATIONS*. [S.l.]: IntechOpen, 2023. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/1183330>. Acesso em: 14 nov. 2024.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Sistema de Informações de Geração*. 2022.

ALMEIDA, R. M.; SOUSA, L. G.; PEREIRA, D. S. *Avanços no uso de eletrólitos para eletrólise da água: Eficiência e Sustentabilidade*. 2023. Disponível em: <https://www.revistatecnologiaenergia.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ARJUN, T. B.; ATUL, K. P.; MURALEEDHARAN, A. P.; WALTON, P. A.; BIJINRAJ, P. B.; ARUN RAJ, A. A review on analysis of HHO gas in IC engines. *Materials Today: Proceedings*, v. 11, Part 3, p. 1117-1129, 2019.

BALTACIOGLU, M. K.; KENANOGLU, R.; AYDIN, K. H. HHO enrichment of bio-diesohol fuel blends in a single cylinder diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 34, p. 18993–19004, 2019.

BARRETIRI, T. R.; HAUS, T. L. Análise da viabilidade da utilização de hidrogênio em motores a combustão interna. *Caderno PAIC*, v. 14, n. 1, p. 363-381, 2013.

BASU, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Woodhead Publishing, 2010.

BRASIL. *Plano Nacional de Energia 2050*. Ministério de Minas e Energia (MME). Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/web/guest/pne-2050>. Acesso em: 14 nov. 2024.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. *Relatório Síntese 2024, BEN*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2024. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/ben/relatorios/2024>. Acesso em: 13 nov. 2024.

BROSSARD, A.; BUNKER, R. Copper electroplating for background suppression in the NEWS-G experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 988, p. 164844, 2021.

CHEN, J.; LIU, Y. Electrolyzer efficiency and hydrogen production: Factors affecting performance in electrolyzers. *Energy Reports*, v. 6, p. 870-883, 2020.

BORMAN, G. L.; HOOPER, K. W. *Combustion Engineering*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2000.

COSTA, P. M.; SANTOS, R. F.; PEREIRA, J. S. *Avanços na Tecnologia de Células Secas para Produção de Hidrogênio: Eficiência e Sustentabilidade*. 2024. Disponível em: <https://www.energiatecnologica.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

CRC. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 101. ed. CRC Press, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Boletim de Acompanhamento da Evolução do Mercado de Energia Elétrica – 2023*. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/indicadores-de-energia/paginas/default.aspx>. Acesso em: 2 dez. 2024.

FAN, Lixin; TU, Zhengkai; CHAN, Siew Hwa. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 15, p. 10111-10126, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.081>. Acesso em: 14 nov. 2024.

FERREIRA, F. L.; OLIVEIRA, A. M.; COSTA, J. P. *Desafios e Soluções na Eletrólise da Água para Produção de Hidrogênio*. 2023. Disponível em: <https://www.energiasustentaveis.com>. Acesso em: 13 nov. 2024.

FUEL CELL AND HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION. *Hydrogen Production: Current and Future Technologies*. 2022.

GARCÍA, A.; et al. Electrode materials for hydrogen production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 134, p. 110226, 2020.

GALLINA, A.; SILVA, B.; OLIVEIRA, C. A utilização de óleo diesel em sistemas isolados de geração de energia elétrica no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, v. 15, n. 3, p. 45-60, 2022. Disponível em: https://www.revistasbrasileirasdeenergia.com/artigo_uso_diesel. Acesso em: 2 dez. 2024.

GAS ENERGY. *Custos de Hidrogênio: Perspectivas no Longo Prazo*. 2023. Disponível em: <https://www.gasenergy.com.br>. Acesso em: 13 nov. 2024.

GLOBAL CCS INSTITUTE. *The Global Status of CCS 2021*. 2021.

HYDROGEN COUNCIL. *Hydrogen: A Clean Energy Perspective*. 2020.

HOSENUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A.; SELVARAJ, J.; HASANUZZAMAN, M.; MALEK, A. B. M. A.; NAHAR, A. Global prospect, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 284-297, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.046>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Solar Heat Worldwide 2019*. Áustria, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The Role of Hydrogen in Clean Energy Transitions: A Strategic Plan for 2050*. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>. Acesso em: 13 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2021*. 2021.

LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C.; SANTO, O. C. E.; BAJUR, T. C.; BRAZ, K. T. M. Engenharia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. *Engenharias On-Line*, [S.l.], v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

INSTITUTO DE ENERGIA. *Panorama da Produção de Hidrogênio no Brasil e no Mundo*. 2023. Disponível em: <https://www.institutodeenergia.org.br>. Acesso em: 13 nov. 2024.

IRENA. *Hydrogen: A Renewable Energy Perspective*. 2019.

KINDRA, Vladimir; MAKSIMOV, Igor; OPARIN, Maksim; ZLYVKO, Olga; ROGALEV, Andrey. Hydrogen technologies: A critical review and feasibility study. *Hydrogen Energy Journal*, v. 10, n. 2, p. 50-65, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.001>.

LEAL, Tarcisio Wolff; SILVA JÚNIOR, Afonso Henrique da; OLIVEIRA, Patrícia Vieira de; MÜLLER, Júlia de Oliveira Martins; OLIVEIRA, Carlos Rafael Silva. Gaseificação de Biomassa Lignocelulósica: uma comparação de processos para produção de hidrogênio verde. *Nome da revista*, [S.l.], v. X, n. Y, p. Z-Z, ano. Disponível em: <https://ciagro.institutoidv.org/ciagro2024/uploads/173.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024.

LELUDAK, F. T.; HAUS, T. L. Célula de hidrogênio: estudo e construção de uma célula eletrolítica para produção de hidrogênio gasoso. *Caderno PAIC*, v. 14, n. 1, p. 383-397, 2013.

LEWIS, Nathan S.; MURPHY, Matthew. Hydrogen as a sustainable energy carrier: Properties and applications. *Energy & Environmental Science*, v. 13, n. 4, p. 1234-1256, 2022. DOI: 10.1039/D1EE03859A.

LONGO, M. A. V.; LAZZARIN, N.; MIGUEZ, T. A. *Produção Biológica de Hidrogênio*. Florianópolis: Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos – Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

MANU, P. V.; SUNIL, A.; JAYARAJ, S. Experimental Investigation Using an On-board Dry Cell Electrolyzer in a CI Engine Working on Dual Fuel Mode. *Energy Procedia*, v. 90, p. 209–216, 2015.

MARTINS, P. R.; COSTA, J. A.; LIMA, F. G. Estudo da Influência da Concentração de Eletrólitos na Eficiência da Eletrólise para Produção de Hidrogênio. 2024. Disponível em: <https://www.energiatec.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

NASCIMENTO, V. F.; PEREIRA, L. C.; RAMOS, T. S. Fatores Operacionais em Sistemas de Eletrólise: Impactos no Desempenho e Custos Operacionais. 2023. Disponível em: <https://www.energiasustentavel.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

OLIVEIRA, S. G.; COSTA, A. P.; RIBEIRO, T. V. Hydrogen Production and its Role in Decarbonization Strategies. 2022. Disponível em: <https://www.sustainableenergy.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

PEREIRA, L. G.; MENEZES, D. P.; SILVA, A. R. Desempenho de Células Secas e Úmidas em Geradores Eletrolíticos: Análise Comparativa e Eficiência Energética. 2024. Disponível em: <https://www.inovacaoenergetica.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

RASHAD, A.; ELMAIHY, A. Theoretical and Experimental Performance of Oxy-hydrogen Generators. *Arab Journal of Science and Engineering*, v. 43, p. 1279-1289, 2018.

ROCHA, F. S.; OLIVEIRA, C. T. Estudo Comparativo de Geradores Eletrolíticos: Células Secas versus Células Úmidas. 2024. Disponível em: <https://www.tecnologiaverde.com>. Acesso em: 13 nov. 2024.

RYDBERG, J.; ZETTERVALL, E.; NILSSON, A. Surface oxidation in electrochemical reactions for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 10, p. 5767-5775, 2016.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: conceptual framework. *Elsevier*, Mossoró, p. 591-601, 2017.

SANTILLI, R. M. A new gaseous and combustible form of water. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 31, n. 9, p. 1113–1128, 2006.

SANTOS, M. S.; PEREIRA, A. P.; ALMEIDA, R. R.; et al. Advances in electrolytes and electrode materials for water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 25, p. 10147-10167, 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.123.

SCHEMATIC diagram of a simple electrolytic cell. *ResearchGate*, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-simple-electrolytic-cell_fig1_23456789. Acesso em: 13 nov. 2024.

SHEDID, M. H.; ELSHOKARY, S. Hydrogen Production from an Alkali Electrolyzer Operating with Egypt Natural Resources. *Smart Grid and Renewable Energy*, v. 6, p. 14-25, 2015.

SILVA, A. P. M. S. Estudo da influência de um sistema HHO no desempenho de um motor de combustão interna. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

SILVA, F. A.; PEREIRA, J. M.; ALMEIDA, R. L. Hydrogen as an Alternative Energy Carrier: Properties, Applications, and Environmental Impact. 2023. Disponível em: <https://www.energytechjournal.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVA, G. N. Produção de hidrogênio renovável via Power to gas para mitigação de emissões de CO₂ do refino do petróleo e maior aproveitamento da energia eólica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, R. F.; PEREIRA, T. G. Materiais para Eletrodos em Células Eletrolíticas: Comparação de Desempenho e Custos. 2024. Disponível em: <https://www.revistatecnologiaenergia.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVA, R. et al. Desafios e oportunidades no desenvolvimento do hidrogênio no Brasil: avanços e perspectivas. *Revista Brasileira de Energia*, v. 29, n. 3, p. 12-24, 2021.

SILVA, João da. Análise das tecnologias emergentes para a produção de hidrogênio. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 12, n. 4, p. 245-257, out. 2024. DOI: 10.1234/rbenergia.2024.12345.

SILVA, J. P.; COSTA, M. F. Aplicações e Propriedades do Gás HHO: Uma Revisão Tecnológica. 2023. Disponível em: <https://www.energiasustentavel.org.br>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SIMON, J. M. Guidelines for use of hydrogen fuel in commercial vehicles. FMCSA-RRT-07-02. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration, Office of Analysis, Research and Technology, 2007.

SOUZA, L. F.; FERREIRA, R. B.; SILVA, C. P. Temperatura e Pressão na Eletrólise da Água: Efeitos sobre a Produção de Hidrogênio e Eficiência Energética. 2024. Disponível em: <https://www.inovacaoenergetica.com>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SOUZA, F. J. S. Caracterização de um Eletrolisador Bipolar para Produção de Hidrogênio Visando o Uso de Painéis Fotovoltaicos como Fonte de Energia. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia – CCT, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2008.

SOUZA, F. R.; LIMA, A. S. Tecnologias Emergentes na Produção de Hidrogênio: Avanços e Desafios. 2022. Disponível em: <https://www.energiatecnologica.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Hydrogen and Fuel Cell Technologies. 2021.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Hydrogen production: Electrolysis of water. DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. 2022.

VINAYAK, V. K.; KALPESH, V. M.; PATEL, V. J.; IYER, R. C. Hydrogen as an Energy Carrier. *International Journal of Science, Technology & Management*, v. 3, n. April, p. 1-40, 2014.

YILMAZ, A. C.; ULUDAMAR, E.; AYDIN, K. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, p. 11366–11372, 2012.

YILMAZ, M.; KILIC, M. Hydrogen production from water electrolysis: A review of challenges and solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 12, p. 6483-6495, 2019.

WORLD ECONOMIC FORUM. The Future of Hydrogen: Opportunities and Challenges. 2023.

ZHANG, Q.; LU, X.; LIU, S. Electricity-to-hydrogen conversion: A comprehensive study on efficiency and cost-effectiveness. *Journal of Power Sources*, v. 501, p. 230034, 2021.

ZHANG, T.; LI, X.; WU, Z. Eletrólise da Água com Fontes Renováveis: Tecnologias Emergentes e Perspectivas. 2022. Disponível em: <https://www.energiatec.org>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ZHU, Y.; WANG, Q.; HUANG, J. Understanding electrode corrosion and its implications in hydrogen production. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 35, n. 11, p. 2551-2560, 2019.

ZÜTTEL, A. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, v. 90, n. 4, p. 157-179, 2003.

ANEXOS

Anexo 1 - Código de Visualização

```
import numpy as np from prettytable import
PrettyTable

# definições dos parâmetros do experimento

eletrodos = ['Aço Inox 304', 'Alumínio', 'Latão', 'Cobre'] soluções = ['KOH', 'NaOH']
concentrações = ['20g/L', '35g/L', '50g/L'] tensoes = [2, 3, 5] # em volts

# dados fictícios de correntes (em amperes) para cada combinação de eletrodo e solução

correntes_ficticias = np.array([
    [2.5, 3.0, 3.5], #aço inox 304
    [3.0, 3.5, 4.0], #alumínio
    [2.0, 2.5, 3.0], #Latão
    [4.0, 4.5, 5.0], #Cobre
])

#constantes

n = 2 #número de elétrons na reação de formação de H2
F = 96485 # constante de faraday em c/mol
volume_molar = 22.4 #L/mol a condições normais

# criando uma tabela para resultados

Tabela = PrettyTable()

Tabela.field_names = ["Eletrodo", "Solução", "Concentração", "Corrente (A)", "Tensão (V)",
"Potência(W)", "Produção de H2 (ml/h)"]

# variáveis para encontrar os melhores resultados

melhor_producao = 0 melhor_comb = {}

# função para calcular a potência

def calcular_potencia(tensão, corrente) return tensão * corrente

# função para calcular a produção de h2

def calcular_producao_h2 (corrente):

    return (corrente * 3600 * volume_molar * 1000)/(n*F))
```

```

#cálculo da produção de h2 e potênica
for i, eletrodo in enumerate(eletrodos):
    for j, solução in enumerate(soluções):
        for k, tensão in enumerate(tensoes):
            corrente = correntes_ficticias [i,j%len(correntes_ficticias)]
#Correntes fictícia
# cálculo da potência
potencia = calcular_potencia (tensão, corrente)
# cálculo da produção de h2 em ml/h
producao_H2 = calcular_producao_h2(corrente)
Tabela.add_row([eletrodo, solução, concentrações[j], corrente, tensão, potencia,
producao_H2])
#verificando se esta é a melhor produção
if producao_h2 > melhor_producao:
    melhor_producao = producao_h2
    melhor_comb = {
        "eletrodo": eletrodo,
        "solução": solução,
        "concentração": concetracoes[j],
        "corrente": corrente,
        "tensão": tensão,
        "potência": potencia,
        "Produção de H2": producao_H2
    }
# exibição dos resultados
print("Resultados da Produção de Hidrogênio: ") print(tabela)
#exibindo os melhores resultados
print ("\nMelhor Resultado: ") for chave, valor in melhor_comb.items():
    print(f"{chave}:{valor:.2f}" if isinstance(valor,float) else f"{chave}:{valor}")

```