



INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PERNAMBUCANO - *CAMPUS OURICURI*
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA QUÍMICA

ANA RAFAELA LUZ SILVA

**HIDROGÊNIO VERDE E O ENSINO DA ELETRÓLISE A PARTIR DE UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

OURICURI

2023

ANA RAFAELA LUZ SILVA

**HIDROGÊNIO VERDE E O ENSINO DA ELETRÓLISE A PARTIR DE UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal do Sertão Pernambucano - Campus Ouricuri, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciada em Química.

Orientador: Prof. Dr. Iran da Luz Sousa

OURICURI

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586 Silva, Ana Rafaela Luz.

Hidrogênio verde e o ensino da eletrólise a partir de uma revisão bibliográfica / Ana Rafaela Luz Silva. - Ouricuri, 2023.
64 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Ouricuri, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Iran da Luz Sousa.

1. Educação. 2. Hidrogênio verde. 3. Química. 4. Ensino. 5. Eletrólise. I. Título.

CDD 370

ANA RAFAELA LUZ SILVA

**HIDROGÊNIO VERDE E O ENSINO DA ELETRÓLISE A PARTIR DE UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Licenciatura em Química/*Campus* Ouricuri – Departamento de Ensino do Instituto Federal do Sertão Pernambucano, como parte dos requisitos necessários e obrigatórios à obtenção do grau de Licenciada em Química.

Ouricuri – PE, 23 de março de 2023.

Aprovada por:

Prof. Dr. Iran da Luz Sousa

IFSertãoPE/*Campus* Ouricuri

(Orientador/Presidente)

Prof. Dr. Igor José Gomes da Silva

IFSertãoPE/*Campus* Ouricuri

(Examinador Interno)

Prof. Dr. Renato Cesar da Silva

IFSertãoPE/*Campus* Ouricuri

(Examinador Interno)

Agradecimentos

Primeiramente, ao meu Deus, por ter delineado cada caminho pelo qual passei na vida e por ter me guiado em cada um deles.

Agradeço à minha família, especialmente à minha mãe e ao meu pai, os quais tem sido a minha força e motivação. Também, a cada um dos meus irmãos: Gabriela, Amauri, Alyne, Ruth e Aldair.

A meu esposo, Flávio, por tudo que fez por mim em todos os momentos durante a trajetória deste curso.

Às minhas amigas, especialmente, Rejane Santana, Geissi Moreira, Jéssica Cassimiro, Mirele Cassimiro e Graciele Maria por todos os cafés, as conversas e as companhias nos momentos em que eu mais precisava.

Ao Instituto Federal do Sertão Pernambucano e aos professores da Licenciatura em Química do Campus Ouricuri, especialmente ao Prof. Juliano Varela e a Prof. Tatyana keyty pela oportunidade como bolsista e por todo o aprendizado.

Por fim, agradeço ao meu orientador Iran da Luz Sousa pela paciência e compreensão durante a escrita deste trabalho.

Dedico este trabalho a Ana Gabriela, pelo incentivo e inspiração, à minha mãe pela motivação e a todos que me inspiraram e me ajudaram em todos os momentos da graduação.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e
há um tempo para todo o propósito
debaixo do céu.

Há tempo de nascer, e tempo de morrer;
tempo de plantar, e tempo de arrancar o
que se plantou”.

Eclesiastes, 3.

RESUMO

O hidrogênio verde tem ganhado um papel central em um contexto de diversos problemas ambientais e de uma matriz energética fundamentada na utilização de combustíveis fósseis. Dessa forma, a rota de produção do hidrogênio verde, através da eletrólise da água e de fontes renováveis de energia, possibilitará uma transição energética mais limpa, segura e flexível, contribuindo para a descarbonização do setor energético. Nesse viés, a eletrólise é um processo químico bem conhecido que requer adoção mais ampla para reduzir os custos de produção. Nessa perspectiva, insere-se a eletrólise como um dos conteúdos de Química, ao qual é atribuído uma dificuldade intrínseca em sua compreensão. Diante disso, este trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica acerca da produção do hidrogênio verde via eletrólise da água, bem como sobre o ensino de eletrólise em aulas de Química, com a finalidade de compreender como o hidrogênio verde pode ser relacionado ao conteúdo de eletrólise. Desse modo, evidenciou-se que a literatura científica e acadêmica acerca do ensino de eletrólise relata a dificuldade na compreensão do conteúdo de eletroquímica pelos alunos, além de ressaltarem a importância da experimentação e contextualização em aulas sobre a eletrólise. Dessa forma, considerando os aspectos principais da produção do hidrogênio via eletrólise da água, com a utilização de fontes renováveis, percebeu-se que como é necessário trabalhar a temática da produção do hidrogênio verde em consonância com o assunto de eletrólise, visto que isso pode auxiliar na aprendizagem e compreensão do processo eletrolítico. Nessa perspectiva, pode-se relacionar as células eletrolíticas aos eletrolisadores alcalino e PEM, bem como as semirreações genéricas e seus eletrodos com as semirreações da água e os eletrodos utilizados nos eletrolisadores, além de identificar a função do eletrólito nesses sistemas e a função e importância da corrente elétrica utilizada em um processo eletrolítico, destacando-se as energias renováveis utilizadas nos eletrolisadores para produzir o hidrogênio.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Química. ensino. eletrólise.

ABSTRACT

Green hydrogen has gained a central role in a context of various environmental problems and an energy matrix based on the use of fossil fuels. In this way, the green hydrogen production route, through the electrolysis of water and renewable energy sources, will enable a cleaner, safer and more flexible energy transition, contributing to the decarbonization of the energy sector. In this vein, electrolysis is a well-known chemical process that requires wider adoption to reduce production costs. In this perspective, electrolysis is inserted as one of the contents of Chemistry, which is attributed an intrinsic difficulty in its understanding. Therefore, this work consisted of a bibliographic review about the production of green hydrogen via water electrolysis, as well as about the teaching of electrolysis in Chemistry classes, in order to understand how green hydrogen can be related to electrolysis content. Thus, it was evident that the scientific and academic literature on teaching electrolysis reports the difficulty in understanding the content of electrochemistry by students, in addition to emphasizing the importance of experimentation and contextualization in classes on electrolysis. Thus, considering the main aspects of hydrogen production via water electrolysis, with the use of renewable sources, it was noticed that as it is necessary to work on the theme of the production of green hydrogen in line with the subject of electrolysis, since this can assist in learning and understanding the electrolytic process. In this perspective, one can relate electrolytic cells to alkaline and PEM electrolyzers, as well as the generic half-reactions and their electrodes with the half-reactions of water and the electrodes used in electrolyzers, in addition to identifying the function of the electrolyte in these systems and the function and importance of the electric current used in an electrolytic process, highlighting the renewable energies used in electrolyzers to produce hydrogen.

Keywords: *Green hydrogen. Chemical. Teaching. Electrolysis.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético .. | 14 |
| Figura 2 - Diferentes tipos de tecnologias de eletrólise disponíveis comercialmente..... | 23 |
| Figura 3 - Ilustração esquemática de um eletrolisador de água alcalino..... | 25 |
| Figura 4 -Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador alcalino .. | 26 |
| Figura 5 - Ilustração esquemática de um eletrolisador PEM..... | 27 |
| Figura 6 - Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador PEM .. | 28 |
| Figura 7 - Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador AEM.. | 29 |
| Figura 8 - Ilustração esquemática de um eletrolisador de água de óxido sólido..... | 30 |
| Figura 9- Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador de óxido sólido .. | 31 |
| Figura 10 - Processo de eletrólise da água .. | 47 |
| Figura 11 - Representação das meias-reações na eletrólise da água .. | 48 |
| Figura 12 - Representação da produção de hidrogênio verde .. | 49 |
| Figura 13- Potencial da célula de eletrólise para produção de hidrogênio em função da temperatura..... | 50 |
| Figura 14- Representação de uma célula para eletrólise da água..... | 51 |
| Figura 15 - Esquema representativo do eletrolisador alcalino .. | 53 |
| Figura 16 - Esquema representativo do PEM..... | 54 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1- Caracterização dos sete artigos analisados sobre o ensino de eletrólise | 37 |
| Quadro 2 - Questionário aplicado por Rodrigues e Gibin (2022) | 40 |
| Quadro 3 - Questionário aplicado por Silva e Ferri (2020)..... | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Propriedades do hidrogênio..... | 13 |
| Tabela 2 - Os três principais tipos de eletrolisadores com seus parâmetros característicos e condições típicas de operação | 24 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 Objetivo geral:..... | 12 |
| 2.2 Objetivos específicos: | 12 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: HIDROGÊNIO VERDE | 13 |
| 3.1 Hidrogênio: características e aplicações..... | 13 |
| 3.2 Economia de hidrogênio e hidrogênio verde..... | 15 |
| 3.3 Hidrogênio verde no contexto mundial..... | 17 |
| 3.4 Hidrogênio verde no Brasil | 19 |
| 4 HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DA ELETRÓLISE DA ÁGUA | 21 |
| 4.1 Eletrolisador alcalino (AEL) | 25 |
| 4.2 Eletrolisador de membrana polimérica de troca de prótons (PEM) | 26 |
| 4.3 Eletrolisador de membrana de troca aniônica (AEM)..... | 28 |
| 4.4 Eletrolisador de óxido sólido (SOEC)..... | 29 |
| 5 ENSINO DE QUÍMICA | 32 |
| 5.1 Ensino de eletroquímica | 33 |
| 6 METODOLOGIA | 36 |
| 7 PRODUÇÃO ACADÊMICA ACERCA DA ELETRÓLISE NO ENSINO DE QUÍMICA | 38 |
| 7.1 Abordagem metodológica do conteúdo de eletrólise | 38 |
| 7.2 Análise dos resultados obtidos nos trabalhos selecionados..... | 40 |
| 7.3 Considerações trazidas pelos autores | 43 |
| 8 HIDROGÊNIO VERDE E A ELETRÓLISE PARA O ENSINO DE QUÍMICA | 47 |
| 8.1 A eletrólise da água e a rota de produção do Hidrogênio Verde..... | 47 |
| 8.2 A célula eletrolítica e os eletrolisadores alcalino e PEM | 50 |
| 8.2.1 Célula eletrolítica | 51 |
| 8.2.2 Eletrolisador alcalino (AEL) | 52 |
| 8.2.3 Eletrolisador de membrana polimérica de troca de prótons (PEM) | 53 |
| 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 56 |
| 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 58 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (International Renewable Energy Agency, IRENA) (2022), a mudança climática é um problema urgente, de modo que vários países e economias estão desenvolvendo programas e estratégias de mitigação de gases de efeito estufa e roteiros de descarbonização. Assim, por meio de uma conjuntura de energias renováveis, armazenamento de energia, eficiência energética e tecnologias de redes inteligentes, grande parte das aplicações de uso final será descarbonizada nas próximas décadas, conforme IRENA (2022).

Nesse contexto, o hidrogênio possui um papel central na transição energética. Assim, tem se destacado o hidrogênio verde, o qual que é produzido pela eletrólise da água através de energias renováveis, como a solar, a eólica, a hidráulica e outras. Nesse viés, o hidrogênio verde é a única opção de carbono zero para a produção de hidrogênio segundo IRENA (2020).

Diante disso, a produção de hidrogênio verde tem sido objeto de desenvolvimento de projetos, ações e tecnologias no mundo. Conforme Smink (2021), alguns países têm estado à frente nesse contexto, como Austrália, Holanda, Alemanha, China, Arábia Saudita e Chile. Estados Unidos, Portugal e o Brasil também têm ganhado destaque.

O Brasil possui um alto potencial no que se refere ao hidrogênio verde, visto que possui condições favoráveis à produção do hidrogênio via eletrólise da água, utilizando energias renováveis. Nesse sentido, segundo ETENE (2021), o país tem um dos menores custos marginais para geração de energias renováveis, o que é fundamental para o barateamento do processo de eletrólise. Assim, ETENE (2021) ressalta que os investimentos anunciados para construção de usinas produtoras de hidrogênio verde no Brasil já somam mais de US\$ 22 bilhões, os quais estão concentrados em portos – Pecém, no Ceará; Suape, em Pernambuco; e Açu, Rio de Janeiro.

Nessa perspectiva, no que se refere à eletrólise da água para produzir o hidrogênio verde, destacam-se algumas tecnologias utilizadas. Conforme IRENA (2020), a construção das diferentes variações tecnológicas é baseada em vários aspectos físico-químicos e eletroquímicos. Dessa maneira, os eletrolisadores são normalmente divididos em quatro tecnologias principais, com destaque para os eletrolisadores alcalinos (AEL), os eletrolisadores de membrana polimérica de troca de prótons (PEM) e os eletrolisadores de óxidos sólidos (SOEC).

Ao considerar essa rota de produção do hidrogênio verde, ressalta-se que a eletrólise da água é um processo não espontâneo que ocorre em células eletrolíticas, no qual as ligações das moléculas de água são rompidas para formar moléculas de hidrogênio e oxigênio, de modo que deve ser aplicado um potencial elétrico para que ela aconteça. Dessa forma, a eletrólise é observada quando é aplicada uma corrente elétrica para provocar reações químicas não espontâneas de oxidação e redução nas células eletrolíticas.

Nesse contexto, o processo eletrolítico faz parte do campo da eletroquímica, o qual está presente nas aulas de Química do sistema educacional brasileiro. Dessa forma, para Rodrigues e Gibin (2022), o conhecimento conceitual sobre a eletroquímica é considerado difícil, de modo que os conceitos atrelados à geração de corrente elétrica e à interpretação das reações de oxidação e redução possuem uma dificuldade intrínseca atrelada à complexidade dos fenômenos submicroscópicos.

Quanto ao conteúdo de eletroquímica, Rodrigues e Gibin (2022) afirmam que a utilização de abordagens sobre fenômenos cotidianos ou industriais que melhorem o ensino e o aprendizado é importante no desenvolvimento de habilidades de observação, lógica e raciocínio frente ao que ocorre na sociedade.

Diante disso, considerando a relevância do hidrogênio verde para a sociedade contemporânea e para as gerações futuras, bem como o processo pelo qual é gerado o hidrogênio verde, percebe-se a necessidade de compreender como isso se relaciona ao ensino de Química, especialmente no que tange ao conteúdo de eletrólise. Além disso, é relevante analisar o que a literatura científica e acadêmica aborda sobre o ensino de eletrólise.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral:

- Compreender como a temática da produção do hidrogênio verde via eletrólise da água se relaciona com o conteúdo de eletrólise ensinado em aulas de Química.

2.2 Objetivos específicos:

- Discorrer sobre o que é o hidrogênio verde e a relevância deste no cenário brasileiro e mundial;
- Investigar as tecnologias para produção do hidrogênio verde via eletrólise da água;
- Analisar a produção acadêmica sobre o ensino de eletrólise;
- Compreender como a produção do hidrogênio verde pode ser relacionada ao conteúdo de eletrólise em aulas de Química.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: HIDROGÊNIO VERDE

3.1 Hidrogênio: características e aplicações

O hidrogênio é o elemento mais leve entre os elementos químicos, o qual apresenta características únicas, de forma que não pertence a nenhum dos grupos existentes da Tabela Periódica. O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo, com cerca de 89% de todos os átomos. Entretanto, existe muito pouco hidrogênio livre na Terra, porque as moléculas de H₂ são muito leves e movem-se com velocidades médias tão altas que tendem a escapar da gravidade de nosso planeta (ATKINS *et al*, 2018, p. 649), considerado um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável, sob condições normais (PAIVA, 2022, p. 23).

Nesse viés, o hidrogênio é considerado por muitos como o combustível do futuro, porque é abundante (em compostos) na Terra e sua combustão é limpa (ATKINS *et al*, 2018, p. 649). Presente majoritariamente na terra na sua forma molecular (como hidrocarbonetos, água e outros), é caracterizado por possuir a maior quantidade de energia por unidade de massa (120,7 KJ/g) se comparado a outros combustíveis (cerca de 3x a energia da gasolina) (PAIVA, 2022, p. 23).

Seu uso como combustível é interessante por alguns fatores; sua combustão, que é basicamente uma reação química entre gás hidrogênio e oxigênio, gera somente água no processo que, da mesma forma, pode ser “quebrada” em hidrogênio e oxigênio (FREITAS, 2022, p. 12). Dessa forma, algumas propriedades do hidrogênio estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1- Propriedades do hidrogênio

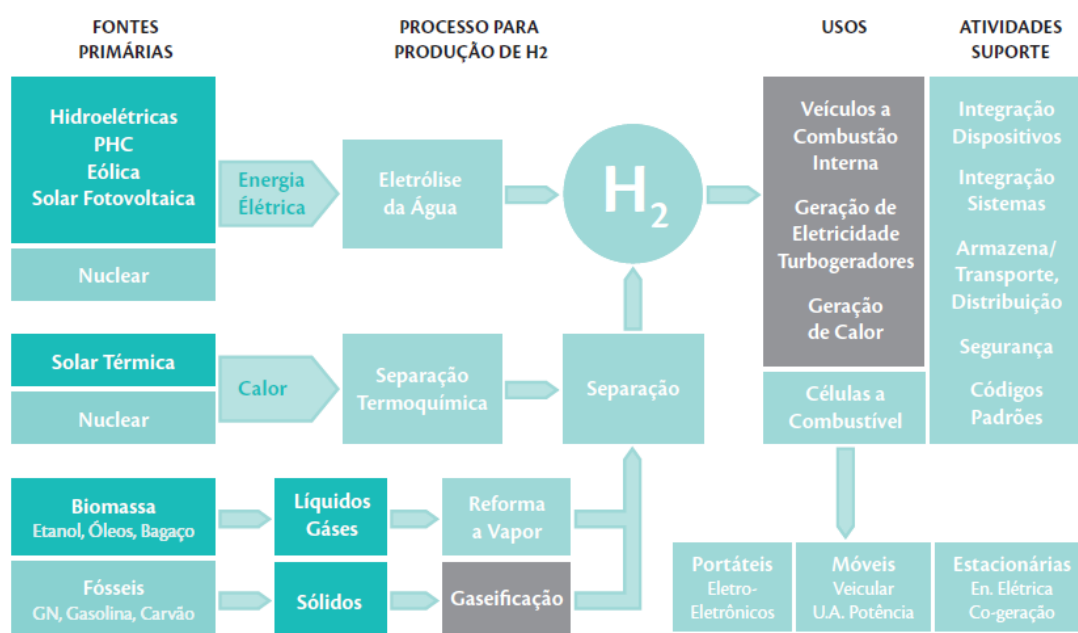
| Propriedade | Valor |
|---------------------------------|---------------------------|
| Peso molecular | 2,01594 |
| Densidade de gás a 0 °C e 1 atm | 0,08987 kg/m ³ |
| Densidade de sólido a -259 °C | 858 kg/m ³ |
| Densidade do líquido a -253 °C | 708 kg/m ³ |
| Temperatura de fusão | -259 °C |
| Temperatura de ebulição a 1 atm | -253 °C |
| Temperatura crítica | -240 °C |
| Pressão crítica | 12,8 atm |
| Densidade crítica | 31,2 kg/m ³ |
| Calor de fusão a -259 °C | 58 kJ/kg |
| Calor de vaporização a -253 °C | 447 kJ/kg |
| Condutividade térmica a 25 °C | 0,019 kJ/kg |
| Viscosidade a 25 °C | 0,000892 cP |

| | |
|---|-------------------|
| Calor específico (Cp) de gás a 25 °C | 14,3 kJ / (kg °C) |
| Calor específico (Cp) de líquido a -256 °C | 8,1 kJ / (kg °C) |
| Calor específico (Cp) do sólido a -259,8 °C | 2,63 kJ / (kg °C) |

Fonte: adaptado de Najjar (2013), citado por Veiga (2022)

Nesse contexto, de acordo com PUCRS (2022), o hidrogênio é um elemento que possui aplicação em diversos setores industriais, necessário para a fabricação de diversos produtos, desde alimentos até fertilizantes, podendo ser aplicado como substituto de produtos que têm alta intensidade de carbono, como gasolina, por exemplo. Além disso, pode ser utilizado como vetor energético, acumulando energia renovável produzida em períodos de alta produção e baixa demanda de energia elétrica (PUCRS, 2022). Dessa forma, a Figura 1 ilustra as possíveis rotas de produção do hidrogênio como vetor energético.

Figura 1 - Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético



Fonte: CENEH, adaptado de CGEE (2010)

De acordo com a IEA (2021), a demanda de hidrogênio em 2020 foi de aproximadamente 90 Mt, com mais de 70 Mt usados como hidrogênio puro e menos de 20 Mt misturados, com gases contendo carbono na produção de metanol e fabricação de aço. Quase toda essa demanda era para refino e usos industriais. Atualmente, o hidrogênio é produzido principalmente a partir de combustíveis fósseis, resultando em cerca de 900 Mt de emissões de CO₂ por ano (ETENE, 2021, p. 8.).

Diante disso, complementa-se que:

A nível internacional, a produção de hidrogênio é principalmente baseada em combustíveis fósseis. A eletrólise da água representa apenas 4% do hidrogênio utilizado a nível mundial, enquanto a reformulação de combustíveis fósseis representa

cerca de 96% (em que 48% é via gás natural, 30% via petróleo/nafta e 18% via carvão). Particularmente na Europa, 95% do hidrogênio que é produzido resulta da reforma do gás natural, 4% da eletrólise de água e 1% da gaseificação ou pirólise de biomassa. (VEIGA, 2022, p. 7).

Nesse viés, de acordo com os processos de produção do hidrogênio destacados na Figura 1, classifica-se o hidrogênio com base em sua rota de produção ou energia utilizada.

Em razão da necessidade de distinguir qual o processo, através do qual o hidrogênio foi produzido, são atribuídos nomes de cores ao hidrogênio. No entanto, em virtude das pesquisas realizadas sobre as cores do hidrogênio, foi possível verificar que o mesmo processo pode ter designações diferentes em função da fonte de informação. Podendo assim ser concluído que não há uma universalidade em algumas das designações atribuídas (VEIGAS, 2022, p. 12).

Um código de cores tem sido usado para simplificar a classificação do hidrogênio de acordo com a fonte de energia usada para produzi-lo e, às vezes, também de acordo com o processo de produção. Os tipos de hidrogênio mais mencionados nesta classificação, de acordo com a literatura relacionada ao tema, são (ETENE, 2021, p. 3):

- Hidrogênio marrom, produzido do carvão mineral sem a captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS, na sigla em inglês) (ETENE, 2021, p. 3);
- Hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis, principalmente gás natural, sem CCUS (ETENE, 2021, p. 3);
- Hidrogênio azul, produzido a partir de fontes fósseis, principalmente gás natural, mas com CCUS (ETENE, 2021, p. 3);
- Hidrogênio verde (hidrogênio renovável), produzido por eletrólise, com eletricidade oriunda de fontes de energia renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, geotérmica, marés, dentre outras (ETENE, 2021, p. 3).

3. 2 Economia de hidrogênio e hidrogênio verde

Com a intensificação dos fenômenos ambientais agravados pela ação humana, tem-se buscado formas de diminuí-los por meio de mudanças em muitos setores da sociedade, destacando-se a mudança na matriz energética, a qual está fundamentada na utilização de matérias primas não-renováveis e que contribuem para o efeito estufa. Desse modo, novos paradigmas estão sendo desenvolvidos com base na utilização de combustíveis e processos mais limpos, sustentáveis e eficientes, conforme PUCRS (2022).

Com base nisso, o setor de energia responde por cerca de dois terços das emissões de gases de efeito estufa, já que mais de 80% do consumo global de energia é baseada em combustíveis fósseis (KNOB, 2013, p.2). Visando conter o aquecimento global e, dessa forma,

viabilizar um futuro sustentável para o planeta, é necessário diminuir as emissões de gases de efeito estufa, particularmente o CO₂, de forma expressiva (ETENE, 2021, p. 2).

De acordo com IRENA (2020), o setor de energia começou a mudar de forma promissora, com ampla adoção de renováveis e tecnologias relacionadas, o que é um bom presságio para um futuro sustentável. Tecnologias renováveis estão dominando o mercado global de nova capacidade de geração de energia. A energia solar, a fotovoltaica e a eólica são cada vez mais as fontes de eletricidade mais baratas em muitos mercados, e a maioria das fontes de energia renováveis terá custos totalmente competitivos na próxima década.

Nesse viés, segundo a CGEE (2010), a expressão economia do hidrogênio tem sido utilizada para descrever um novo paradigma econômico baseado no hidrogênio como vetor energético e não mais numa economia dependente quase exclusivamente de recursos não-renováveis, como o petróleo e seus derivados.

A economia do hidrogênio oferece uma visão convincente de um futuro energético para a nação e o mundo que é ao mesmo tempo abundante, limpo, flexível e seguro. Podemos imaginar a economia de hidrogênio como uma rede interligada de processos químicos que produz hidrogênio por meio da reforma de combustível fóssil, conversão de biomassa e divisão eletrolítica, biofotolítica ou termoquímica de água; armazena hidrogênio quimicamente ou fisicamente; e converte o hidrogênio armazenado em eletricidade e calor no ponto de uso (DRESSSELHAUS, 2004, p. 3).

Nesse sentido, conforme a CGEE (2010), a segurança energética e a redução dos impactos ambientais são as principais motivações para a mudança de paradigma do setor energético. Dessa forma,

A segurança energética é evidenciada uma vez que a possibilidade de obtenção de hidrogênio de várias fontes permite privilegiar as fontes locais de cada país diminuindo ou evitando a importação de energia. Os impactos ambientais diminuem, já que a utilização do hidrogênio para geração de energia elétrica através de célula a combustível não produz gás de efeito estufa produzindo apenas água como subproduto. As emissões também são significativamente reduzidas na queima do hidrogênio em motores de combustão interna ou queimadores para a geração de calor (CGEE, 2010, p.2).

Nessa perspectiva, Gallandat *et al* (2017) afirmam que o hidrogênio é visto como um elemento-chave para a transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma economia renovável e sustentável. Dessa maneira, o hidrogênio pode ser usado diretamente como transportador de energia ou como matéria-prima para a redução de CO₂ a hidrocarbonetos sintéticos. Assim,

A utilização do hidrogênio como um vetor energético produzido a partir de biomassas e biocombustíveis (como o etanol) ou utilizando a energia elétrica produzida a partir de fontes renováveis (hidráulica, eólica e solar fotovoltaica), transformando eletricidade em energia transportável e armazenável, vem sendo avaliada como uma das formas mais eficientes e ambientalmente interessantes, principalmente quando associada à utilização de células a combustível para conversão do hidrogênio em

energia elétrica. Esta característica do hidrogênio, que é a possibilidade de sua produção através de diversos insumos e processos, colocam-no como um elemento de integração entre diversas tecnologias (CGEE, 2010, p.2).

Segundo IRENA (2020), o hidrogênio pode oferecer uma solução para tipos de demanda de energia que são difíceis de eletrificar diretamente. Hoje, cerca de 120 megatoneladas (Mt) (14 Exajoules, EJ) de hidrogênio são produzidas por ano. Mas quase tudo isso vem de combustíveis fósseis ou de eletricidade gerada por combustíveis fósseis, com alta pegada de carbono; menos de 1% é hidrogênio “verde”. No entanto, o progresso está sendo feito e, no início de 2020, a maior usina de produção de hidrogênio verde do mundo, com capacidade de eletrolisador de 10 Megawatt (MW), começou a operar no Japão (Recharge, 2020, *apud* IRENA, 2020).

Diante disso, destaca-se a produção do hidrogênio a partir da eletrólise da água, o qual está associado ao hidrogênio renovável. Este, por sua vez, é caracterizado como hidrogênio verde por serem utilizadas fontes de energias renováveis, como a eólica, a solar, a hidráulica e a fotovoltaica, além de outras, em seu processo de eletrólise, o que contribui para a descarbonização do setor energético e de combustíveis.

IRENA (2020) ressalta que o hidrogênio verde se tornará competitivo em custo com o hidrogênio “azul” (produzido a partir de combustíveis fósseis combinados com captura e armazenamento de carbono) nos próximos anos em locais com eletricidade renovável de baixo custo favorável. Ainda segundo IRENA (2020), à medida que os custos caírem ainda mais, o hidrogênio verde será mais barato que o hidrogênio azul em muitos locais nos próximos 5 a 15 anos. Certas indústrias intensivas em energia podem no futuro se mudar para áreas com bons recursos de energia renovável para aproveitar esse potencial para produzir hidrogênio verde barato.

3.3 Hidrogênio verde no contexto mundial

As pressões para reduzir a poluição ambiental têm levado uma série de países e empresas a apostar nesta nova forma de energia limpa, que muitos acreditam ser essencial para "descarbonizar" o planeta (SMINK, 2021)

Nesse viés, o mercado de hidrogênio verde que se descortina é gigantesco. De acordo com cálculos do Hydrogen Council, espera-se que o tamanho do mercado de hidrogênio verde seja responsável por cerca de 20% de toda a demanda de energia no mundo até 2050 (ETENE, 2021, p. 2).

Assim, alguns países já estão desenvolvendo projetos de produção do hidrogênio verde, bem como companhias de petróleo como Repsol, BP e Shell estão entre as que lançaram projetos de hidrogênio verde (SMINK, 2021). Dessa forma, segundo Smink, (2021), vários países anunciaram planos de produção nacional deste combustível renovável. Isso inclui a União Europeia (UE) que, em meados de 2020, se comprometeu a investir US \$430 bilhões em hidrogênio verde até 2030. A intenção da UE é instalar eletrolisadores de hidrogênio renovável de 40 gigawatts (GW) na próxima década, para alcançar sua meta de ter impacto neutro no clima até 2050 (SMINK, 2021).

Diante disso, Smink (2021) destaca a Austrália, a Holanda, a Alemanha, a China, a Arábia Saudita e o Chile como os seis países que lideram a corrida para produção do hidrogênio verde. Nesse sentido, Smink (2021) afirma que:

O maior país da Oceania lidera os planos de produção deste novo combustível limpo com propostas para a construção de 5 megaprojetos em seu território, graças aos seus vastos recursos energéticos renováveis, especialmente energia eólica e solar. O maior projeto — do país e do mundo — é o Asian Renewable Energy Hub, em Pilbara, na Austrália Ocidental, onde está prevista a construção de uma série de eletrolisadores com capacidade total de 14 GW.

A petrolífera anglo-holandesa Shell lidera junto a outros desenvolvedores o projeto NorthH2 no Porto do Ems, no norte da Holanda, que prevê a construção de pelo menos 10 GW de eletrolisadores. A meta é ter 1GW até 2027 e 4GW até 2030, utilizando a energia eólica offshore. A ideia é utilizar o hidrogênio gerado para abastecer a indústria pesada tanto na Holanda quanto na Alemanha.

Os alemães também têm seus próprios projetos de hidrogênio verde em território nacional. O maior é o AquaVentus, na pequena ilha de Heligoland, no Mar do Norte. O plano é construir ali 10 GW de capacidade até 2035.

O gigante asiático é o maior produtor mundial de hidrogênio, mas até agora usou hidrocarbonetos para gerar quase toda essa energia. No entanto, o país está dando agora os primeiros passos no mercado de hidrogênio verde com a construção de um megaprojeto na Mongólia Interior (região autônoma da China), no norte do país. O projeto é liderado pela concessionária estatal Beijing Jingneng, que investirá US \$3 bilhões para gerar 5 GW a partir de energia eólica e solar.

O país árabe com as maiores reservas de petróleo também planeja entrar no mercado de hidrogênio verde, com o projeto Helios Green Fuels. Ele será baseado na "cidade inteligente" futurística de Neom, às margens do Mar Vermelho, na província de Tabuk, no noroeste do país.

O país sul-americano, considerado uma das mecas da energia solar, foi o primeiro da região a apresentar uma "Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde" em novembro de 2020. É também a única nação latino-americana com dois projetos em desenvolvimento: o HyEx, da empresa francesa de energia Engie e da empresa chilena de serviços de mineração Enaex; e o Highly Innovative Fuels (HIF), da AME, Enap, Enel Green Power, Porsche e Siemens Energy (SMINK, 2021).

Outros países também já se destacam no que se refere ao hidrogênio verde, entre eles Portugal e Estados Unidos. Dessa forma, segundo Monteiro (2021), Portugal se comprometeu até 2030 a cumprir várias metas que visam à neutralidade de carbono em 2050. Além disso, o governo aprovou em 2020 porcentagens de hidrogênio verde na indústria dos transportes e nas atuais redes de gás natural. Por sua vez, o novo presidente dos Estados Unidos, Joe Biden,

prometeu em seu plano energético que vai garantir "que o mercado possa ter acesso ao hidrogênio verde ao mesmo custo do hidrogênio convencional em uma década, proporcionando uma nova fonte de combustível limpo para algumas centrais elétricas existentes "(SMINK, 2021).

3.4 Hidrogênio verde no Brasil

A perspectiva de produção do hidrogênio verde é mais recente no Brasil. Entretanto, já existiam abordagens quanto à produção do hidrogênio no contexto brasileiro.

No Brasil, um dos primeiros passos importantes na temática do hidrogênio consistiu na criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998. Em seguida, no ano de 2002, foi instituído pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCac), tendo como objetivo “organizar e promover ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada”. Posteriormente, em 2005, esse Programa passou por reformulação, recebendo o nome de “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH2) (ETENE, 2021, p. 6).

Em 2003, o país tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy), visando trocar informações governamentais, industriais e acadêmicas no assunto de células a combustível e o hidrogênio na sociedade (ETENE, 2021, p. 6).

Nesse sentido, conforme ETENE (2021), o hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis teve respaldo a partir de 2018.

Em 2018, conforme explicitado no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis, o “uso de energias renováveis no Brasil representa uma oportunidade para a produção de hidrogênio por eletrólise quando houver excesso de oferta de energia elétrica de origem intermitente. O hidrogênio possibilita o armazenamento eficiente de energia por longos períodos e pode ser utilizado para mobilidade e geração distribuída de energia.

Em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) apontou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética, elencando diversos usos e aplicações, além de trazer recomendações para a política energética, entre as quais se podem destacar o adequado desenho do arcabouço jurídico-regulatório, que incentive a entrada de tecnologias aplicáveis à cadeia energética do hidrogênio como um todo (produção, transporte, armazenamento e consumo). Soma-se, ainda, a necessidade de trabalhar de forma articulada e coordenada com instituições internacionais. Nesse sentido, o MME indicou à EPE o interesse no desenvolvimento de novo roteiro para o desenvolvimento das tecnologias energéticas relacionadas ao hidrogênio (ETENE, 2021, p. 6).

Desse modo, segundo ETENE (2021), o Brasil adere ao desenvolvimento de hidrogênio verde com a vantagem de ter uma costa privilegiada, incidência de sol durante o ano todo e vento em abundância. O país tem um dos menores custos marginais para geração de energias renováveis, e isso é fundamental para o barateamento do processo de eletrólise. Os

investimentos anunciados para construção de usinas produtoras de hidrogênio verde no Brasil já somam mais de US\$ 22 bilhões, todos concentrados em portos – Pecém, no Ceará; Suape, em Pernambuco; e Açu, Rio de Janeiro (ETENE, 2021, p. 4).

Dentre as iniciativas em prol do desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil, cabe destacar a criação pelo Governo do Estado do Ceará do primeiro HUB de Hidrogênio Verde do país, em 19 de fevereiro de 2021. Essa iniciativa foi seguida pelos estados de Pernambuco, Rio de Janeiro, Bahia e Minas Gerais, que também anunciaram a criação de HUBs de hidrogênio verde, dando visibilidade às potencialidades desses estados, possibilitando a atração de investimentos (ETENE, 2021, p. 7.)

Diante disso, segundo o Portal Hidrogênio Verde, o Brasil já possui 83% da sua matriz energética proveniente de energias renováveis, ocupando o primeiro lugar entre os países em produção de energia limpa. Isso se dá devido às suas características geográficas e climáticas que também habilitam o potencial do país para se tornar um dos líderes globais em hidrogênio verde, uma das principais apostas para a eliminação dos combustíveis fósseis. Além disso, a energia renovável no Brasil apresenta custos de geração que estão entre os mais competitivos do mundo, indicando esta mesma tendência para o hidrogênio verde.

4 HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DA ELETRÓLISE DA ÁGUA

Conforme IRENA (2022), à medida que mais países promovem estratégias profundas de descarbonização, espera-se que o hidrogênio verde produzido a partir de fontes renováveis via eletrólise da água esteja no centro da transição energética como uma peça chave do quebra-cabeça da energia limpa. O cenário de 1,5°C da IRENA projeta que o hidrogênio e derivados serão responsáveis por até 12% do consumo final de energia até 2050.

Nesse contexto, segundo Barroso *et al* (2021),

O sistema de produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise da água, ainda demanda altos investimentos, visto que a única forma de conseguir a energia para manter o eletrolisador é através de energias renováveis pois, caso não sejam utilizadas as energias renováveis o hidrogênio deixaria de ser considerado "verde" já que dependeria de uma forma poluente para manter o eletrolisador ligado (BARROSO *et al*, 2021, p. 3).

Esta maneira de conseguir hidrogênio verde, tal como indica a AIE, pouparia os 830 milhões de toneladas anuais de CO₂ que se originam quando este gás é produzido por combustíveis fósseis. Da mesma forma, substituir todo o H₂ cinza mundial significaria 3.000 TWh renováveis adicionais por ano — similar à demanda elétrica atual na Europa —. Contudo, há algumas interrogações sobre a viabilidade do hidrogênio verde pelo seu alto custo de produção. São dúvidas razoáveis que irão desaparecendo conforme a descarbonização do planeta avance e, como consequência, se torne mais barata a geração de energia renovável (IBERDROLA, 2022).

IRENA (2022) destaca que o processo baseado na eletrólise da água permite que o hidrogênio seja produzido usando eletricidade e água como insumos. A eletrólise é um processo químico bem conhecido que requer adoção mais ampla para reduzir os custos de produção. Portanto, uma redução nos custos do sistema de eletrolisador é essencial e a inovação tecnológica é crucial para esse fim.

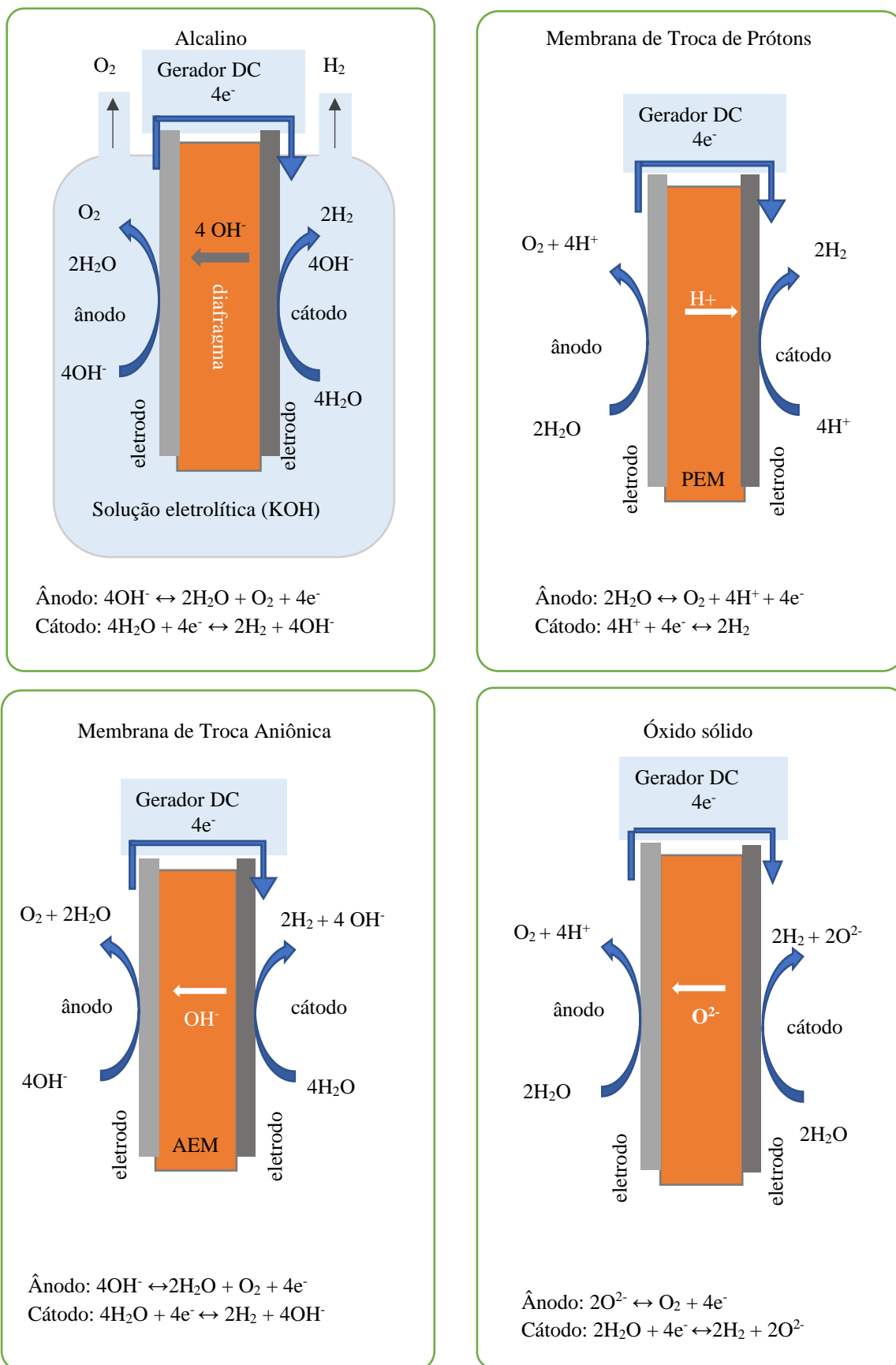
Segundo IRENA (2022), o mercado de eletrolisadores necessários para produzir hidrogênio limpo ainda é pequeno, mas espera-se que desempenhe um papel significativo na descarbonização do setor de energia nas próximas décadas. As adições de capacidade do eletrolisador mais que dobraram em 2021, atingindo 458 MW e devem crescer quatro vezes ou até cinco em 2022.

Desse modo, destacam-se os eletrolisadores do tipo alcalino (AEL), os eletrolisadores de membrana polimérica de troca de prótons (PEM), os eletrolisadores de óxidos sólidos (SOEC) e o eletrolisador de membrana de troca aniônica (AEM). Óxido sólido e membrana de troca aniônica (AEM) têm alto potencial, mas são tecnologias muito menos maduras, com

apenas algumas empresas e fabricantes de equipamentos originais (OEMs) envolvidos em sua fabricação e comercialização (IRENA, 2020, p. 31).

Conforme IRENA (2020), o princípio da eletrólise da água é simples, mas permite a construção de diferentes variações tecnológicas com base em vários aspectos físico-químicos e eletroquímicos. Os eletrolisadores são normalmente divididos em quatro tecnologias principais. Estes são diferenciados com base no eletrólito e na temperatura de operação, que por sua vez orientarão a seleção de diferentes materiais e componentes. Nesse sentido, existem muitas variações dentro de cada tecnologia, com as diferenças mais radicais relacionadas ao design da célula, variação dentro dos componentes e grau de maturidade da tecnologia.

Figura 2 - Diferentes tipos de tecnologias de eletrólise disponíveis comercialmente



Fonte: adaptado de IRENA (2020)

A Figura 2 apresenta os principais eletrolisadores utilizados na eletrólise da água para produzir hidrogênio verde. Os eletrolisadores são operados sob diferentes condições, como pressão e temperatura. Normalmente, os dispositivos PEM e AEL operam em temperaturas moderadas (<80 °C e <220 °C, respectivamente), enquanto os eletrolisadores de óxido sólido operam em temperaturas elevadas (>600 °C) (GALLANDAT *et al*, 2017, p. 36). A Tabela 2 apresenta os três principais tipos de eletrolisadores e alguns parâmetros típicos de operação.

Tabela 2 - Os três principais tipos de eletrolisadores com seus parâmetros característicos e condições típicas de operação

| Tipo | Temperatura de operação [°C] | Pressão de operação [Bar] | Cátodo Gás | Membrana e Eletrólito | Ânodo Gás |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| Ácido (PEM) | 40 - 80 | <30 | H ₂ | Membrana de eletrólito de polímero (PEM) Nafion® H ⁺ | O ₂ , H ₂ O |
| Alcalino (AEL) | 65 - 220 | <30 | H ₂ , H ₂ O | Eletrólito KOH OH ⁻ | O ₂ , H ₂ O |
| óxido sólido (SOEC) | 600 - 1000 | <10 | H ₂ , H ₂ O | ZrO ₂ La _{0.8} Sr _{0.2} Ga _{0.8} Mg _{0.2} O ₃ O ²⁻ | O ₂ |

Fonte: adaptado de Gallandat *et al* (2017)

Diante disso, é relevante destacar as características e funções de cada uma dessas tecnologias.

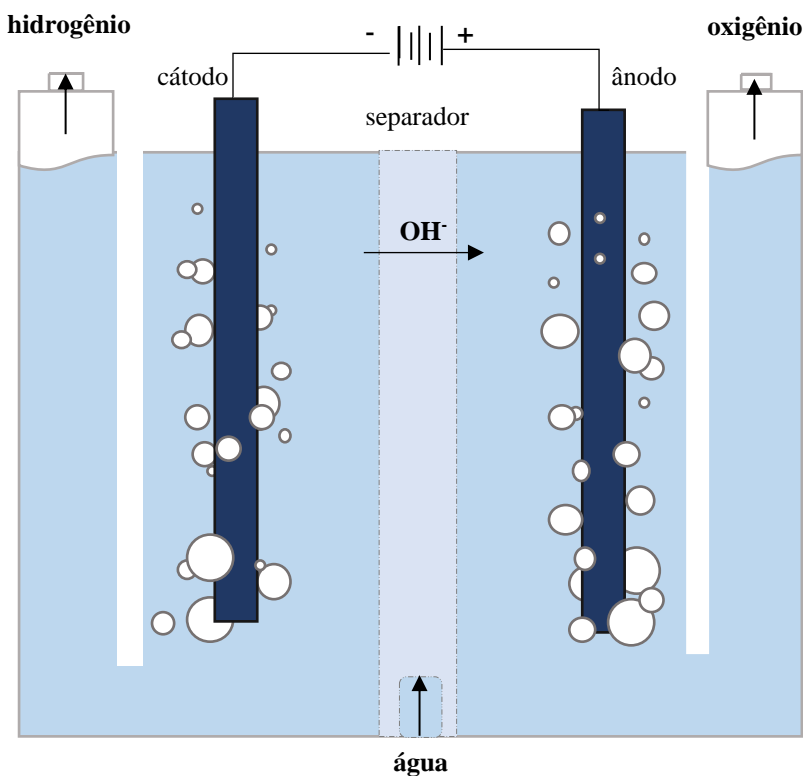
4.1 Eletrolisador alcalino (AEL)

Segundo Gallandat *et al* (2017), o eletrolisador alcalino representa uma tecnologia muito madura, que é o padrão atual para eletrólise em larga escala. Os principais componentes de um eletrolisador alcalino são o eletrólito, os eletrodos, o separador e um recipiente.

Eletrolisadores alcalinos: têm um design simples de pilha e sistema e são relativamente fáceis de fabricar. Atualmente, possuem áreas de eletrodos de até 3 metros quadrados (m^2). eles operam com KOH altamente concentrado (tipicamente 57 mols de soluto por litro de solução [$mol \cdot L^{-1}$]) como eletrólito, diafragmas robustos à base de ZrO_2 e aço inoxidável revestido de níquel (Ni) para os eletrodos. O portador de carga iônica é o íon hidroxila OH^- , com KOH e água permeando a estrutura porosa do diafragma para fornecer funcionalidade para a reação eletroquímica. Isso permite a mistura dos gases produzidos (hidrogênio e oxigênio – H_2 e O_2) que são dissolvidos no eletrólito, limitando a faixa de operação de menor potência e a capacidade de operar em níveis de pressão mais altos (IRENA, 2020, p. 33)

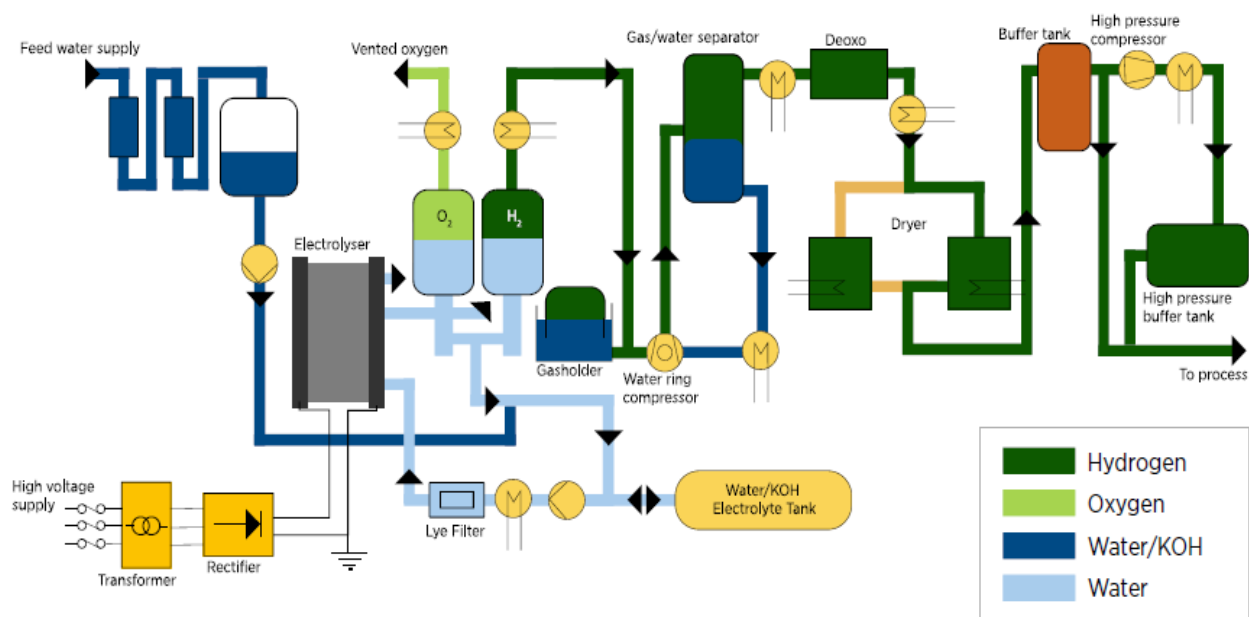
Assim, a Figura 3 ilustra a representação de um eletrolisador alcalino, enquanto a Figura 4 representa um projeto de um sistema típico e o balanceamento de uma planta para um eletrolisador alcalino.

Figura 3 - Ilustração esquemática de um eletrolisador de água alcalino



Fonte: adaptado de Vidas e Castro (2022)

Figura 4 -Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador alcalino



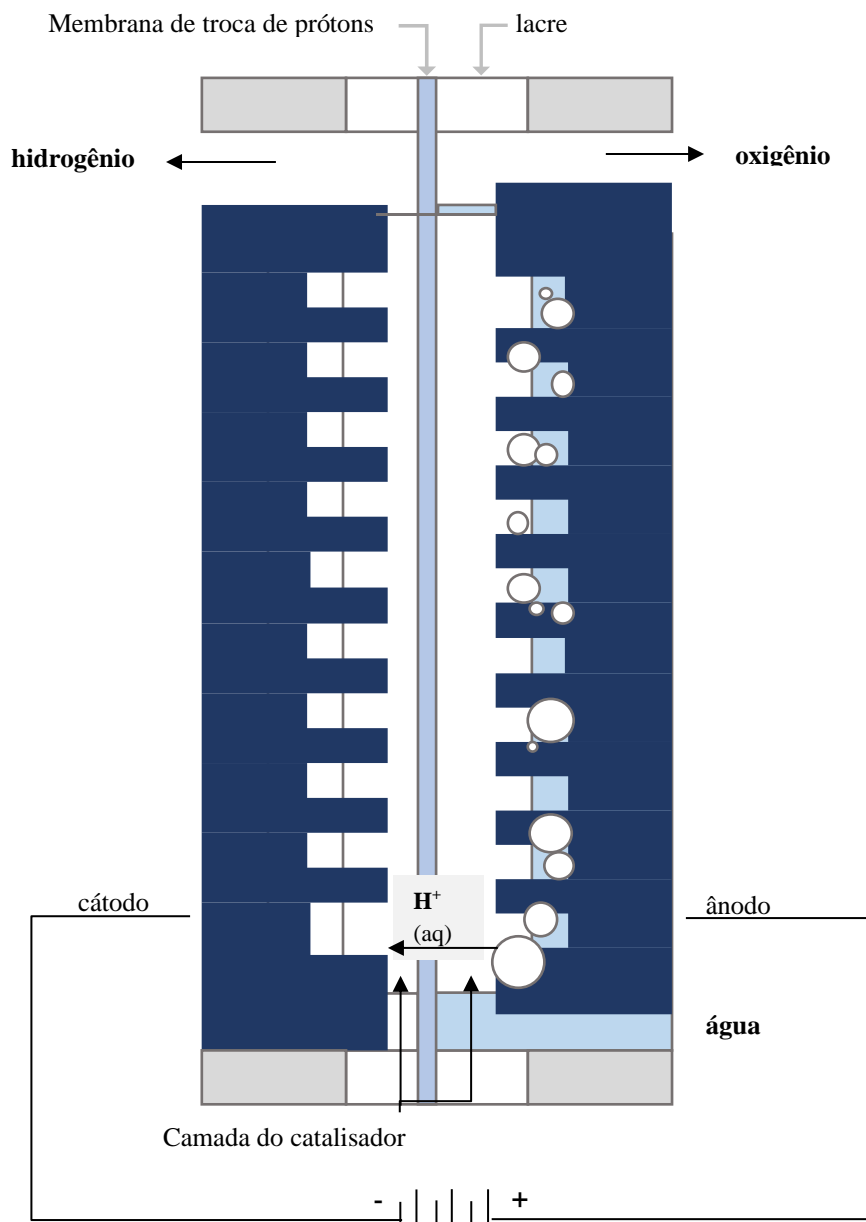
Fonte: IRENA (2020)

4.2 Eletrolisador de membrana polimérica de troca de prótons (PEM)

De acordo com IRENA (2020), os sistemas PEM são muito mais simples que os alcalinos. Eles normalmente requerem o uso de bombas de circulação, trocadores de calor, controle de pressão e monitoramento apenas no lado do ânodo (oxigênio). No lado do cátodo, são necessários um separador de gás, um componente de desoxigenação para remover o oxigênio restante (normalmente não necessário para a pressão diferencial), um secador de gás e uma etapa final do compressor. A Figura 5 contém uma representação esquemática de um eletrolisador PEM.

A membrana cumpre dupla função, ela transporta as cargas iônicas (prótons solvatados) e evita a mistura dos gases produzidos. O eletrólito sólido polimérico utilizado é o Nafion® desenvolvido por E.I. DuPont Co. no final dos anos 1960. Esta membrana apresenta boa estabilidade química, mecânica e térmica para a alta condutividade de prótons. A célula desta tecnologia consiste em eletrodos prensados contra a membrana polimérica, formando assim o conjunto eletrodo-membrana-eletrodo (MEA – Membrane Electrode Assembly). A desvantagem é que apesar dos prótons móveis permanecerem confinados dentro da membrana, o caráter ácido muito forte requer materiais com boa resistência à corrosão. Assim, unicamente catalisadores de metais nobres (Pt, Ru, Pd) são utilizados, elevando os custos da tecnologia (BALBUENA, 2021, p. 34).

Figura 5 - Ilustração esquemática de um eletrolisador PEM

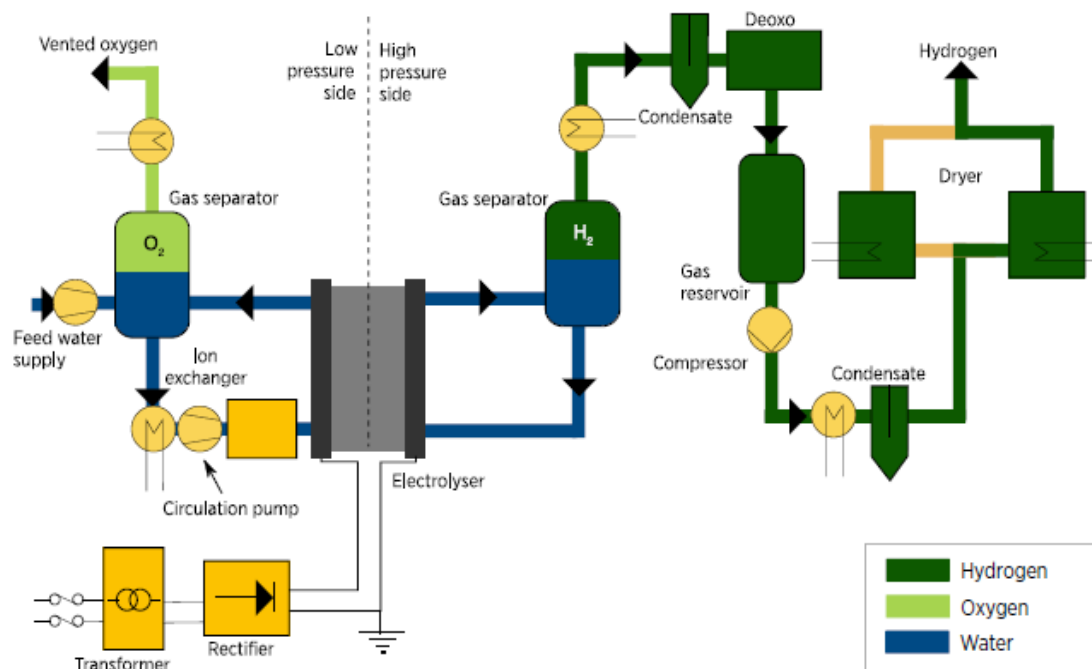


Fonte: adaptado de Vidas e Castro (2022)

Os sistemas de eletrólise baseados em polymer electrolyte membrane - PEM apresentam uma série de vantagens em comparação com os eletrolisadores água-alcalinos tradicionais, entre as quais a limpeza ecológica, características massa-volume consideravelmente menores e custos de energia e, o que é muito importante, um alto grau de pureza dos gases, uma oportunidade de obtenção de gases comprimidos diretamente na instalação, o aumento do nível de segurança (SILVA, CONCEIÇÃO; FIGUEREDO, 2022, p. 3).

A figura 6 apresenta um projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador PEM descrito em IRENA (2020).

Figura 6 - Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador PEM



Fonte: IRENA (2020)

Nesse contexto, Gallandat *et al*, (2017) ressaltam que os eletrolisadores PEM apresentam uma menor capacidade de produção de hidrogênio.

Em geral, os eletrolisadores PEM têm uma baixa capacidade de produção de hidrogênio (<30Nm³/h) e uma eficiência moderada, enquanto os eletrolisadores AEL têm maior capacidade de produção e maior eficiência.

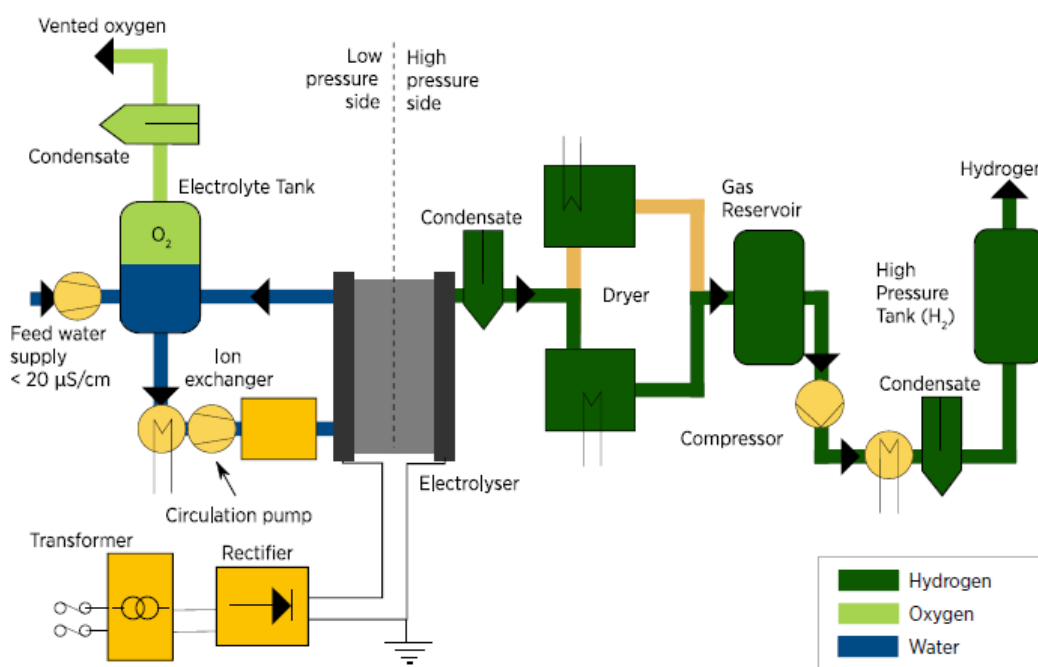
O eixo horizontal inferior mostra o conteúdo de energia do fluxo de hidrogênio produzido com base no Valor de Aquecimento Superior (HHV) - ou seja, a potência mínima necessária para produzir essa quantidade de energia com uma eficiência de conversão de 100%. Assim, a diferença é feita entre a eficiência do eletrolisador PEM do sistema completo ou apenas da pilha, que às vezes é relatada na documentação (GALLANDAT *et al*, 2017, p. 36).

4.3 Eletrolisador de membrana de troca aniônica (AEM)

Conforme IRENA (2020), os eletrolisadores AEM têm conceitos de projeto de sistema semelhantes aos dos eletrolisadores PEM. Devido à baixa maturidade desta tecnologia, há informações limitadas sobre os desafios relacionados à operação de alta pressão diferencial.

Nesta fase inicial, são esperadas melhorias na estabilidade mecânica das membranas AEM, pureza do gás, sua capacidade de suportar altos diferenciais de pressão e sua maior faixa de potência em comparação com a alcalina. Os eletrolisadores AEM ainda estão limitados a uma faixa muito mais estreita de entrada de energia em comparação com os eletrolisadores PEM. A limitação, portanto, não está na pilha em si, mas no dimensionamento do balanço da usina. A Figura 7 apresenta um sistema genérico de acordo com IRENA (2020).

Figura 7 - Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador AEM



Fonte: IRENA (2020)

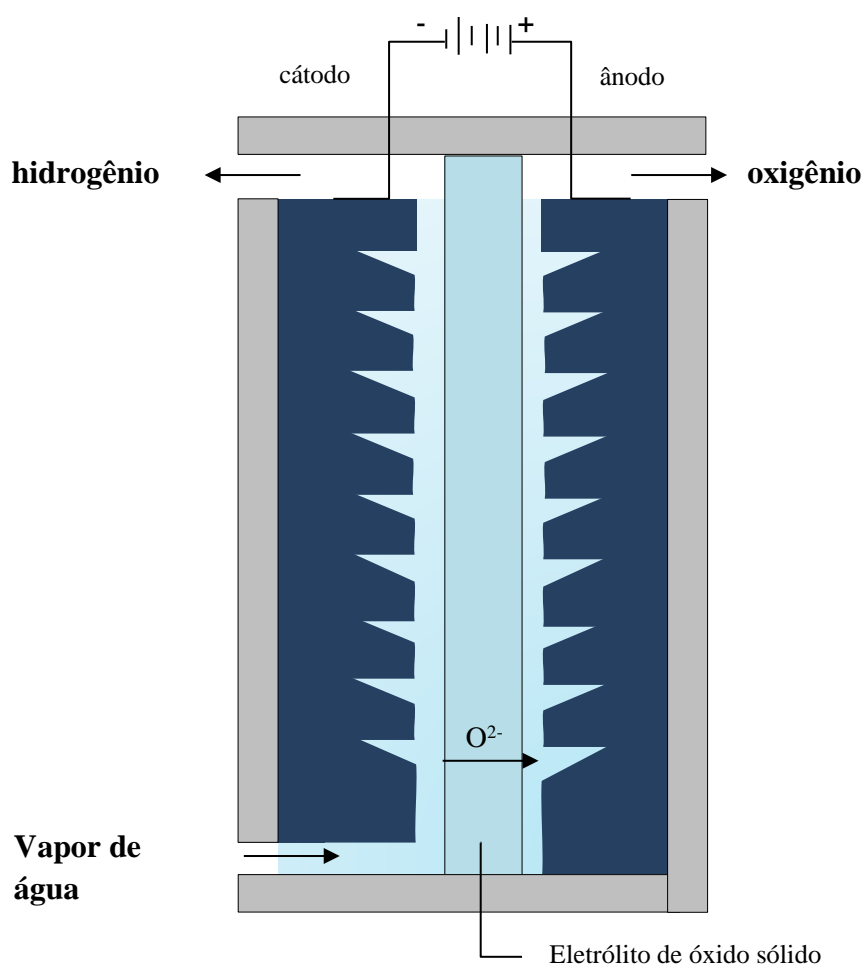
4.4 Eletrolisador de óxido sólido (SOEC)

Segundo Vidas e Castro (2021), a eletrólise de óxido sólido apresenta-se assim como um método vantajoso para produzir hidrogênio, embora ainda com alguns problemas que impedem a sua comercialização em grande escala, nomeadamente relacionados com a falta de estabilidade, degradação e requisitos de temperaturas muito elevadas. É também por isso que não é especialmente adequado para o acoplamento com fontes de energia intermitentes, mas mais com usinas nucleares ou de ciclo combinado.

A tecnologia por óxido sólido consiste na eletrólise de altas temperaturas, operando na faixa entre 800°C e 1.000°C, portanto, o processo é a partir de vapor de água. Isto reduz significativamente o consumo de energia elétrica requerido para a produção de hidrogênio e assim, incrementa a eficiência, porém, uma fonte de calor a altas temperaturas é necessária. As altas temperaturas causam a rápida degradação dos componentes da célula, mantendo esta tecnologia ainda em estágio de P&D (BALBUENA, 2021, p. 35).

Nesse contexto, a Figura 8 apresenta uma ilustração de um eletrolisador de óxido sólido.

Figura 8 - Ilustração esquemática de um eletrolisador de água de óxido sólido



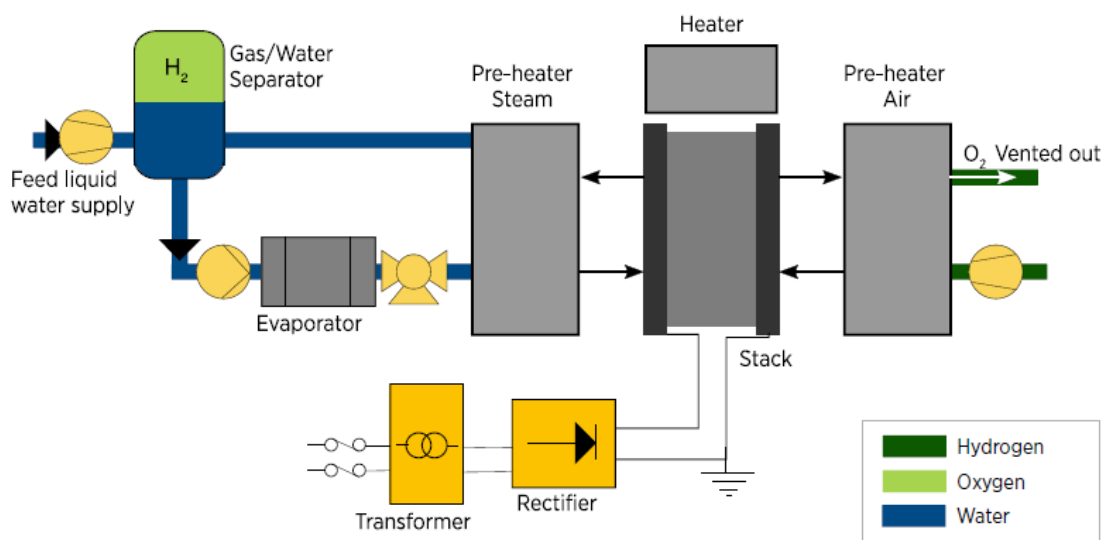
Fonte: adaptado de Vidas e Castro (2022)

Os eletrolisadores de óxido sólido podem ser acoplados a tecnologias de produção de calor para uma maior eficiência do sistema, pois a eletrólise da água é cada vez mais endotérmica com o aumento da temperatura. Portanto, a demanda de energia é rapidamente reduzida, devido ao aquecimento Joule da célula, e então utilizada na reação de separação da água em altas temperaturas. Quando a célula funciona de forma endotérmica, o calor para a vaporização da água pode ser fornecido por outras

fontes, como calor residual da indústria ou usinas de energia solar concentrada. Uma opção importante e totalmente renovável é acoplar SOECs com energia solar concentrada, que poderia fornecer eletricidade e calor ao eletrolisador SOEC (IRENA, 2020, p. 37).

Assim, a Figura 9 apresenta um projeto de uma planta de eletrolisadores de óxido sólido.

Figura 9- Projeto de sistema típico e balanceamento de planta para um eletrolisador de óxido sólido



Fonte: IRENA (2020)

Por fim, ressalta-se que as tecnologias envolvidas na produção de hidrogênio verde ainda estão em constante aprimoramento devido às condições técnicas de produção, separação, armazenamento e transporte do gás hidrogênio, gerado via eletrólise da água.

5 ENSINO DE QUÍMICA

A química é uma ciência que contribui com os avanços tecnológicos da sociedade, estudando a composição da matéria, as modificações sofridas por ela, e explicando os diversos fenômenos envolvidos nessas transformações (ADAMS; NUNES, 2023, p.2).

Uma grande dificuldade para o entendimento dos fenômenos químicos está em se conhecer a constituição das substâncias que formam os organismos vivos e os objetos. Hoje aceitamos a matéria como constituída por substâncias que por sua vez são compostas por átomos, que se ligam formando moléculas ou íons. Átomos isolados só existem em alguns gases, conhecidos como gases nobres. Outros átomos se unem de uma forma diferente formando os metais. Por serem partículas muito pequenas, as porções da matéria que percebemos correspondem a aglomerados de quintilhões, ou mais, de átomos. Átomos e moléculas têm estruturas reais que, no entanto, não podem ser percebidas através dos sentidos. Como estudar o imperceptível? A correlação entre o comportamento dessas minúsculas partículas, que fazem parte do microcosmo, e as propriedades das substâncias pertencentes ao sistema macroscópico foi e continua sendo um grande desafio da ciência química e, conseqüentemente, do ensino de Química (ROQUE; SILVA, 2008, p. 921).

Nesse contexto, Adams e Nunes (2023) ressaltam a necessidade da modificação no processo de ensino e aprendizagem da Química, por meio da introdução de recursos didáticos e metodologias de ensino que busquem articular o conhecimento químico com a realidade do aluno.

Nesse sentido, Borges e Júnior (2019), fundamentados em outros autores, afirmam que:

Autores como Freire (2014); Santos e Schnetzler (1996); Silva e Marcondes (2010), dentre outros, apontam para a necessidade de novas perspectivas e abordagens, que ultrapassem a mera transmissão de conhecimentos científicos, desconexos da realidade social e do dia a dia dos alunos, e assim, promover um ensino contextualizado com o princípio norteador de uma educação voltada para a cidadania que possibilite a aprendizagem significativa de conhecimentos científico-tecnológicos e a intervenção consciente. Além disso, um ensino que mobiliza competências e habilidades para solucionar problemas da vida real (BORGES; JÚNIOR, 2019, p. 110).

Borges e Júnior (2019) afirmam que se faz necessário uma prática de ensino voltada para a química contextualizada, pretendendo-se relacionar os conteúdos de química com o cotidiano dos alunos de forma reflexiva e problematizadora, visando à formação do cidadão, e o exercício do seu senso crítico.

Contextualizar o ensino exige inovar nas metodologias que serão empregadas na sala de aula. A inovação pode ser compreendida como um ato que envolve múltiplas dimensões, como os aspectos cognitivos, culturais, tecnológicos, sociais, éticos, políticos (SOUSA; IBIAPINA, 2023, p. 2).

A experimentação pode ser uma estratégia didática para a promoção de debates, por meio da criação de problemas reais, que possibilitam a contextualização e a investigação (LEITE, 2018, p. 63).

Segundo Leite (2018), a atividade experimental do tipo investigativa favorece a compreensão dos conceitos químicos, sendo importantes principalmente quando convergem seu caráter investigativo com sua função pedagógica, no intuito de auxiliar os estudantes na compreensão dos fenômenos envolvidos.

As atividades experimentais investigativas devem ser utilizadas como orientação, além de dar suporte aos alunos ao pesquisarem problemas oriundos do seu cotidiano. Nessa abordagem, a educação científica valoriza o entendimento dos conteúdos, dos valores culturais, da tomada de decisões relativas ao cotidiano e à resolução de problemas. Essas atividades visam despertar no aluno o gosto pela ciência, estimulando a curiosidade e a busca do conhecimento por meio da investigação. Entendemos que, dessa forma, os estudantes poderão desenvolver competências necessárias para resolver problemas surgidos no seu dia a dia (MONTEIRO; FILHO; RODRIGUES, 2023, p. 4).

Nesse contexto sobre o ensino de Química e seus aspectos, evidencia-se a necessidade de investigar o que a literatura traz sobre o ensino de eletroquímica.

5.1 Ensino de eletroquímica

A eletroquímica é o ramo da química que trata da conversão da energia elétrica em energia química e vice-versa. Os processos eletroquímicos envolvem reações redox (oxidação-redução) nas quais a energia liberada por uma reação espontânea é convertida em eletricidade ou em que a eletricidade é usada para forçar a ocorrência de uma reação química não espontânea (CHANG; GOLDSBY, 2013, p.815).

O dispositivo experimental usado para produzir eletricidade a partir de uma reação espontânea é designado por célula galvânica ou célula voltaica (CHANG; GOLDSBY, 2013, p.818).

Ela é formada por dois **eletrodos**, ou condutores metálicos, que fazem o contato elétrico, mas estão separados por um **eletrólito**, um meio condutor iônico dentro da célula. Em um condutor iônico, uma corrente elétrica é carregada pelo movimento dos íons. O eletrólito em geral é uma solução de um composto iônico em água. A oxidação ocorre em um eletrodo, onde a espécie que está sendo oxidada cede elétrons para o condutor metálico que então fluem para o circuito externo. A redução acontece no outro eletrodo, onde a espécie que está sendo reduzida coleta elétrons do condutor metálico ligado ao circuito externo. A reação química total pode ser vista como um fluxo de elétrons que são empurrados para um eletrodo devido ao processo de oxidação e são puxados do outro eletrodo devido à redução. Esse processo provoca

um fluxo de elétrons no circuito externo que une os dois eletrodos, e essa corrente pode ser usada para realizar trabalho elétrico (ATKINS et al, 2018, p. 545).

Para completar o circuito elétrico, as soluções têm de ser ligadas entre si por um meio condutor pelo qual os cátions e os ânions possam se mover de um compartimento para o outro. Esta exigência é satisfeita por uma ponte salina, a qual, na sua forma mais simples, é um tubo em U invertido que contém uma solução eletrolítica inerte [...] O fato de haver um fluxo de corrente elétrica do ânodo para o cátodo deve-se a uma diferença de potencial entre os dois eletrodos (CHANG; GOLDSBY, 2013, p.819).

De acordo com Atkins *et al* (2018), o eletrodo no qual ocorre a oxidação é chamado de ânodo e o eletrodo em que ocorre a redução é chamado de cátodo. Dessa forma, os elétrons são liberados pela meia-reação de oxidação no ânodo, passam pelo circuito externo e reentram na célula no cátodo, no qual eles são usados na meia-reação de redução. Uma célula galvânica comercial tem o cátodo marcado com o sinal (+) e o ânodo com o sinal (-).

Nesse contexto, diferentemente do processo espontâneo que ocorre nas células galvânicas, a eletrólise é o processo que ocorre nas células eletrolíticas, nas quais a energia elétrica é usada para provocar uma reação química não espontânea.

A célula eletrolítica é a célula eletroquímica na qual ocorre a eletrólise. O arranjo dos componentes das células eletrolíticas é diferente do arranjo da célula galvânica. Em geral, os dois eletrodos ficam no mesmo compartimento, só existe um tipo de eletrólito e as concentrações e pressões estão longe das condições padrão. Como em toda célula eletroquímica, os íons presentes transportam a corrente pelo eletrólito (ATKINS et al, 2018, p. 571).

Como em uma célula galvânica, a oxidação ocorre no ânodo e a redução ocorre no cátodo. Os elétrons completam o circuito deslocando-se por um cabo externo. Do ânodo para o cátodo, os cátions movem-se através do eletrólito na direção do cátodo e, os ânions, na direção do ânodo. Diferentemente de uma célula galvânica, entretanto, na qual a corrente é gerada de forma espontânea, em uma célula eletrolítica ela precisa ser fornecida por uma fonte de energia elétrica externa para que a reação ocorra [...]. Para forçar uma reação em um sentido não espontâneo, a fonte externa deve gerar uma diferença de potencial maior do que a diferença de potencial que seria produzida pela reação inversa (ATKINS et al, 2018, p. 572).

Assim, a eletroquímica como conteúdo curricular, em geral, é apresentada aos estudantes no segundo ano do ensino médio (JESUS; MATSUMOTO, 2022, p.22). Nesse viés, Júnior *et al* (2022), a partir de uma revisão bibliográfica, destacou que a eletroquímica é o conteúdo que mais apresenta dificuldades durante o ensino médio, tanto para alunos quanto para professores.

Júnior *et al* (2022), analisando a abordagem do lixo eletrônico no ensino de química, observou que esta abordagem estava relacionada ao conteúdo de eletroquímica na maioria dos artigos, por meio da experimentação, destacando as metodologias experimentais sobre a caracterização dos componentes de uma pilha, construção de uma pilha de Daniell e verificação da carga elétrica, além de história em quadrinhos, sequência didática e oficinas.

Outros autores, como Gaspar e Junior (2022) exploraram o videocast como ferramenta de aprendizagem no ensino de eletroquímica e circuitos elétricos no ensino interdisciplinar de Física e Química. Nesse sentido, Moia e Luna (2022) propuseram uma metodologia experimental de eletroquímica em cursos de graduação.

Jesus e Nunes (2022) desenvolveram um jogo eletrônico para o ensino de eletroquímica, especificamente sobre pilhas, com o objetivo de contribuir para a construção do conhecimento de forma contextualizada. Dessa forma, os autores afirmam:

A trama da aventura está justamente em fazer o aparelho funcionar, visto que pedir socorro pelo aparelho é a única chance de escapatória. Para suceder, o jogador deve encontrar um livro, uma espécie de mago, que dará dicas de como utilizar os metais que estão na ilha para construir uma pilha capaz de gerar energia elétrica e fazer o aparelho de comunicação funcionar. Dessa forma, o jogo exige conhecimentos relacionados ao tema de eletroquímica e, em específico, das pilhas (JESUS; NUNES, 2022, p.123).

Jesus e Matsumoto (2022) investigaram as possibilidades das TIC na eletroquímica, ressaltando que aprender Química não é a tarefa das mais fáceis, de modo que o professor necessita mediar o conhecimento químico explorando fenômenos ou desenvolvendo explicações que favoreçam os alunos a ampliar suas interpretações sobre o mundo. Nesse sentido, os autores ressaltam que:

Embora construir o conhecimento químico não seja repentino, o uso de recursos tecnológicos aliado a boas práticas pode contribuir para diminuir a dificuldade de aprendizagem dos alunos relacionada a linguagem utilizada pelo professor. Particularmente se considerarmos o conteúdo de eletroquímica, onde professores priorizam o nível representacional muitas vezes por influência da apresentação disposta no livro didático. Entretanto, sem o contínuo questionamento e adaptação das práticas, parece não haver razão em enaltecer bons recursos materiais ((JESUS; MATSUMOTO, 2022, p.29).

Portanto, evidencia-se a utilização de diversas abordagens metodológicas para o ensino de eletroquímica, visando um ensino mais contextualizado e uma aprendizagem mais significativa. De modo que promova não só a compreensão do conteúdo, mas que proporcione o desenvolvimento de uma consciência crítica sobre os fenômenos cotidianos e sua relação com o conhecimento químico.

6 METODOLOGIA

A pesquisa possui abordagem qualitativa. Assim, o trabalho buscou analisar e compreender a relação entre a produção do hidrogênio verde via eletrólise da água e o conteúdo de eletrólise por meio de uma revisão bibliográfica.

As características da pesquisa qualitativa são: objetivação do fenômeno; hierarquização das ações de descrever, compreender, explicar, precisão das relações entre global e o local em determinado fenômeno; observância das diferenças entre o mundo social e o mundo natural; respeito ao caráter interativo entre os objetivos buscados pelos investigadores, suas orientações teóricas e seus dados empíricos; busca de resultados os mais fidedignos possíveis; oposição ao pressuposto que defende um modelo único de pesquisa para todas as ciências (GERHARDT; SILVEIRA 2009, p. 32).

No que tange à classificação quanto aos objetivos, a pesquisa se classifica como exploratória, visto que tem a finalidade de contribuir para uma maior compreensão da importância do hidrogênio verde no contexto do ensino de Química. Estas pesquisas têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições (GIL, 2002, p.41)

De acordo com a natureza da pesquisa, o trabalho possui natureza básica. Dessa forma, para analisar o objeto de estudo em questão, foi realizada uma pesquisa de natureza básica, definida por Gerhardt e Silveira (2009) como aquela que objetiva gerar conhecimentos novos, úteis para o avanço da Ciência.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa realizada se classifica como bibliográfica. Conforme Gil (2002), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. Dessa forma, analisou-se a bibliografia relativa ao hidrogênio verde, bem como a bibliografia relativa ao ensino de eletrólise por meio de uma análise de conteúdo. o levantamento bibliográfico foi realizado utilizando a base de dados do Google Acadêmico devido aos baixos números de artigos publicados nos bancos de dados da Scielo, Periódico CAPES e bibliotecas eletrônicas das Universidades quantos aos trabalhos sobre hidrogênio verde e ensino de eletrólise. Assim foi feito um recorte temporal de dez anos (2012- 2022).

Para analisar a bibliografia sobre hidrogênio verde, os descritores utilizados foram: hidrogênio verde, hidrogênio combustível, eletrolisadores alcalino, eletrolisadores PEM, eletrólise da água; hidrogênio verde no Brasil. No que tange à bibliografia sobre ensino de eletrólise, os descritores utilizados foram: ensino, eletrólise, eletroquímica, experimentação.

A partir disso, foi observado que não há muitos artigos relacionados a esse tema de eletrólise para o ensino de Química. Dessa forma, foram selecionados apenas 7 (sete) artigos acerca do ensino de eletrólise, nos quais se destacaram algumas semelhanças nos objetivos, nas metodologias e nos resultados. Assim, a análise foi segmentada em tópicos, os quais são: abordagem metodológica do conteúdo de eletrólise; resultados obtidos; e considerações trazidas pelos autores.

Dessa forma, o Quadro 1 apresenta a caracterização dos sete artigos analisados sobre o ensino de eletrólise.

Quadro 1- Caracterização dos sete artigos analisados sobre o ensino de eletrólise

| Título | Autores | Ano |
|--|------------------------|------------|
| Aprendizagem ativo-colaborativa-interativa: inter-relações e experimentação investigativa no ensino de eletroquímica | Santos <i>et al.</i> | 2018 |
| A química do banho de ouro em bijuterias: uma proposta de ensino baseada nos três momentos pedagógicos | Zimmer | 2022 |
| O ensino de eletrólise e a galvanização: influência da voltagem e da compatibilidade de materiais | Silva <i>et al</i> | 2016 |
| O uso do Stop Motion na investigação de modelos mentais de alunos do ensino médio sobre os conceitos relacionados com a eletrólise | Rodrigues e Gibin | 2022 |
| Uma abordagem de ensino ativo em um experimento de eletrólise | Arini, Santos e Torres | 2021 |
| Uma sequência didática para o ensino para o ensino de eletroquímica em cursos técnicos integrados ao Ensino médio do IFG | Silva e Ferri | 2020 |
| Construção de uma célula eletrolítica para o ensino de eletrólise a partir de materiais de baixo custo. | Sartori <i>et al</i> | 2013 |

Fonte: A autora.

7 PRODUÇÃO ACADÊMICA ACERCA DA ELETRÓLISE NO ENSINO DE QUÍMICA

7.1 Abordagem metodológica do conteúdo de eletrólise

A partir da leitura dos artigos publicados sobre eletrólise, percebe-se a predominância de algumas abordagens. Nesse sentido, destaca-se a experimentação investigativa do conteúdo de eletrólise por meio da experimentação com células eletrolíticas, que foi a abordagem mais recorrente nos trabalhos encontrados sobre o ensino de eletrólise, além de um artigo abordando o uso de aplicativo.

No que tange aos experimentos de investigação utilizando células eletrolíticas, os autores desenvolvem um percurso metodológico semelhante. Inicialmente, realizam um questionário prévio acerca dos conceitos de eletroquímica; posteriormente, discutem o assunto e desenvolvem o experimento de eletrólise; e, por último, aplicam um novo questionário, solicitam um texto ou uma apresentação, como pode ser observado no trabalho realizado por Zimmer (2022) sobre a química do banho de ouro em bijuterias, a qual propõe uma metodologia desenvolvida em três momentos pedagógicos: problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação desse.

O primeiro momento pedagógico foi marcado pelo compartilhamento de informações entre a turma [...].

No segundo momento, foram explicados os conceitos teóricos sobre eletroquímica. Notou-se um grande interesse dos alunos, evidenciado pela participação e questionamentos de forma mais intensa do que em aulas simplesmente expositivas. No terceiro momento, os alunos ajudaram a montar o sistema de galvanização e cada aluno produziu seu próprio pingente banhado a ouro[...].

Para averiguar se os conceitos propostos haviam sido aprendidos, as questões abordadas inicialmente, em forma de sondagem, foram feitas novamente ao fim da prática (ZIMMER, 2022, p. 78-79).

Em Arini, Santos e Torres (2021), observa-se o mesmo procedimento metodológico a partir de uma intervenção pedagógica aplicada em uma turma de alunos de bacharelado em química.

Essa intervenção consistiu de uma sequência didática aplicada em dois blocos de 100 minutos. No primeiro bloco, os estudantes responderam individualmente ao pré-teste (Quadro 1) e, na sequência, em grupos de 4-5 participantes realizaram um experimento sobre eletrólise da água, com base em um protocolo (Figura 2) disponibilizado com uma semana de antecedência (ARINI; SANTOS; TORRES 2021, p 178).

Silva e Ferri (2020), ao proporem a experimentação na compreensão dos processos de oxidação e redução, apresentam uma abordagem semelhante, que é dividida em três momentos distintos: construção, aplicação e análise. Desse modo,

Para este estudo, foi necessário a elaboração de 02 questionários como instrumento para a coleta e análise de dados. O primeiro foi aplicado e respondido após a realização da atividade 01 de reatividade de metais e o segundo no final da atividade 02 de reação de oxirredução.

Logo após as atividades, os questionários foram aplicados sem a presença do professor da turma, sendo que estes foram divididos para serem respondidos e solucionados individualmente. Gastou-se em média de 30 a 40 minutos na resolução de cada questionário.

Foi realizada uma análise de conteúdo para as respostas dos questionários de acordo com a proposta de “Análise Temática de Bardin”, em que cada fase do roteiro segue regras bastante específicas, executando uma organização em torno de três pólos cronológicos: a pré-análise; a exploração do material e o tratamento dos resultados (BARDIN, 2009). (SILVA; FERRI, 2020, p.27647).

De modo similar, Sartori *et al* (2013) propõem a construção de uma célula eletrolítica com aplicação na eletrólise de uma solução de iodeto de potássio, em que descreve e analisa todo o procedimento para a sua construção, relacionando a experimentação ao conteúdo prévio, bem como ao conhecimento gerado.

No que se refere à experimentação investigativa com o uso de aplicativos, evidencia-se o trabalho realizado por Rodrigues e Gibin (2022), o qual teve por objetivo avaliar os modelos mentais expressos pelos alunos do ensino médio sobre a eletrólise, por meio de animações produzidas no aplicativo “Stop Motion”. O percurso metodológico dos autores converge com os observados nos trabalhos anteriores.

Inicialmente foi aplicado um questionário que trazia questões sobre o funcionamento básico da eletroquímica: constituição da corrente elétrica, funcionamento dos sistemas eletrolíticos em termos de potências de redução, reações de oxidação-redução, e diferenciação entre cátodo e ânodo. As informações obtidas por meio do questionário permitiram a visualização dos conhecimentos prévios dos alunos sobre o assunto.

Foi dada ênfase a um exemplo envolvendo a eletrólise aquosa do hidróxido de sódio, a substância química com a qual os alunos fizeram a atividade experimental utilizando o reagente diluído e tomando as precauções necessárias de segurança [...].

Após a realização do experimento e empregando a técnica das animações em stop motion, os alunos produziram animações a respeito do funcionamento submicroscópico da eletrólise do hidróxido de sódio [...]. Foram usados diversos instrumentos para a coleta de dados, incluindo o questionário aplicado no início do minicurso, e as animações elaboradas pelos alunos (RODRIGUES; GIBIN, 2022, p. 227-229).

Desta forma, quando se reflete sobre as abordagens metodológicas presentes nesses trabalhos analisados, percebe-se que os autores se restringem a uma experimentação voltada para aprimorar os conceitos e possibilitar a assimilação do conhecimento teórico, sem aludir à importância da eletrólise na vida dos alunos e dos próprios professores. Assim, denota-se a preocupação apenas com o entendimento do conteúdo, sem proporcionar uma visão mais

abrangente e relevante do tema. Nessa perspectiva, alguns dos trabalhos ainda trazem em sua fundamentação a aplicação prática de alguns processos eletrolíticos, entretanto, limitam-se a exemplificar.

A abordagem predominante nos artigos analisados reflete a preocupação do professor em buscar o entendimento teórico do aluno por meio de uma experimentação, a partir da qual intenta-se obter a compreensão do conteúdo de eletrólise. Nesse viés, percebe-se uma ausência de finalidade em desenvolver ou reforçar nos alunos uma consciência crítica da importância da eletrólise no contexto da vida desse discente, ou seja, não se procura estabelecer uma conexão entre o conteúdo de eletrólise e importância do conhecimento e compreensão dela em muitos contextos do dia a dia dos alunos.

7.2 Análise dos resultados obtidos nos trabalhos selecionados

Zimmer (2022), após a experimentação de galvanoplastia do banho de ouro em bijuterias, afirmou que “foi constatado que todos os alunos, que antes não sabiam distinguir a diferença entre pilhas e eletrólise, ânodo e cátodo, semirreações de redução e de oxidação, conseguiram desenvolver as questões propostas corretamente, após a prática experimental” (ZIMMER, 2022, p. 79).

Rodrigues e Gibin (2022) observaram que a maior parte dos alunos apresentaram dificuldades sobre os conceitos relacionados com o conteúdo da eletrólise em suas respostas ao questionário aplicado (Quadro 2), com ausências de justificativas ou explicações, de forma que essas respostas não foram consideradas corretas.

Quadro 2 - Questionário aplicado por Rodrigues e Gibin (2022)

| questão | conceito |
|---------|---|
| 1 | Representação ilustrativa de uma corrente elétrica. Do que é constituída a corrente elétrica? |
| 2 | Identificação dos metais correspondentes ao cátodo e ao ânodo em termos de oxidação e redução |
| 3 | Como ocorre a eletrólise? Semelhanças e diferenças em relação à pilha |
| 4 | Identificação do cátodo e do ânodo na eletrólise |
| 5 | Observação dos Nox dos metais, e correlação com as reações oxirredução |

Fonte: adaptado de Rodrigues e Gibin (2022)

Observou-se que muitos estudantes confundiram o cátodo e o ânodo da eletrólise com o cátodo e o ânodo presente nas pilhas, pois como exemplo, o polo negativo na eletrólise é o cátodo e nas pilhas é o ânodo. E a mesma inversão procede com o polo positivo destes sistemas.

Em relação aos conhecimentos sobre a eletrólise e sua diferenciação das pilhas (questões 3 e 4), houve predomínio de erros ou ausência de respostas. É um fato desconhecido por parte dos alunos pesquisados, de que seria necessária a passagem de uma corrente elétrica, na eletrólise, para que a reação química proceda, tratando-se de um processo não espontâneo, contrariamente às pilhas e baterias, nas quais a corrente elétrica é gerada espontaneamente por meio das reações de oxirredução (RODRIGUES; GIBIN, 2022, p. 232).

Ao analisar os alunos individualmente e seu desempenho geral no questionário, percebe-se que grande parte obteve uma compreensão baixa, de 0 a 50% de entendimento sobre o sistema eletroquímico, conforme a Figura 1 a seguir. O desempenho individual de cada aluno, permitiu concluir, que grande parte dos envolvidos obteve uma compreensão baixa, ou seja, não apresentaram um bom entendimento sobre os sistemas eletroquímicos requisitados.

Nenhum dos alunos apresentou uma compreensão alta no questionário e cerca de 35% dos alunos obteve um nível de compreensão médio. A maioria dos alunos (65%) se adequou à categoria de “Compreensão Baixa” (RODRIGUES; GIBIN, 2022, p. 232).

No mesmo sentido, Silva e Ferri (2020) observaram que ocorreram bastantes erros nas respostas dos alunos às perguntas 08, 09 e 10 (Quadro 3), sobre a equação de semirreação de redução e de oxidação, sobre a equação global, bem como sobre o cálculo do potencial:

Quadro 3 - Questionário aplicado por Silva e Ferri (2020)

| questão | conceito |
|---------|---|
| 1 | Quais evidências da ocorrência da reação química? |
| 2 | Qual espécie química possibilita a formação da coloração azul? |
| 3 | Os cristais ao redor do fio de cobre são formados por qual espécie química? |
| 4 | Qual espécie química reduz? |
| 5 | Qual espécie química oxida? |
| 6 | identifique o agente oxidante. |
| 7 | Identifique o agente redutor. |
| 8 | Escreva a equação da semirreação de oxidação. |
| 9 | Escreva a equação da semirreação de redução. |
| 10 | Escreva a equação global da reação. |
| 11 | Calcule a variação de potencial do processo (força eletromotriz, fem). |
| 12 | Se fosse entre nitrato de cobre e prata pura, a reação ocorreria? |

Fonte: adaptado de Silva e Ferri (2020)

Por outro lado, quando foi feita a análise das questões 08, 09 e 10, verificou-se que a maioria das respostas incorretas se apresentava nessas questões. Mesmo constatando que os alunos compreenderam os conceitos de Eletroquímica, ao examinar a questão 08 notou-se que houve 35% de erro, na questão 09 a quantidade de erros aumentou para 85% e na questão 10, o número de erros aumentou ainda mais, chegando a atingir 90%. Isso pode ser explicado, pelo fato de ser um conteúdo de 1º ano e com isso a pesquisadora considerou que os alunos já tinham conhecimento sobre os conteúdos de estequiometria (balanceamento de equações químicas e das cargas formais dos elementos) (SILVA; FERRI, 2020, p. 27653)

Os alunos apresentaram dificuldades em conteúdos e conceitos considerados básicos. Pensando em melhorar o desempenho desta atividade, seria importante repensar uma nova estratégia para melhorar o ensino quando esse envolvesse os conceitos de metal e de íon, balanceamento de equações, reações químicas contendo íons, número de oxidação e propriedades periódicas (SILVA; FERRI, 2020, p. 27653).

Embora alguns dos artigos apresentem algumas falhas na compreensão dos alunos após a experimentação, Arini, Santos e Torres (2021) relata que o desempenho dos estudantes no pós-teste foi significativamente maior do que no pré-teste. Nesse sentido, “o procedimento permitiu que os estudantes construíssem conceitos sobre o assunto estudado com base nos resultados dos experimentos e na discussão com os colegas” (ARINI; SANTOS; TORRES, 2021, p. 181).

Tais resultados indicam que usar o experimento como forma de apresentação do fenômeno a ser estudado, e não como recurso comprobatório do arcabouço teórico discutido previamente, é uma forma eficiente de promoção da aprendizagem (ARINI; SANTOS; TORRES, 2021, p. 181).

De modo semelhante, Silva *et al* (2016) afirmam que “embora não tenha sido suficiente para a aprendizagem efetiva de todos os conceitos envolvidos, o experimento realizado teve boa receptividade pelos estudantes, estimulou-os a relacionar o que foi observado a conceitos prévios e facilitou a apreensão de novos conceitos” (SILVA *et al*, 2016, p. 316).

Nesse contexto, Sartori *et al* (2013), em sua proposta de construção de uma célula eletrolítica, aponta que

Os experimentos descritos são facilmente executados em uma sala de aula utilizando materiais alternativos, o que permite ao aluno uma postura construtivista, permitindo relacionar novas informações às que os alunos têm conhecimento como os conceitos de eletrólise, de reações de oxidação-redução, utilização de tabelas de potenciais padrões de redução e uso de indicadores de pH, conduzindo-os a uma aprendizagem significativa, além de visualizar e interpretar os fenômenos químicos presentes no cotidiano, facilitando o aprendizado (SARTORI *et al*, 2013, p. 111).

Nesse viés, a partir dos resultados apresentados nos artigos selecionados, evidencia-se uma falha no alcance dos objetivos para a experimentação no ensino de eletrólise em alguns dos artigos, visto que foi observado que, mesmo após os experimentos e as análises dos procedimentos em aula, os alunos não alcançaram o conhecimento desejado sobre a eletrólise e conceitos necessários, como pode ser evidenciado nos resultados apontados por Rodrigues e

Gibin (2022), bem como por Silva e Ferri (2020). Por outro lado, Arini, Santos e Torres (2021) obtiveram resultados satisfatórios no que se refere a aprendizagem dos alunos, utilizando uma abordagem de experimentação por meio de células eletrolíticas.

Dessa maneira, revela-se necessário destacar que o ensino sobre a eletroquímica, principalmente a eletrólise, não pode ser baseado apenas na experimentação nem somente na explanação do conteúdo. Ademais, ressalta-se que um experimento num contexto específico e circunscrito à demonstração daquele tópico ou conteúdo pode ajudar na compreensão dos conceitos necessários, mas não é capaz, sozinho, de proporcionar o efetivo entendimento de como ocorre o processo eletrolítico e suas características.

Nessa perspectiva, é válido evidenciar a dificuldade que persiste na aprendizagem do conteúdo de eletroquímica, destacando-se o conteúdo de eletrólise, a qual foi observada a partir dos resultados e considerações finais dos autores, conforme afirma Rodrigues e Gibin (2022):

Acredita-se que o conhecimento conceitual sobre a eletroquímica seja difícil para os estudantes envolvidos. No entanto, esses conceitos atrelados à geração de corrente e à interpretação de reações de oxidação e redução, possuem uma dificuldade intrínseca atrelada a complexidade dos fenômenos submicroscópicos, pois segundo Caramel e Pacca (2011, p. 9) “muito pouco é conhecido por eles [os alunos] sobre o mecanismo microscópico de geração e circulação da corrente elétrica e a interpretação desses fenômenos em termos de entidades eletrostáticas é precária [...]” (RODRIGUES; GIBIN, 2022, p. 232).

Desse modo, tendo em vista os resultados apresentados pelos autores selecionados, é importante analisar as considerações desses trabalhos sobre o ensino da eletroquímica, especialmente no que se refere à eletrólise.

7.3 Considerações trazidas pelos autores

A análise das considerações trazidas nos trabalhos tem sua importância devido à percepção que os autores fazem acerca do trabalho desenvolvido, bem como do ensino de eletrólise e conceitos pertinentes ao tema.

Nesse viés, Zimmer (2022) ressalta:

Esta proposta mostra como é possível desenvolver uma atividade didática com o objetivo de fazer com que estudantes do ensino médio sejam capazes de compreender o funcionamento e funcionalidade de uma célula eletrolítica, além de contribuir para compreensão de conceitos sobre eletrólise, reações de oxirredução e espontaneidade de reações.

A metodologia desenvolvida sobre a eletrodeposição de ouro em bijuterias, sob a abordagem dos Três Momentos Pedagógicos, permite a contextualização do estudo de eletroquímica e de processos envolvidos no mundo concreto, promovendo maior interesse e melhorias na compreensão de conceitos teóricos, contribuindo para um aprendizado significativo (ZIMMER, 2022, p.79).

Inicialmente, evidencia-se que as considerações apresentadas pela autora se referem ao trabalho desenvolvido, ressaltando a melhoria na compreensão dos conceitos teóricos e a contextualização da eletroquímica com processos concretos. Entretanto, não se observa uma percepção mais crítica relativa à importância do conteúdo para a compreensão de processos que estão presentes na vida do aluno.

No que tange às considerações apontadas por Rodrigues e Gibin (2022), os autores afirmam que:

Mesmo reconhecendo o pequeno avanço tido pelos modelos mentais dos alunos quanto à eletrólise, devido à complexidade do tema e às muitas dificuldades em visualizar e criar um modelo mental relativo à perda e ganho de elétrons, estequiometria de reações e movimentação das espécies químicas, conclui-se que a utilização do aplicativo Stop Motion Studio no ensino de Química, para criação de animações representativas da dinâmica das espécies submicroscópicas, é vantajosa. Se tornou evidente o papel protagonista do aluno, no processo de ensino e aprendizagem, ao fazer representações imagéticas e reflexões sobre o fenômeno químico visto experimentalmente e explorado de forma didática.

O envolvimento do aprendiz é algo que muitas vezes se encontra ausente nas salas de aula, tanto no ensino público quanto no ensino privado, devido ao uso ainda frequente de métodos tradicionais. E a falta de interesse dos alunos pela Ciência corrobora para a perda de qualquer motivação em aprender conteúdos simples ou complexos (RODRIGUES; GIBIN, 2022, p.239).

Destaca-se nas considerações apontadas pelos autores o pequeno avanço tido pelos modelos mentais quanto à eletrólise, atribuindo esse pequeno avanço à complexidade do tema e às muitas dificuldades em visualizar e criar um modelo mental relativo à perda e ao ganho de elétrons, à estequiometria e à movimentação das espécies químicas. Assim, ressalta-se a necessidade de se trabalhar de forma mais concreta e mais abrangente, de modo a proporcionar um conhecimento mais ampliado do tema eletrólise, que permita aos alunos identificar e interpretar os fenômenos que acontecem num processo eletrolítico, sobretudo naqueles que ocorrem no ânodo e no cátodo, como a transferência de elétrons e a corrente elétrica necessária, além dos papéis das espécies presentes.

Ademais, ressalta-se o que é apontado por Rodrigues e Gibin (2022) sobre a falta de interesse dos alunos pela Ciência, refletindo na aprendizagem dos conteúdos. Nessa perspectiva, a relevância do conhecimento científico se sobressai, reforçando a necessidade de trazer o aluno para aplicação dessa ciência no seu contexto de mundo, não de maneira superficial ou apenas com experimento específico restrito à compreensão de um tópico, mas demonstrando a importância daquele conhecimento no contexto de vida do aluno, buscando entender como a teoria se desenvolve na prática.

O procedimento permitiu que os estudantes construíssem conceitos sobre o assunto estudado com base nos resultados dos experimentos e na discussão com os colegas. De fato, um dos papéis intrínsecos da ciência é explicar os fenômenos naturais; oferecendo o fato experimental antes de sua explicação ou teorização, o professor reproduz didaticamente o fazer científico. Essa abordagem muda o papel do professor tanto quanto o dos alunos. Os estudantes precisam abandonar o papel de receptores passivos de informações para acionar a curiosidade investigativa; o professor baliza a discussão, monitora os raciocínios e avalia as conclusões. O resultado do pós-teste mostra que a construção de conhecimento sobre o assunto foi adequada e abrangente (ARINI, SANTOS E TORRES, 2021, p. 180-181).

No que se refere às considerações propostas por Arini, Santos e Torres (2021), destaca-se a conclusão acerca da construção dos conceitos sobre os assuntos abordados de modo adequado e abrangente, conforme os autores. Nesse viés, infere-se que a abordagem metodológica de experimentação para o tema se eletrólise está voltada apenas para a construção de conceitos do que foi estudado, corroborando a percepção de Zimmer (2022).

Ao analisar os apontamentos finais no trabalho de Silva e Ferri (2020), nota-se que autores enfatizam a assimilação de conceitos pela maioria dos estudantes, além de ressaltarem desafios ao se trabalhar o tema.

A condução da atividade diretamente no laboratório sem a apresentação dos conceitos básicos nas aulas teóricas se mostrou como um desafio, o que requereu a escolha de um tema que pudesse se apresentar como mais próximo do cotidiano dos alunos. Mesmo assim as respostas obtidas apontam que esta abordagem diretamente em atividade experimental, necessita de uma reorganização do planejamento para que possa contribuir melhor para o ensino de eletroquímica.

Os conceitos de oxidação, redução, agente redutor, agente oxidante e variação de potencial da reação foram bem assimilados pela maioria dos estudantes, evidenciando que a maneira de como foi conduzida a proposta, apresentação dos metais e suas respectivas soluções, pode ser considerada promissora, desde que sejam contornadas as possíveis interferências na visualização, visto que os aspectos visuais são muito explorados nesta sequência didática (SILVA; FERRI, 2020, p. 27653).

Por fim, evidenciou-se nos artigos estudados a preocupação dos autores com a compreensão do conceito de eletrólise, trazendo para isso uma experimentação específica como auxílio para a compreensão do assunto. Nesse sentido, os autores destacaram a dificuldade dos alunos frente ao entendimento do conteúdo por ser abstrato e complexo. Porém, ressaltou-se também, na maioria dos trabalhos, a perpetuação da falha na compreensão do processo de eletrólise e de alguns conceitos de eletroquímica necessários, mesmo após a abordagem de experimentação e discussão.

Por fim, ressalta-se a importância dessas abordagens para o ensino de eletrólise, visto que pode auxiliar o aluno na visualização do processo eletrolítico. Mas destaca-se também que a experimentação não é a única ferramenta de contextualização e promoção do conhecimento, já que o processo de aprendizagem pode se dar por múltiplas formas, considerando as teorias da aprendizagem constantes na literatura científica. Nessa perspectiva, cabe ressaltar a

necessidade de novas abordagens do tema eletrólise, que vise proporcionar uma assimilação mais concreta e mais ampla, considerando a relevância do processo de eletrolise para a vida de todos.

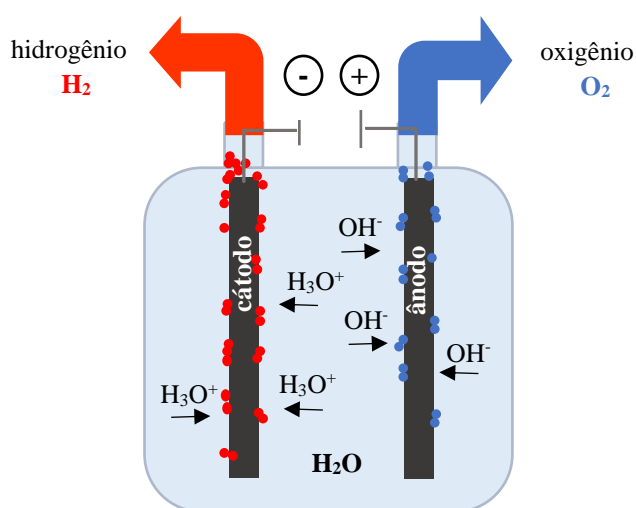
8 HIDROGÊNIO VERDE E A ELETRÓLISE PARA O ENSINO DE QUÍMICA

8.1 A eletrólise da água e a rota de produção do Hidrogênio Verde

A eletrólise de água é a reação química de oxirredução provocada pela passagem de corrente elétrica contínua, correspondente à dissociação da molécula de água nos seus constituintes, a saber, o hidrogênio e o oxigênio, na presença de um eletrólito (GOMES, 2022, p.2).

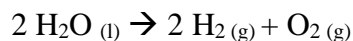
Dessa forma, a Figura 10 ilustra o processo de eletrólise da água em uma célula eletrolítica:

Figura 10 - Processo de eletrólise da água



Fonte: adaptado de IRENA (2022)

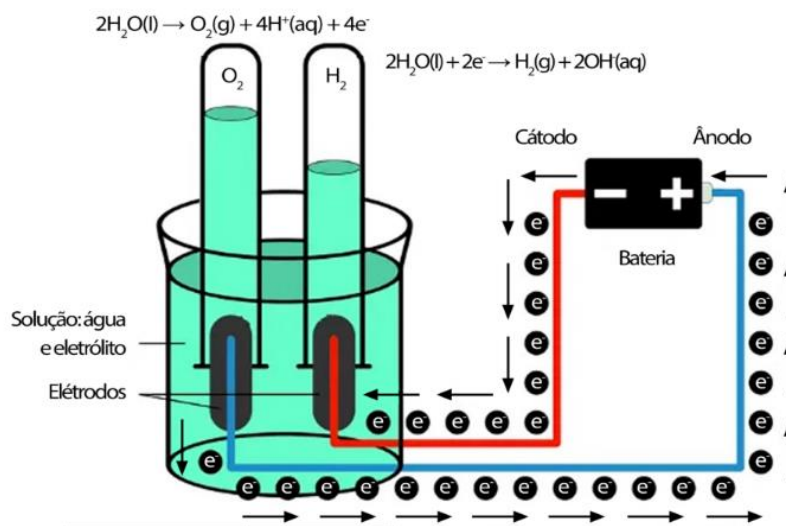
Assim, a eletrólise da água ocorre pela quebra de ligações das moléculas de água, a qual gera o gás hidrogênio e o gás oxigênio, representada pela reação global:



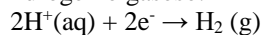
$$E_{\text{célula}} = -1,23 \text{ V em pH}=7$$

A água em um béquer, nas condições atmosféricas (1 atm e 25°C), não se decompõe espontaneamente para formar hidrogênio e oxigênio gasosos porque a variação de energia de Gibbs padrão associada à reação é positiva e elevada[...]. Contudo, esta reação pode ser forçada eletrolisando a água em uma célula (CHANG; GOLDSBY, 2013, p. 844).

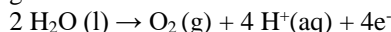
Figura 11 - Representação das meias-reações na eletrólise da água



Considerando água pura, no cátodo, carregado negativamente, dá-se uma reação de redução com o fornecimento de elétrons para cátions de hidrogênio para formar o hidrogênio gasoso:

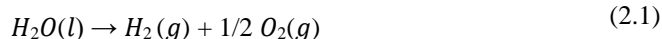


No ânodo, carregado positivamente, dá-se uma reação de oxidação, gerando oxigênio gasoso e fornecendo elétrons ao ânodo para fechar o circuito (GOMES, 2022, p.3):



Dessa maneira, Segundo Atkins *et al* (2018), “para forçar uma reação em um sentido não espontâneo, a fonte externa deve gerar uma diferença de potencial maior do que a diferença de potencial que seria produzida pela reação inversa” (ATKINS *et al*, 2018, p. 571). Assim, no caso da eletrólise da água,

Termodinamicamente, a dissociação da água é um processo não espontâneo, portanto, a célula de eletrólise requer fornecimento de energia externa, como por exemplo, a eletricidade. Isto é conhecido como um processo endergônico. Nas células de eletrólise, trabalho elétrico é fornecido para dissociar a molécula da água em hidrogênio e oxigênio gasoso segundo a equação 2.1. Do ponto de vista energético e de acordo com a primeira lei da termodinâmica, a quantidade de eletricidade (nFE) necessário no equilíbrio para dissociar um mol de água segundo a equação 2.1 é igual à variação da energia livre de Gibbs (ΔG_d) da reação de dissociação da água segundo a equação 2.5 (BALBUENA, 2021, p. 30):



$$\Delta G = -nFE \quad (2.5)$$

No mínimo, 1,23V precisa ser disponibilizado pela fonte externa para superar o “poder de empurrar”, natural da reação, na direção oposta. Na prática, a diferença de potencial aplicada tem de ser significativamente superior à do potencial da célula, para inverter a reação espontânea e obter uma velocidade significativa de formação do produto. A diferença de potencial adicional, que varia de acordo com o eletrodo, é chamada de sobrepotencial (ATKINS *et al*, 2018, p.572).

Potenciais de referências são comumente calculados a partir das condições padrões de temperatura ($T^\circ=298\text{ K}$) e pressão ($P^\circ=1\text{ bar}$). A água é líquida, H_2 e O_2 são gasosos e as mudanças de energia livre, entalpia e entropia para a reação da equação 2.1 são dados, respectivamente, nas equações 2.9, 2.10 e 2.11 (BALBUENA, 2021, p.30):

$$\Delta G_d^0 (\text{H}_2\text{O}) = +237,22 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \rightarrow E^0 = \frac{\Delta G_d^0(\text{H}_2\text{O})}{2F} = 1,23\text{V} \quad (2.9)$$

$$\Delta H_d^0 (\text{H}_2\text{O}) = +285,84 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \rightarrow E^0 = \frac{\Delta H_d^0(\text{H}_2\text{O})}{2F} = 1,48\text{V} \quad (2.10)$$

$$\Delta S_d^0 (\text{H}_2\text{O} (l)) = +163,15 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} \quad (2.11)$$

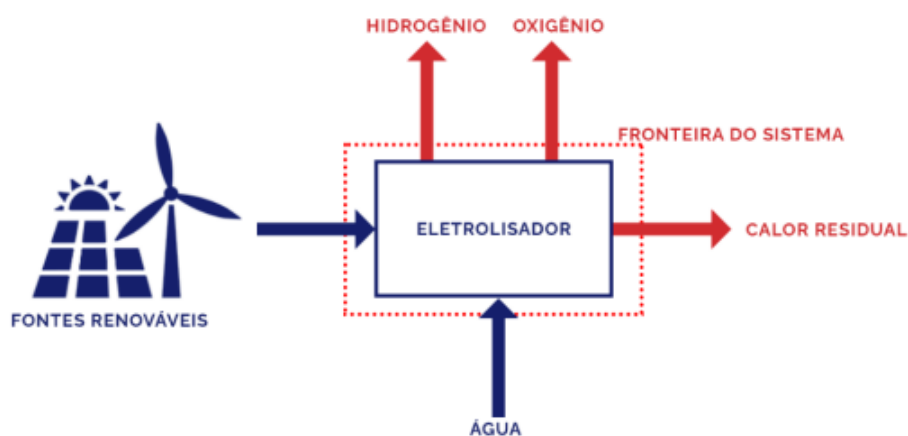
Uma vez que a célula atinge o potencial de equilíbrio, as reações de eletrodo são inerentemente lentas e precisam a aplicação de um sobrepotencial η , acima do potencial de equilíbrio, para dar partida às reações e superar as barreiras de ativação, as baixas taxas de reação e formação de bolhas. Assim, energia adicional deve ser fornecida ao sistema (BALBUENA, 2021, p. 30).

O sobrepotencial total é a somatória das barreiras da energia de ativação das reações de evolução de hidrogênio e oxigênio, concentração da solução eletrolítica e formação de bolha. (BALBUENA, 2021, p. 32).

Segundo Atkins *et al* (2018), na produção de hidrogênio e de oxigênio a partir da eletrólise da água, utilizando eletrodos de platina, o sobrepotencial necessário seria 0,6 V. Dessa forma, é preciso empregar um potencial de 1,8 V (0,6 + 1,23 V) na eletrólise da água com eletrodos de platina.

Nesse contexto, situa-se a eletrólise da água para a produção do hidrogênio verde, no qual o potencial aplicado é proveniente de fontes renováveis de energia, como a solar, a eólica ou outras, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Representação da produção de hidrogênio verde

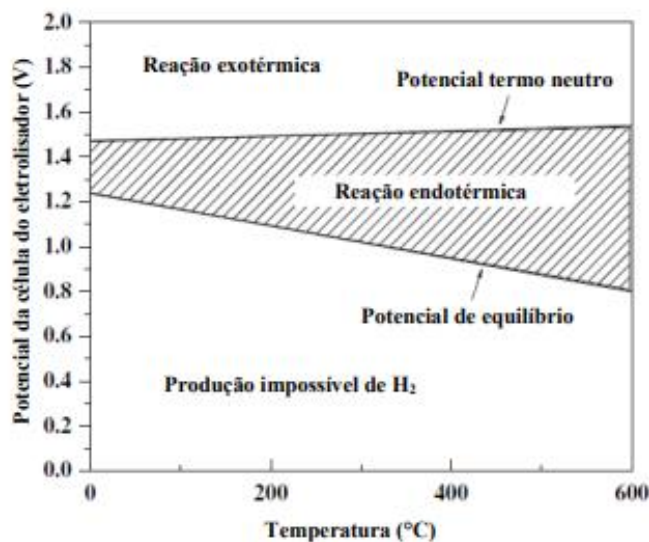


Fonte: Pereira (2022)

Dessa forma, Balbuena (2021) apresenta a relação entre o potencial do eletrolisador e a temperatura de operação. Nesta, é possível identificar três regiões onde a eletrólise não pode

acontecer ou acontece de forma endotérmica ou exotérmica, dividido pelos potenciais de equilíbrio (potencial reversível) e o potencial termo neutro, conforme a Figura 13.

Figura 13- Potencial da célula de eletrólise para produção de hidrogênio em função da temperatura



Fonte: Balbuena (2021), extraído de Zeng *et al* (2009)

Nesse contexto, considerando que o hidrogênio verde é obtido por meio da eletrólise da água, a eficiência da sua produção será influenciada pelo tipo de tecnologia utilizada e pelos parâmetros de operação dos eletrolisadores.

Independentemente da abordagem escolhida, a produção de hidrogênio por eletrólise é uma etapa fundamental do processo. Existem três tipos principais de eletrolisadores, classificados com base no íon transferido: eletrolisadores ácidos (PEM), alcalinos (AEL) e eletrolisadores de óxido sólido (SOEC) (GALLANDAT *et al*, 2017, p.35).

O processo de eletrólise pode ser empregado em três tipos principais de sistemas, distinguindo em relação a alguns parâmetros, como o eletrólito utilizado, condições de operações e o agente iônico presente (OH^- , H^+ , O^{2-}) (PAIVA, 2022, p.28). Nesse sentido, os eletrolisadores destacados no presente trabalho serão o eletrolisador alcalino e o eletrolisador de membrana polimérica troca de prótons (PEM).

8.2 A célula eletrolítica e os eletrolisadores alcalino e PEM

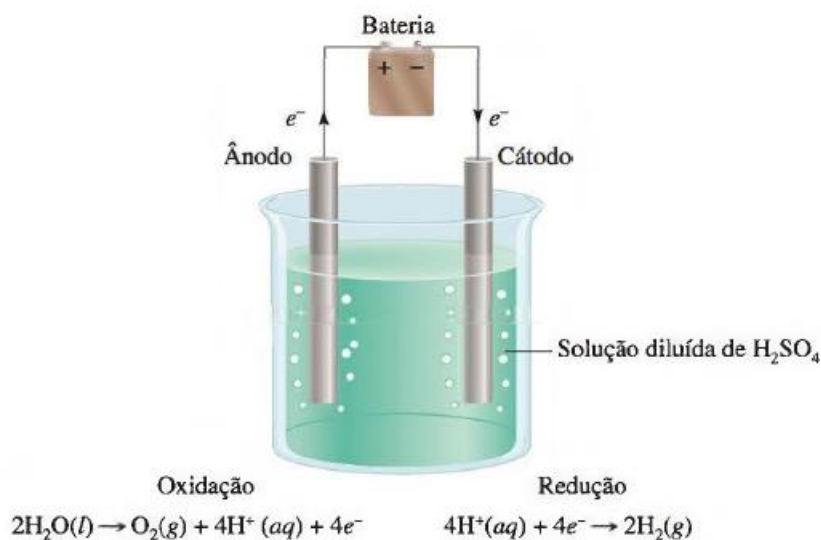
No presente tópico, busca-se fazer uma relação entre a célula eletrolítica discutida em aulas de eletroquímica e os eletrolisadores utilizados na produção de hidrogênio verde. Nesse

contexto, será discutido os aspectos principais de uma célula eletrolítica teórica para eletrólise da água e os aspectos principais do eletrolisador alcalino e do eletrolisador PEM. Inicialmente, discute-se a composição e o funcionamento de uma célula eletrolítica teórica.

8.2.1 Célula eletrolítica

A célula eletrolítica é a célula eletroquímica na qual ocorre a eletrólise. O arranjo dos componentes das células eletrolíticas é diferente do arranjo da célula galvânica. Em geral, os dois eletrodos ficam no mesmo compartimento, só existe um tipo de eletrólito e as concentrações e pressões estão longe das condições padrão. Como em toda célula eletroquímica, os íons presentes transportam a corrente elétrica pelo eletrólito (ATKINS *et al*, 2018, p. 571).

Figura 14- Representação de uma célula para eletrólise da água



Fonte: adaptado de Chang e Goldsby (2013)

A Figura 14 ilustra uma representação esquemática de uma célula eletrolítica para a eletrólise da água. Conforme Atkins *et al* (2018), a água pura não transmite corrente elétrica devido às baixas concentrações dos íons H_3O^+ e OH^- , de forma que é necessário adicionar solutos iônicos cujos íons sejam menos facilmente oxidados ou reduzidos do que a água.

Dessa forma, analisando a célula eletrolítica como referência em aulas de Química, pode-se relacioná-la aos eletrolisadores utilizados na produção de hidrogênio. Assim, a partir da representação teórica de como ocorrem as semirreações da eletrólise em uma célula eletrolítica e seus componentes, o aluno poderá visualizar como isso é reproduzido em um

eletrolisador, de modo a materializar o processo abstrato da geração dos produtos da eletrólise em uma reação eletroquímica.

Diante disso, ao ser visualizado o processo eletrolítico da água nesses eletrolisadores, pode ser discutido os componentes de uma célula eletrolítica e as semirreações que ocorrem no ânodo e no cátodo. Isso irá possibilitar a compreensão do processo ser não espontâneo, evidenciando o papel da corrente elétrica para fazer com que a reação aconteça, ao permitir que o aluno entenda que a fonte de energia fornece o fluxo de elétrons para um eletrodo enquanto retira elétrons do outro eletrodo.

Dessa forma, isso pode ser demonstrado destacando-se o uso das energias renováveis para produzir o hidrogênio pela eletrólise da água, ao se evidenciar a função da corrente elétrica gerada na quebra das moléculas de água, formando hidrogênio e oxigênio gasosos nos eletrodos dos eletrolisadores. Além disso, essa abordagem poderá auxiliar o aluno a entender porque o cátodo é carregado negativamente e o ânodo é carregado positivamente nesses sistemas eletrolíticos, bem como o papel dos eletrólitos em uma célula eletrolítica.

Nesse viés, destacam-se duas tecnologias aptas a produzir o hidrogênio verde, o eletrolisador alcalino (AEL) e o de membrana polimérica de troca de prótons (PEM), como sistemas que podem ser apresentados e discutidos em aulas de Química. Desse modo, os eletrolisadores podem considerados células eletrolíticas, nos quais ocorre a eletrólise da água, embora a composição e o funcionamento desses eletrolisadores variem.

8.2.2 Eletrolisador alcalino (AEL)

O eletrolisador alcalino é um dos sistemas existentes que promove a eletrólise da água para a geração de hidrogênio verde, utilizando os princípios de uma célula eletrolítica comum.

Considerada a tecnologia eletrolítica mais empregada mundialmente no âmbito comercial, com sistemas que variam de 1.8 a 5300 kW, a eletrólise alcalina é constituída por dois eletrodos (anódico e catódico) imersos em uma solução alcalina. Com o intuito de aumentar a condutividade iônica no sistema, é utilizado uma solução de hidróxido de potássio (KOH) de 20-40% em peso.

Geralmente para esse tipo de sistema são empregados eletrodos feitos de níquel ou aço, um dos motivos é a presença do eletrólito hidróxido de potássio pelo seu caráter corrosivo, e em baixas temperaturas em torno de 30-80°C. (PAIVA, 2022, p.29).

Segundo Gallandat *et al* (2017), o eletrólito nesses sistemas é um líquido baseado em uma solução de KOH altamente cáustica. O portador de carga iônica é o íon hidroxila, OH^- , e uma membrana porosa a íons hidroxila, mas impermeável a H_2 e O_2 , proporcionando assim a separação de gases.

As moléculas de hidrogênio se acumulam na superfície do eletrodo até que uma bolha se forma, rompe e sobe para a superfície do eletrólito. No eletrodo de oxigênio, ocorre um processo semelhante no qual os íons hidroxila são descarregados cedendo seus elétrons ao eletrodo e reagindo para formar água e oxigênio. As moléculas de oxigênio se acumulam em bolhas de gás e sobem à superfície. Ambas as reações do eletrodo requerem alguma reação catalítica intermediária, com superfície metálica. Acredita-se que os íons de hidrogênio descarregam no metal superfície para formar uma camada adsorvida de átomos de hidrogênio, que então se recombinam a superfície para formar moléculas de hidrogênio (GALLANDAT *et al*, 2017, p.38).

Dessa forma, segundo Vidas e Castro (2021), as reações que ocorrem em um eletrolisador alcalino, representadas na Figura 15, no cátodo e no ânodo são:

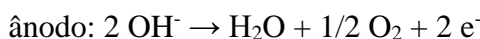
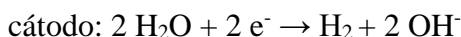
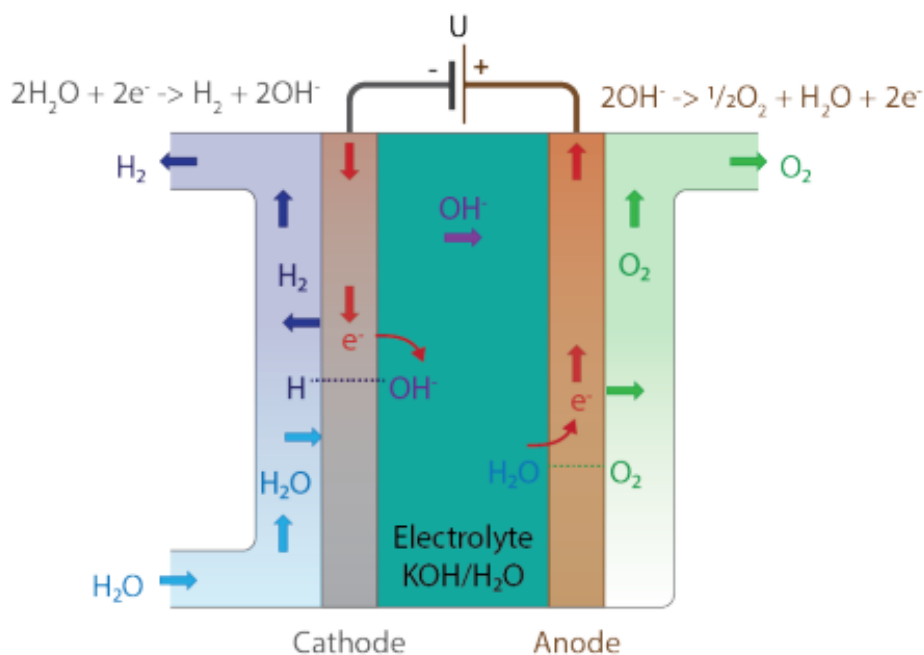


Figura 15 - Esquema representativo do eletrolisador alcalino



Fonte: adaptado de Gallandat *et al* (2017)

8.2.3 Eletrolisador de membrana polimérica de troca de prótons (PEM)

O eletrolisador PEM é um sistema utilizado para produzir hidrogênio verde a partir da eletrólise da água, com aspectos diferentes do eletrolisador alcalino.

O outro tipo de eletrolisador, do tipo PEM (de membrana polimérica troca de prótons), tem como eletrólito uma membrana sólida que conduz íons, ao contrário da

solução aquosa dos eletrolisadores alcalinos. A membrana permite que o íon H^+ a atravesse lado do ânodo para o cátodo, onde forma o hidrogênio. A membrana também faz a separação dos gases hidrogênio e oxigênio. A ausência de corrosão, a alta densidade de corrente e a capacidade de operar em altíssimas pressões (centenas de bar) são as vantagens dessa tecnologia. O maior desafio é o tempo de vida da membrana polimérica condutora de prótons (KNOB, 2013, p.23).

Dessa forma, segundo KNOB (2013), a reação em cada eletrodo difere entre PEM e sistemas alcalinos, sendo as reações para cada eletrodo no sistema PEM descritas abaixo e representadas na Figura 16:

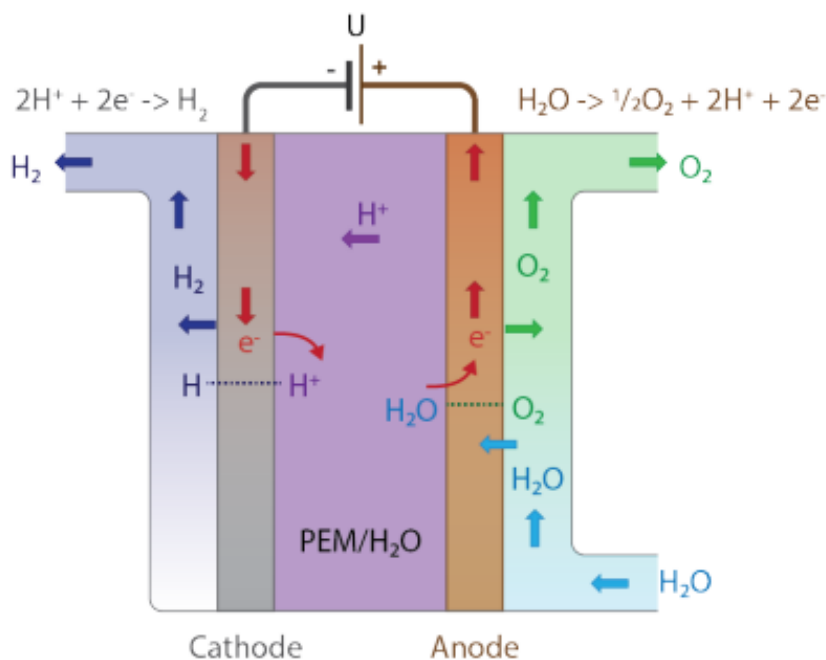
Geração de Hidrogênio no Cátodo (PEM)



Geração de Oxigênio no Ânodo (PEM)



Figura 16 - Esquema representativo do PEM



Fonte: adaptado de Gallandat *et al* (2017)

Portanto, considerando os aspectos da eletrólise da água em um sistema abstrato e considerando-se também os aspectos da produção do hidrogênio verde e suas tecnologias, além da relevância do tema, ressalta-se a necessidade de uma abordagem semelhante em aulas de eletroquímica, sobretudo nas aulas de eletrólise. Desse modo, proporcionará ao aluno uma compreensão mais concreta dessas reações eletroquímicas, bem como os processos envolvidos.

Ademais, essa abordagem revela a importância da ciência na sociedade, especialmente o sentido de se estudar Química.

Por fim, ao inserir a temática do hidrogênio verde em aulas de eletroquímica, evidenciará ao discente uma percepção mais crítica sobre as relações entre os fenômenos cotidianos e o conhecimento ofertado em aula. Nessa perspectiva, considerando essa relação, evidencia-se a importância desta abordagem para o ensino de eletrólise em aulas de eletroquímica, sobretudo no ensino médio.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa almejou investigar como a temática da produção do hidrogênio verde via eletrólise da água, através de fontes renováveis de energia, pode estar relacionada ao ensino do conteúdo de eletrólise em aulas de Química.

Nesse contexto, a partir da revisão bibliográfica acerca do conceito, importância e processo de produção do hidrogênio verde, foi possível compreender como o mesmo é necessário para a sociedade, ao promover a descarbonização dos processos industriais e do setor energético, gerando uma economia mais limpa, como eliminação da emissão de CO₂. Dessa forma, intentou-se analisar a abordagem do hidrogênio verde no contexto das aulas de eletroquímica.

Nessa perspectiva, analisou-se a produção acadêmica nacional no que se refere ao conteúdo de eletrólise. Dessa forma, foi possível identificar que a maioria dos autores analisados consideram o ensino de química difícil, especialmente o conteúdo de eletroquímica, por ser mais abstrato e mais complexo. Nesse sentido, os autores propuseram abordagens experimentais de investigação para auxiliar na compreensão do assunto, com percursos metodológicos semelhantes, como o uso ou o desenvolvimento de células eletrolíticas ou o uso de aplicativo para representar aplicações de eletrólise da água.

Entretanto, a maior parte dos autores destacaram que a experimentação investigativa não foi suficiente para proporcionar o conhecimento almejado. Assim, percebeu-se que a abordagem experimental é importante, mas não supera as dificuldades de aprendizagem desse conhecimento por serem limitadas a uma aplicação específica e a um tópico específico. Ademais, evidenciou-se que os autores se restringem a uma explicação ou citação de uma aplicação específica da eletrólise no cotidiano dos alunos, mas não é fomentado a importância da Química na vida desses.

Dessa forma, considerando os aspectos principais da produção do hidrogênio via eletrólise da água, com a utilização de fontes renováveis, percebeu-se que como é necessário trabalhar a temática da produção do hidrogênio verde em consonância com o assunto de eletrólise, visto que isso pode auxiliar na aprendizagem e compreensão do processo eletrolítico. Nessa perspectiva, pode-se relacionar as células eletrolíticas aos eletrolisadores alcalino e PEM, bem como as semirreações genéricas e seus eletrodos com as semirreações da água e os eletrodos utilizados nos eletrolisadores, além de identificar a função do eletrólito nesses

sistemas e a função e importância da corrente elétrica utilizada em um processo eletrolítico, destacando-se as energias renováveis utilizadas nos eletrolisadores para produzir o hidrogênio.

Nesse viés, essa abordagem irá não só contextualizar o tema da eletrólise, mas proporcionará a materialização desse assunto no contexto da produção de hidrogênio verde, de forma mais concreta e mais abrangente. Ademais, evidenciará a relevância do conhecimento científico, sobretudo da Química, desenvolvendo uma aprendizagem mais crítica no que se refere ao ensino de química, da ciência e dos processos sociais, ambientais e econômicos que acompanham a vida do aluno.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, F. W; NUNES, S. M. T. Contextualização da temática energia a partir de problemas cotidianos: contribuições para a formação dos estudantes. **Aondê: Revista de Pesquisa em Educação em Ciências e Matemática**, v. 3, 2023.

ARAÚJO, E. D. P. Inclusão de alunos com deficiência visual no ensino de química: desenvolvimento de um kit didático para o estudo da teoria da dissociação eletrolítica de Arrhenius. **International Journal Education and Teaching**, Recife, v.3, n.2 p. 67 - 83, junho/agosto – 2020.

ARINI, G. S.; SANTOS, V. B.; TORRES, B. B. uma abordagem de ensino ativo em um experimento de eletrólise. **Química Nova na Escola**, São Paulo -SP, BR v. 43, n. 2, p. 176-182, 2021.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

BALBUENA, V. A. R. **Caracterização de placa bipolar de eletrolisadores alcalinos para produção de hidrogênio**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) - Universidade Estadual Do Oeste Do Paraná - Campus De Foz Do Iguaçu- Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica E Computação, Foz do Iguaçu, 2021.

BARROSO, A. M. R. *et al.* Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. **Revista Arte, Ciência e Tecnologia**, 2021.

BORGES, R. S.; LUZ JR, G. E. A Contextualização do Ensino de Química: Um Olhar Reflexivo sobre a Prática dos Professores. **Revista Debates Em Ensino De Química**, v. 5, p. 109–118, 2019. disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/REDEQUIM/article/view/1984>. Acesso em: 15 de fev. 2023.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5. Acesso em: 16 de dez. 2022.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DRESSELHAUS, M. Basic Research Needs for the Hydrogen Economy – REPORTS OF THE PANELS ON BASIC RESEARCH NEEDS FOR THE HYDROGEN ECONOMY Fuel Cells, v. 21, n. 50, 2004.

ETENE- Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia**. n. 212, 2021.

FRANCO, A. M. G. **Produção de hidrogênio verde a partir da reação de Deslocamento gás água - green hydrogen production from the water gas shift reaction –wgsr**. 2021. Monografia (Graduação em Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Ituiutaba, 2021.

FREITAS, G. M. T. **Hidrogênio verde: estudo de caso sobre o potencial brasileiro como exportador para união europeia utilizando programação linear**. 2022. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2022.

GALLANDAT, N. *et al.* Na analytical model for the electrolyser performance derived from materials parameters. **Journal of power and energy engineering**, n.5, p. 34-49, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.510003>. Acesso em 12 de dez. 2022.

GASPAR, J. S.; JUNIOR, R. B. O. IFACAST: um videocast como ferramenta de aprendizagem de eletroquímica e circuitos elétricos no ensino interdisciplinar de física e química. **Scientia Naturalis**, v. 4, n. 2, p. 615-632, 2022. Disponível em: <http://revistas.ufac.br/revista/index.php/SciNat>. Acesso em: 15 de fev. 2023.

GERHADT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIBIN, G. B.; FERREIRA, L. H. A formação inicial em química baseada em conceitos representados por meio de modelos mentais. **Química Nova**, v. 33, n. 8, p. 1809-1814, 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. **Revista Ciência Elementar**, v.10, 2022. Disponível em: doi.org/10.24927/rce2022.025. Acesso em 02 de jan. 2023.

GUIMARÃES, C. C. Experimentação no Ensino de Química: Caminhos e Descaminhos Rumo à Aprendizagem Significativa. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 3, 2009.

IBERDROLA. **O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta**. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>. Acesso em: 08 de jan. 2023.

IRENA. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications>. Acesso em: 10 de jan. 2023.

IRENA. **Patent insight report Innovation trends in electrolysers for hydrogen production**. 2022 disponível em https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_EPO_Electrolysers_H2_production_2022.pdf?rev=647d930910884e51b60137bcf5a955a6. Acesso em: 10 de jan. 2023.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2022. Disponível em: www.irena.org/publications. Acesso em: 10 de jan. 2023.

JESUS, C. F. A.; NUNES, J. J. S. Desenvolvimento de um jogo de rpg eletrônico: uma proposta didática para o ensino de eletroquímica. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer** – Jandaia-GO, v.19 n.40; p. 123-136, 2022.

JESUS, R. C.; MATSUMOTO, F. M. Possibilidades das TIC na eletroquímica, exploração dos níveis representacionais do conhecimento químico. **Revista de Investigação Tecnológica em Educação em Ciências e Matemática**, Foz do Iguaçu, v. 2, p. 15-44, 2022.

JÚNIOR, A. C. A. *et al.* Abordagem do lixo eletrônico no ensino de química: uma revisão bibliográfica. **Scientia Naturalis**, v. 4, n. 2, p. 672-684, 2022. Disponível em: <http://revistas.ufac.br/revista/index.php/SciNat>. Acesso em: 15 de fev. 2023.

KNOB, D. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto De Pesquisas Energéticas E Nucleares. São Paulo, 2013.

LEITE, B. S. A experimentação no ensino de química: uma análise das abordagens nos livros didáticos. **Educación Química**, v. 29, n. 3, p. 61-78, 2018.

LONGO, V. A. M. *et al.* Produção Biológica de Hidrogênio. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2008.

MESQUITA, C. L. S. **Hidrogênio verde, uma alternativa promissora em solos brasileiros: Uma revisão bibliográfica**. 2022. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2022.

MOIA, G. G.; LUNA, F. D. T. Metodologia para o ensino experimental de eletroquímica em cursos de graduação. **Revista Acadêmica - Ensino De Ciências E Tecnologias**, n. 11, 2022.

MONTEIRO, L. M. B. **Tecnologias de produção de hidrogênio verde - estudo energético e viabilidade econômica**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia) – Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), 2021.

MONTEIRO, P. C.; FILHO, O. S.; RODRIGUES, M. A. Atividades investigativas: um estudo vivenciado por licenciandos em Química. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 1-19, 2023.

PAIVA, S. S. M. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Química) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal/RN, 2022.

PEREIRA, H. A. **Proposta de aplicação do hidrogênio verde via energia eólica no transporte coletivo urbano de fortaleza**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2022.

PORTAL HIDROGÊNIO VERDE. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/>. Acesso em: 15 de jan. 2023.

PUCRS. **Energia do futuro? Entenda o que é hidrogênio verde.** 2022. Disponível em: <https://www.pucrs.br/blog/hidrogenio-verde/>. Acesso em: 15 de jan. 2023.

RODRIGUES, A. M.; GIBIN, G. B. O uso do stop motion na investigação de modelos mentais de alunos do ensino médio sobre conceitos relacionados com a eletrólise. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 27 (2), pp. 222-242, 2022.

ROQUE N. F.; SILVA, J. L. P. B. A linguagem química e o ensino da química orgânica. **Química Nova**, v. 31, n. 4, 921-923, 2008.

SANDRI, M. C M.; FILHO, O. S. Os modelos de abordagem da Química Verde no ensino de Química. **Educación Química**. v. 30, 2019.

SANTOS, T. M. P *et al.* Aprendizagem ativo-colaborativo-interativa: inter-relações e experimentação investigativa no ensino de eletroquímica. **Química Nova na Escola – São Paulo -SP, BR Vol. 40, N° 4**, p. 258-266, novembro 2018.

SARTORI, E. V. *et al.* Construção de uma célula eletrolítica para o ensino de eletrólise a partir de materiais de baixo custo. **Química Nova na Escola**, vol. 35, n. 2, p. 107-111, maio 2013.

SILVA, J. N. *et al.* Experimentos de baixo custo aplicados ao ensino de química: contribuição ao processo ensino-aprendizagem. **Scientia Plena**, v. 13, n. 1, 2017.

SILVA, L. H. O; CONCEIÇÃO. E. D; FIGUEREDO, M. B. Estudo teórico aplicado da Eletrólise para geração de Hidrogênio. **Xvii Encontro Nacional De Engenharia E Desenvolvimento Social** Popular e Solidária: a engenharia necessária para reconstruir o Brasil 21 a 25 de novembro de 2022 Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

SILVA, L. O. *et al.* O ensino de eletrólise e a galvanização: influência da voltagem e da compatibilidade de materiais. **Meta**, Belo Horizonte, v.1, n.1, p.312 – 317, 2016.

SILVA, M. A. *et al.* Compostagem: Experimentação Problematizadora e Recurso Interdisciplinar no Ensino de Química. **Química Nova na Escola – São Paulo - SP**, v. 37, n. 1, p. 71-81, 2015.

SILVEIRA, M. S. *et al.* Células eletrolítica e a combustível confeccionadas com materiais alternativos para o ensino de eletroquímica. **Química Nova**, v. 44, n. 1, p. 118-127, 2021.

SMINK, V. **Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do ‘combustível do futuro’.** 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>. Acesso em: 08 de jan. 2023.

SOUSA, J. A.; IBIAPINA, B. R. S. Contextualização no ensino de química e suas influências para a formação da cidadania. **Revista Ifes Ciência**, v.9, n.1, 2023.

SOUSA, L. M. S. **Potencial do Ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica.** 2022. Monografia (graduação em Engenharia de Energias Renováveis) - Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

VEIGA, L. E. T. **Hidrogênio Verde e sua Implementação no Sistema Elétrico Nacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2022.

VIDAS, L.; CASTRO, R. Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of the-Art Review with Focus on Green-Electrolysis. **Applied Sciences**, n.11, 11363. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app112311363>. Acesso em: 05 de jan. 2023.

VIEIRA, D. O. *et al.* Estudos sobre o ensino e aprendizagem de conceitos em eletroquímica: uma revisão. **ENCITEC - Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista**, Santo Ângelo - Vol. 11, n. 1., p. 172-188, jan./abr. 2021.

ZIMMER. C. G. A química do banho de ouro em bijuterias: uma proposta de ensino baseada nos três momentos pedagógicos. **Química Nova na Escola**. – São Paulo - SP, BR v. 44, n 1, p. 76-80, fevereiro, 2022.