

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA HÍDRICA

**Produção de hidrogênio verde e o consumo de água em
plantas de eletrólise**

Lucia del Rosario Garrido Rios

22 de agosto de 2024

Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA HÍDRICA

Lucia del Rosario Garrido Rios

**Produção de hidrogênio verde e o consumo de água em
plantas de eletrólise**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Área de Concentração: Gestão de Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Jamil Haddad

22 de agosto de 2024

Itajubá, Minas Gerais

FICHA CATALOGRÁFICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA HÍDRICA

Lucia del Rosario Garrido Rios

**Produção de hidrogênio verde e o consumo de água em
plantas de eletrólise**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 22 de agosto de 2024, conferindo ao autor o título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benedito Silva (Orientador)

Prof. Dr. Jamil Haddad (Co-orientador)

Prof^a. Dra. Regina Mambeli Barros (docente interna)

Prof^a. Dra. Gilze Belém Chaves Borges (docente externa)

22 de agosto de 2024

Itajubá, Minas Gerais

Aos meus pais, Raquel e Enrique (I.M.), cujo legado de dedicação e perseverança está presente em todos os atos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e saúde.

Aos meus filhos Bernardo e Paula, e a minha irmã Estela, que me encorajaram a retomar os estudos e me deram apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço enormemente aos meus orientadores, professores Benedito Cláudio da Silva e Jamil Haddad, pela disponibilidade, atenção, paciência e ensinamentos. A todos os professores do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica, em especial à Coordenadora do Programa, Professora Márcia Viana Lisboa Martins, pela dedicação e disponibilidade durante o curso. Às professoras Gilze Belém Chaves Borges e Regina Mambeli Barros, membros da banca examinadora, pelo seus ensinamentos e esclarecimentos.

Aos meus colegas Acsa dos Santos Martins, Ana Cláudia Pinto Ferraz, Júlio Eduardo de Oliveira Rocha e Sabrina Merlo Barros pelo auxílio e incentivo durante o desenvolvimento e elaboração da pesquisa.

Ao Centro de Excelência em Eficiência Energética (EXCEN), seu gestor, professor Roberto Akira Yamachita, e Kelly Fernanda dos Reis, assistente de projetos, pela acolhida e suporte no espaço físico onde desenvolvi a pesquisa. Aos engenheiros Fábio Horta e Lucas Lara, do Centro de Hidrogênio Verde e da Neuman & Esser, respectivamente, que me auxiliaram com esclarecimentos relativos à planta de eletrólise implantada na área de expansão da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Um agradecimento especial ao meu amigo e ex-aluno, Engenheiro Hídrico e Doutor em Engenharia Mecânica, Adriano Bastos, que foi o grande estímulo para enfrentar o desafio de cursar o programa de mestrado.

À Agência de Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), financiadora do Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), pela concessão de bolsa de pesquisa que possibilitou o desenvolvimento do trabalho.

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), pela qualidade e excelência de ensino nos seus 110 anos de história, estendendo-se aos servidores da Pró- Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação pelo apoio, a todos vocês, muito obrigada!

“Acredito que um dia a água será usada como combustível, que o hidrogênio e oxigênio que a constituem, usados de forma isolada ou simultânea, oferecerão uma fonte inesgotável de calor e luz.”. Júlio Verne, 1875

RESUMO

Após a guerra da Rússia e Ucrânia, os países europeus foram prejudicados quanto ao fornecimento de gás natural, o que os levou a acelerar a busca por alternativas de fontes renováveis de energia. Assim, procurando atingir as metas estabelecidas no Acordo de Paris de 2015, os países europeus iniciaram o incentivo à produção de hidrogênio verde, por meio de financiamento para implementação de plantas de produção, realizando parcerias com diversos países em desenvolvimento, dentre eles, o Brasil. Neste sentido, o hidrogênio verde se mostra como uma solução promissora na transição energética, sendo que uma das rotas de produção é por meio da eletrólise da água com fontes renováveis de energia. Neste trabalho, são mencionadas as diversas formas de produção de hidrogênio verde, com ênfase na eletrólise da água, em que o eletrolisador é alimentado por fonte de energia renovável, sem emissões de gases de efeito estufa. O objetivo específico é analisar o consumo de água e energia na planta de eletrólise utilizada em todo o processo de produção de hidrogênio verde. São apresentadas diversas tecnologias de eletrolisadores, as possíveis fontes de água para seu funcionamento, bem como a análise de aspectos de sustentabilidade, a fim de conhecer o impacto do consumo de água no processo de produção do hidrogênio verde. Como estudo de caso real, o estudo mostra a planta de eletrólise da Universidade Federal de Itajubá (CH2V/UNIFEI).

Palavras-Chave: Transição energética, eletrólise, qualidade da água, gestão de recursos hídricos, disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

After the war between Russia and Ukraine, European countries were affected regarding the supply of natural gas, for this reason the European Union decided to speed up the search for alternative renewable energies. Aiming to meet commitments signed in Paris Agreement on 2015, several European countries started to encourage production of green hydrogen, funding the deployment of production plants signing partnerships with developing countries, Brazil among them. In this regard, green hydrogen production plays a crucial role in the energy transition, one of the production pathways being by water electrolysis with renewable energy sources. This study mentions the different ways to produce hydrogen, with emphasis in water electrolysis where the electrolyzer is provided by renewable energy, with zero greenhouse gas emissions. The specific objective is to analyze water and energy consumption in the electrolysis plant along the whole green hydrogen production process. The study presents different technologies of electrolyzers, several alternatives of water sources to feed the equipment as well as an analysis of sustainability aspects, in order identify the water footprint and environmental impact. As real study case the Federal University of Itajubá's Green Hydrogen Center (CH2V/UNIFEI) is presented.

Keywords: Energy transition, electrolysis, water quality, water resources management, water availability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Objetivos de desenvolvimento sustentável	21
Figura 2.2 - Possíveis rotas para produção de hidrogênio	25
Figura 2.3 - Projetos de H ₂ V no Brasil	27
Figura 2.4 - Ciclo produtivo do H ₂ V	30
Figura 2.5 - Produção de H ₂ V	35
Figura 2.6 - Produção hidrogênio verde por via da eletrólise	37
Figura 2.7 - Esquema de princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise de água alcalina.....	41
Figura 2.8 - Seção transversal esquemática do conjunto do eletrodo com membrana.....	44
Figura 2.9 - Esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise de óxido sólido	45
Figura 2.10 - Projeções das faixas de custo nivelado para projetos de grande escala.....	48
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia	50
Figura 4.1 - Artigos globais mais citados (<i>electrolysis and hydrogen production</i>).....	54
Figura 4.2 - Produção científica por país (<i>electrolysis and hydrogen production</i>)	55
Figura 4.3 - Artigos globais mais citados (<i>water and consumption and hydrogen and production</i>)	56
Figura 4.4 - Países mais citados (<i>water and consumption and hydrogen and production</i>).....	57
Figura 4.5 - Relevância de palavras-chave	58
Figura 4.6 - Retiradas de água globais anuais e consumo por setor. Comparação da retirada global de água doce e o consumo de três setores diferentes: produção e geração de energia por combustíveis fósseis, agricultura e a implementação da economia global de hidrogênio	60
Figura 4.7 - Demanda anual de água para produção de H ₂ V em relação aos recursos hídricos da Terra.....	63
Figura 4.8 - Osmose reversa	65
Figura 4.9 - Planta de eletrólise do CH ₂ V/UNIFEI	70
Figura 4.10 - Fluxograma do balanço hídrico no eletrolisador PEM do CH ₂ V/UNIFEI	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de hidrogênio	24
Tabela 2.2 - Poder calorífico de combustíveis diversos	29
Tabela 2.3 - Emissões de CO ₂ no ciclo de vida da produção de hidrogênio por rota tecnológica no mundo	29
Tabela 2.4 - Tipos de hidrogênio e emissão de carbono	29
Tabela 2.5 - Histórico da eletrólise.....	36
Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias de eletrólise da água	46
Tabela 2.7 - Características tecno-econômicas dos eletrolisadores AWE e PEM.....	47
Tabela 2.8 - Características tecno-econômicas de diferentes tecnologias de eletrolisadores...	47
Tabela 4.1 - <i>Strings</i> de busca.....	53
Tabela 4.2 - Estimativas de consumo de água para geração de hidrogênio (gal/kg H ₂)	60
Tabela 4.3 - Dados técnicos da planta de produção e abastecimento de hidrogênio CH2V/UNIFEI	71
Tabela 4.4 - Consumo de água eletrolisador PEM do CH2V/UNIFEI	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – Sociedade americana de testes e materiais

ATM – Medida de pressão atmosférica

AWE – Eletrolisador de água alcalina

BCM – Bilhões de metros cúbicos

CAPEX – Despesas de capital

CCUS – Captura, uso e armazenamento de carbono

CH2V – Centro de Hidrogênio Verde

EAR – Estudo de análise de risco

EJ – Exajoule

ESG – Ambiental, social e governança

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais

GAL – Galão

GEE – Gases de efeito estufa

H2V – Hidrogênio verde

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

LCA – Avaliação de ciclo de vida

LCOH – Custo nivelado do hidrogênio

LOHC – Transportador de hidrogênio orgânico líquido

MDL – Mecanismo de desenvolvimento Limpo

Nm³ – Normal metro cúbico

ODS – Objetivo de desenvolvimento sustentável

OPEX – Despesas operacionais

PAE – Plano de ação de emergência

PEM – Eletrolisador de membrana trocadora de prótons

PGR – Plano de gerenciamento de risco

PPB – Partes por bilhão

PPM – Partes por milhão

PSM – Gestão de segurança de processo

PV – Fotovoltaica

QRA – Avaliação quantitativa de risco

RO – Osmose reversa

SOEC – Eletrolisador de óxido sólido

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	Objetivos.....	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Transição energética e a importância do hidrogênio verde	19
2.1.1	Transição energética	19
2.1.2	A importância do hidrogênio verde na transição energética.....	23
2.1.3	Potencial de recursos para produção de hidrogênio verde no Brasil	27
2.2	Aspectos, características químicas e físicas do hidrogênio	28
2.2.1	Aplicações do hidrogênio	29
2.2.2	Segurança do hidrogênio	31
2.2.3	Certificação do hidrogênio.....	32
2.2.4	Legislação do hidrogênio	33
2.3	Processos de produção de hidrogênio verde	35
2.3.1	Eletrolisador de água alcalina (AWE)	41
2.3.2	Eletrolisador de membrana de troca de prótons (PEM).....	43
2.3.3	Eletrolisador de óxido sólido (SOEC)	45
2.4	Custo do hidrogênio verde produzido	48
2.4.1	Custos adicionais	49
3.	METODOLOGIA.....	50
4.	RESULTADOS	53
4.1	Consumo de água na eletrólise	58
4.2	Definição do consumo de água	61
4.3	Qualidade da água.....	64
4.4	Alternativas da água	66
4.5	Reciclagem e reutilização.....	68
4.6	Impacto Ambiental.....	68
4.7	Estudo de caso : planta CH ₂ V UNIFEI	69
4.8	Diretrizes para gestão da água aplicada nas plantas de produção de hidrogênio verde	72
5.	CONCLUSÕES.....	76
	REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

Conforme divulgado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) no Relatório Síntese de 2023, foram apontadas as perdas e danos que vem sendo causados pela mudança global do clima, bem como as tendências que, ao que tudo indica, devem continuar no futuro, haja vista que o aumento da temperatura global provoca alterações nas condições climáticas (circulação atmosférica, chuvas e secas). Ano após ano, o aquecimento dos oceanos e da atmosfera aumenta em razão das massivas emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido à queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, derivados de petróleo, gás natural), assim como ao desmatamento de florestas, cuja função vital é renovar o oxigênio (CEBDS, 2019).

O mencionado relatório expressa que a solução para manter as temperaturas médias em 1,5 grau Celsius, acima dos níveis pré-industriais, que é a meta do Acordo de Paris assinado por mais de 180 países em 2005, é reduzir as emissões de GEE de forma rápida e significativa em todos os setores até 2030. Algumas das soluções que devem ser adotadas são: a eletrificação com baixa emissão de carbono, a expansão do acesso à energia limpa e o incentivo para utilização de transporte com zero e baixa emissão de carbono. Consequentemente, esses tipos de medidas irão melhorar a qualidade do ar e irão trazer benefícios significativos para a vida saudável da população (IPEA, Panorama do hidrogênio no Brasil, 2022).

Ainda segundo o IPEA (2022), a vida moderna acarreta um significativo aumento na demanda energética mundial e a falta de controle e compromisso em reduzir as emissões dos poluentes tornam urgente a adoção de soluções compatíveis com o desenvolvimento sustentável. Desta forma, um novo tema passou a ser prioritário na agenda global: a promoção de uma transição energética e ambiental em todos os países do mundo, a fim de alcançar um futuro verde e sustentável. Na corrida em direção à neutralidade climática, diversos países já anunciaram estratégias a fim de promover uma profunda transformação no setor energético, industrial e setores de infraestrutura.

Neste contexto, o hidrogênio se mostra numa posição de destaque no que diz respeito a um papel importante na transição energética global. Nos últimos anos, tem surgido um interesse significativo no hidrogênio denominado “verde” (H₂V), que é produzido a partir de fontes renováveis de energia, abundantes no Brasil, com baixa emissão de GEE, podendo ser aplicado em diversos setores com altas emissões, um dos passos chave na descarbonização da economia e no combate contra as mudanças climáticas. Neste sentido, em 02.08.2024 foi sancionada a

Lei nº 14.948, que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, em que se definem regras e benefícios para estimular a produção e comercialização do hidrogênio no país.

Uma das vias de produção deste tipo de hidrogênio é a eletrólise da água, em que são separadas as moléculas de hidrogênio e oxigênio e são utilizadas fontes renováveis de energia para alimentar o eletrolisador, razão pela qual o H₂V é considerado um vetor energético limpo que não prejudica o meio ambiente (Zarra *et al.*, 2023). Atualmente, as três principais tecnologias de eletrolisador são: eletrólise alcalina (AWE), membrana polimérica trocadora de prótons (PEM) e célula eletrolisadora de sólido óxido (SOEC) (Arsad *et al.*, 2023).

O consumo atual de hidrogênio na União Europeia, sendo em sua maior parte o hidrogênio cinza (derivado da reforma a vapor do gás natural) é de 220 toneladas métricas (t) de dióxido de carbono equivalente (CO₂) representando 8 % das emissões totais da União Europeia. Neste sentido, o H₂V se apresenta como peça fundamental para a descarbonização de setores produtivos com altas emissões, por exemplo, a indústria de aço que responde pela emissão de mais de 200 Mt de CO₂ eq ou 7 % do total de emissões da União Europeia. São as razões pelas quais a União Europeia se propôs a meta de produzir cerca de 20 t de hidrogênio renovável até 2030, eliminando assim, grande parte das emissões provocadas pelo uso de hidrogênio cinza e a indústria de aço (Bernuy-Lopez, 2023).

Vale ressaltar que o fator determinante da competitividade dos projetos de produção de hidrogênio verde, será o valor da eletricidade e dos eletrolisadores, que representa o denominado custo nivelado de hidrogênio verde (LCOH), expresso em €/kg ou US\$/kg, em que são considerados os gastos de capital e operacionais (CAPEX e OPEX). Por esta razão, os eletrolisadores são equipamentos-chave neste processo. Cada tecnologia de eletrólise possui características diferentes quanto a CAPEX e OPEX. Em todas as tecnologias, o CAPEX é influenciado em grande parte pelos materiais utilizados, e o OPEX é determinado pela eficiência elétrica de cada tecnologia (Bernuy-Lopez, 2023).

Na abordagem do tema consumo de água no eletrolisador, é justo lembrar que todo o setor de energia, assim como a produção de hidrogênio, depende altamente dos recursos hídricos e pode ser afetado pela escassez de água, por este motivo é necessário realizar uma análise integrada de todo o processo (Simões *et al.*, 2021). Atualmente, ao invés de ser utilizada diretamente pelos consumidores finais, uma grande porcentagem do uso da água está nas cadeias de suprimento dos diferentes setores da economia. As atividades de transporte e indústria são responsáveis por uma significativa pegada hídrica, devido à sua dependência nos combustíveis de hidrocarbonetos e/ou eletricidade gerada por usinas térmicas. Portanto, é

fundamental considerar o impacto no uso da água na migração para energia renovável e hidrogênio verde (Newborough, 2021).

Da mesma forma, é necessário que sejam exploradas e avaliadas as diferentes fontes de água para a produção de hidrogênio, uma vez que cada vez mais a água doce se torna um recurso escasso (Simões *et al.*, 2021).

Há outras alternativas de fonte de água para o eletrolisador. Uma delas pode ser a água de mar, que se traduz em 71 % da superfície da Terra e 96,5 % dos seus recursos hídricos. (IEA Webstore, 2019; Dionigi e Reier, *et al.*, 2016 *apud* Camargo, 2021). Neste caso, existem duas formas de tratamento, a dessalinização, que demanda um consumo adicional de energia para o processo de separação, dos íons, cátions da água, e a eletrólise direta. Vale ressaltar que os processos de purificação possuem um custo elevado para alcançar o nível de pureza necessário para alimentação dos eletrolisadores, seja do tipo de membrana de troca de prótons (PEM) ou alcalinos (Dresp *et al.*, 2019 *apud* Camargo, 2021).

O propósito da economia de H₂V é derivar toda a energia a partir de fontes renováveis que não utilizam água. Portanto, deve-se considerar apenas a água que é utilizada diretamente na eletrólise ao considerar o impacto da produção de hidrogênio nas reservas globais de água. Isolando a água utilizada na etapa da eletrólise, o impacto da quantidade de água consumida para a produção de hidrogênio é bem menor em comparação com a quantidade de água disponível no planeta (Beswick *et al.*, 2021).

Se for comparado com outras projeções para a demanda de água da produção de hidrogênio, os requisitos de água doce são bastante baixos. Isso se deve à suposição de que no futuro todo o hidrogênio será produzido a partir de fontes renováveis, como eólica e solar, que tem consumo de água mínimo ou nenhum. Quando os combustíveis fósseis são utilizados para produção de energia primária e geração de energia, a necessidade de água é bastante significativa. Em 2014, 251 bilhões de m³ de água doce foram retirados para geração de energia e produção de energia de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, e 31 bilhões m³ de água doce foram consumidos para resfriamento, mineração, fraturamento hidráulico e refino de petróleo (Beswick *et al.*, 2021).

O presente trabalho apresenta um estudo para compreender a quantidade de água utilizada em todas as fases da obtenção do H₂V por meio da eletrólise, desde a preparação inicial até a produção final por meio da eletrólise. A meta é apresentar estratégias para otimizar o consumo de água diante das barreiras da escassez hídrica já presente em algumas regiões do mundo. Ao término da pesquisa, é sugerido um entendimento sobre como melhorar o uso da

água na produção de H_2V por eletrólise. Isso não apenas considera a eficiência do processo, mas também, tem em mente a sustentabilidade e o impacto positivo na transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente.

1.1. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar uma análise sobre o consumo de água utilizada no processo de eletrólise para produção de H_2V , a fim de identificar possíveis impactos e propor diretrizes para a gestão dos recursos hídricos envolvendo plantas de eletrólise.

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização da qualidade da água para produção de H_2V . Apresentar os diversos tipos de água que podem ser utilizados na alimentação de eletrolisadores e sistemas de tratamento;
- Quantificação do consumo de água. Apresentar o consumo de água ao longo das diferentes etapas da produção de H_2V , incluindo a análise dos consumos utilizados em cada processo;
- Identificação dos fatores de influência. Pesquisar os fatores que influenciam o consumo de água em plantas de eletrólise, tais como a composição dos eletrólitos, as taxas de corrente elétrica, a temperatura e a pressão do sistema, bem como a eficiência dos equipamentos;
- Proposição de medidas de eficiência. Propor medidas concretas de eficiência hídrica para a produção de H_2V , considerando os aspectos tecnológicos e operacionais, e avaliar o potencial de economia de água associado a essas medidas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Em total foram consultados 100 artigos, sendo 60 sobre H₂V, 40 sobre eletrólise da água e 14 sobre o consumo de água para produção de H₂V. As principais fontes consultadas foram *Science Direct*, *Research Gate* e publicações científicas de entidades e centros de pesquisa do setor.

Lampert e Wang (2015) focam no consumo de água no transporte de combustíveis. Eles concluem que a qualidade da água (salinidade) para a produção de hidrogênio afeta as taxas de consumo. A tecnologia de pré-tratamento e a disponibilidade local de água vão impactar no ciclo de vida da água e no consumo de energia.

Shi *et al.* (2019) elaboram uma metodologia abrangente para avaliar a pegada hídrica da produção de hidrogênio por meio da eletrólise e apresentam um estudo de caso na Austrália. Os autores chegam à conclusão que a pegada do consumo de água é bem inferior àquela relatada na literatura e grande parte da água poderia ser consumida fora dos países produtores de hidrogênio.

Simões *et al.* (2020) abordam o tema das fontes de água apropriadas para produção de hidrogênio via eletrólise por meio da aplicação de uma metodologia de valor sustentável combinando critérios econômicos, ambientais e sociais, em dois locais em Portugal. Os autores concluíram que a fonte mais apropriada é a água de rede pública devido a ausência de baixo risco de fornecimento, baixo custo e ausência de processos de licenciamento complexos. Também, expressam que a água de mar e águas residuais se mostram como possíveis fontes, porém com custos afetados pelo transporte e tratamento da água.

Saulnier *et al.* (2020) focam seu estudo na província de Alberta, Canadá. Os autores analisam o consumo de água na produção de hidrogênio por meio das três rotas que estimam mais adequadas para a mencionada província. Os autores concluem que, na província analisada, a agricultura é uma prioridade chave de investimento, sendo que este segmento consome 67 % da água doce da província, dessa forma, a produção de hidrogênio irá competir pela água com outras fontes de produção de energia, desenvolvimento de recursos e desenvolvimento industrial.

Blanco (2020) autor de um “*White Paper*” sobre o tema, afirma que na hipótese que o mundo utilize 70 EJ de hidrogênio eletrolítico até 2050, seriam necessários 25 bcm de água, o que é relativamente pequeno se comparado com o consumo de 28.000 bcm para a agricultura, por exemplo. Ele observa que a pegada hídrica depende muito do local e que os números

analisados sugerem que o consumo de água não deve ser uma grande barreira à expansão do hidrogênio renovável.

Beswitck *et al.* (2021) afirmam que a produção de H_2V por meio da eletrólise eletroquímica da água utiliza dois insumos simples: eletricidade e água, mas alguns críticos começam a questionar se há suficiente disponibilidade de água para este processo. A conclusão dos autores é que o consumo de água é mínimo em relação a outros setores e que é necessário caracterizar a verdadeira necessidade de água na tecnologia da eletrólise para se ter uma ideia do impacto que o H_2V pode representar no futuro de energia renovável.

Wang *et al.* (2022) analisam as três principais tecnologias de eletrolisadores para produção de hidrogênio destacando as vantagens do eletrolisador do tipo PEM e ainda resumem os recentes avanços desta tecnologia. Abordam os desafios atuais e um panorama do desenvolvimento futuro da tecnologia de eletrólise PEM para aplicação na futura produção de hidrogênio. Na conclusão, os autores listam os obstáculos existentes na exploração e estudo de eletro catalisadores de alta eficiência.

Terlouw *et al.* (2022) comparam diferentes configurações de produção de hidrogênio considerando uma taxa de produção de 10 toneladas, no relativo aos custos de produção do hidrogênio, ciclo de vida de emissões de GEE, utilização de material e transformação do solo. Concluem que o recente aumento dos preços do gás natural mostra que a paridade de custos entre o hidrogênio verde e cinza já pode ser alcançada hoje. A produção de hidrogênio por meio da eletrólise com custos menores e baixas emissões de GEE somente é possível hoje em dia em locais muito específicos.

Schmidt *et al.* (2017) apresentam visões de especialistas sobre custo de capital futuro, vida útil e eficiência para as três principais tecnologias de eletrolisadores. O estudo reduz as barreiras para o investimento em eletrólise da água e mostra como as soluções de especialistas podem ajudar a orientar investimentos de curto prazo, esforços na formulação de políticas públicas e promover pesquisas, a fim de apoiar o desenvolvimento da eletrólise para sistemas energéticos de baixo carbono.

Saliba-Silva *et al.* (2009) apresentam estudo sobre a perspectiva brasileira na produção de hidrogênio em que a eletrólise combinada com uma fonte de energia renovável e a geração de energia com células combustível poderia ser uma boa base para melhorar o fornecimento de energia distribuída em áreas remotas, onde a rede elétrica não existe ou é deficiente. Os autores propõem implantação de um sistema de energia de hidrogênio, baseado em um módulo ininterrupto, utilizando captura de energia renovável (solar ou eólica), para produzir hidrogênio

por meio de eletrolisador alcalino ou tipo PEM. O mencionado módulo seria montado numa barcaça, podendo flutuar em rios de áreas remotas e distribuir o hidrogênio em vilarejos.

Nasser *et al.* (2022) fornecem uma revisão tecnológica dos sistemas de produção de hidrogênio utilizando energia solar e eólica, resumindo as diversas técnicas de produção e comparam os diferentes tipos de eletrolisadores. Dentre outros pontos, concluem que a meta principal é reduzir o investimento de capital dos componentes e melhorar a sua eficiência.

2.1 Transição energética e a importância do hidrogênio verde

2.1.1 Transição energética

A transição energética consiste em um processo de mudança do modelo de produção, distribuição e consumo de energia dentro da matriz energética. Ao adotar fontes de energia renováveis e limpas, o mencionado processo irá reduzir as emissões líquidas de GEE, diminuir a dependência de combustíveis fósseis e irá descentralizar a geração de energia em nível nacional e internacional. Representa um movimento urgente a ser adotado por todas as nações, devido às sérias consequências acarretadas pelas mudanças climáticas para a vida no planeta Terra. O início deste movimento teve início na reunião de cúpula Conferência de Estocolmo em 1972, na reunião de cúpula Rio-92, também chamada de Eco-92, como foi denominada II Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (PUC-PR, 2023).

Em junho de 1992 se reuniram 108 chefes de Estado dos países-membros da Organização das Nações Unidas (ONU), com objetivo de traçar as estratégias globais de conciliação existentes entre os aspectos do desenvolvimento socioeconômico e a proteção necessária do meio ambiente, indispensáveis para a sobrevivência na Terra. Todas as nações que participaram na cúpula assumiram o compromisso de reduzir as emissões de CO₂ e demais GEE na Convenção do Clima, sem fixar metas específicas no que se refere às diferenças sobre a contribuição dos países desenvolvidos e em desenvolvimento (PUC-PR, 2023).

Posteriormente, o cenário mudou com o Protocolo de Kyoto firmado em 2007, que prevê a redução das emissões de GEE por intermédio de mecanismos flexibilizadores, sendo um deles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permite a participação de países em desenvolvimento em cooperação com os países desenvolvidos, visando a redução de emissões de GEE (Moreira, 2008). O mencionado acordo internacional, foi uma atualização da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em que foram estabelecidas

metas mais rígidas além de um cronograma de redução de emissão de GEE para os países signatários, principalmente, para os países desenvolvidos.

A meta estabelecida para reduzir as emissões líquidas em comparação aos níveis de 1990 foi de 5,2 % para o período entre os anos de 2008 e 2012. Em 2015, foi firmado o Acordo de Paris, onde os países-membros da Organização das Nações Unidas-ONU fixaram os chamados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e também a Agenda 2030 com a finalidade de assegurar que as necessidades das gerações futuras sejam supridas. Neste contexto, a transição energética se mostra como um tema transversal entre os cinco ODS discriminados a seguir e ilustrados na Figura 2.1.

- **ODS 7:** Energia acessível e limpa: assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível a serviços de energia;
- **ODS 9:** Indústrias, inovação e infraestrutura: construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação;
- **ODS 11:** Cidades e comunidades sustentáveis: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;
- **ODS 12:** Consumo e produção responsáveis: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis;
- **ODS 13:** Combate às alterações climáticas: tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.



Figura 2.1 - Objetivos de desenvolvimento sustentável

Fonte: Nações Unidas Brasil (2015)

No Acordo de Paris, os países participantes se comprometeram a limitar o aumento da temperatura global em até 2° C até 2050. O documento determinou diretrizes relativas à limitação do uso de combustíveis fósseis, bem como ao combate ao desmatamento e à sustentabilidade econômica. No intuito de alcançar o objetivo de redução de emissão de GEE e combater as mudanças climáticas, tanto os governos como as organizações que adotaram o processo de transição energética se basearam em três estratégias prioritárias:

- **Eficiência energética:** utilizar os recursos de forma racional sem perdas nem desperdício;
- **Fontes de energia renováveis:** priorizar a energia gerada a partir de recursos renováveis em que as fontes (solar, eólica, hidráulica, geotérmica e biomassa) podem ser reabastecidas de forma rápida;
- **Captura e armazenamento de carbono:** a estratégia de coletar e transportar o carbono para o subsolo ou o fundo do oceano em estado líquido, evita que o gás entre na atmosfera, mas é pouco utilizada, uma vez que envolve um investimento financeiro considerável (PUC-PR, 2023).

O tempo para evitar os cenários catastróficos que as mudanças climáticas podem trazer vem se esgotando, desta forma, a transição energética se mostra inadiável. Conforme mencionado previamente, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

(IPCC) da Organização das Nações Unidas, a limitação do aumento da temperatura global a 1,5° C até o final deste século será a forma de evitar os graves impactos das mudanças climáticas, o que implica numa transformação radical do sistema energético mundial (EcoDebate, 2023).

Este cenário preocupante sobre as mudanças climáticas trouxe inúmeras reflexões em direção à Transição Energética, que é uma transformação na Matriz Energética. Nesse sentido, os países estão focados em encontrar formas de diminuir a participação de fontes fósseis em suas matrizes, bem como na promoção de ações com o fim de incentivar e fomentar a eficiência energética, o armazenamento de energia e estimular fontes renováveis. Em termos gerais, pode-se afirmar que a atual Transição Energética é caracterizada pelas denominadas 3D's:

- **Descarbonização** (foco nas emissões de carbono);
- **Descentralização** (foco na geração de energia próxima ao consumidor); e
- **Digitalização** (foco na transformação digital de documentos, atividades e serviços).

São consideradas prioritárias mudanças nas políticas públicas, novas tecnologias e tendências de consumo (EcoDebate, 2023).

Nesse contexto, verifica-se que o consumidor tem adquirido um papel mais ativo, o que torna claro que é imprescindível a promulgação de incentivos e políticas públicas adequadas (EPE, ABC da Energia, 2023). No contexto brasileiro, é necessário incluir mais dois "D's": Desenho de mercado e a Democratização (Pós PUC-PR Digital, 2024).

Desta forma, a transição energética pode ser definida como a migração de um modelo energético que se baseia em fontes poluentes, como os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) para um modelo baseado em fontes renováveis (hidrelétrica, eólica, solar e biomassa), uma vez que estas últimas se regeneram na natureza ou podem ser cultivadas, o que não acontece com as fósseis, que não se regeneram e levam milhões de anos para se formar. Visto que o modelo energético se mostra insustentável, tanto do ponto de vista ambiental como social e econômico, a transição energética é improtelável. É importante frisar que a queima de combustíveis fósseis representa aproximadamente 75 % das emissões globais de GEE, responsáveis pelas alterações do clima do planeta, que acarretam consequências gravíssimas causadas pelo aumento da temperatura média, tais como a elevação do nível do mar, o derretimento das calotas polares, eventos climáticos extremos, escassez hídrica e alimentar que trazem conflitos e migrações, além da perda de biodiversidade. Para a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2022), uma transição energética baseada em 100 % de fonte renovável até 2050 poderia significar em benefícios econômicos globais da ordem de US\$98

trilhões e evitar 100 milhões de mortes prematuras causadas pela poluição do ar (EcoDebate, 2023).

A considerar a representatividade do Brasil na América Latina, o país possui grande potencial para liderar a transição energética, uma vez que sua matriz energética conta com 83 % de sua capacidade baseada em fontes de energia renováveis. Este cenário se traduz em desafio. Na análise do Instituto E+ (2021), concluiu-se que para atingir a meta do Acordo de Paris firmada em 2015, o governo brasileiro deverá traçar estratégias, além da otimização da geração de energia, já que esse setor representa apenas 2 % do total de emissões de gases poluentes no país. Os setores mais representativos na emissão de GEE são os transportes e agronegócio. Trata-se de uma oportunidade para o país se transformar numa nação mais justa, competitiva e sustentável, onde é necessário que os setores público e privado, além da sociedade civil trabalhem em conjunto para o bem comum (PUC-PR, 2023).

2.1.2 A importância do hidrogênio verde na transição energética

O hidrogênio é o elemento mais abundante no Universo e é raramente encontrado de forma isolada na terra; entretanto, ele pode ser encontrado em diversos compostos, como a água, combustíveis fósseis e também, em certos tipos de biomassa. Pode-se obter hidrogênio a partir de matérias primas diversas, seja de ocorrências naturais (H_2 geológico) a processos físico químicos ou bioquímicos. Matérias primas renováveis fornecedoras de átomos de hidrogênio, são passíveis de utilização: a água (H_2O), a biomassa e os biocombustíveis líquidos e gasosos, tais como o etanol e o biogás/biometano (EPE, 2021).

Segundo dados da Agência Internacional de Energia – IEA (2021), aproximadamente 70 % da produção de hidrogênio mundial tem como base a reforma a vapor do metano utilizando gás natural como insumo. A aplicação de tecnologias de captura, sequestro e uso de carbono (*carbon capture, utilization and storage - CCUS*) pode reduzir a pegada de carbono em 90 %, como é o caso do hidrogênio produzido a partir de gás natural (cinza) que poderia se transformar em hidrogênio de baixo carbono (azul).

Podem ser mencionadas diversas outras rotas para a produção de hidrogênio, tais como como biodegradação, pirólise, gaseificação e micro-ondas (conversão de resíduos plásticos). O desenvolvimento da economia de hidrogênio de baixo ou zero carbono também poderá utilizar tecnologias híbridas. (Santana e Gonçalves, 2021).

Conforme mencionado anteriormente, a diferenciação do hidrogênio por teor de carbono está vinculada à sua forma de produção, em função das implicações quanto às contribuições à

mitigação das emissões de GEE e prevenção das mudanças climáticas em todo o mundo. Por este motivo, se diferencia a origem de produção através do uso de jargões com referência à distinção por cores, demonstrados na Tabela 2.1 (IEA, 2019).

Tabela 2.1 – Tipos de hidrogênio

Preto	Produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS.
Marrom	Produzido de carvão mineral (hulha) sem CCUS.
Cinza	Produzido de gás natural, sem CCUS.
Azul	Produzido de gás natural (eventualmente também de outros combustíveis fósseis) com CCUS.
Verde	Produzido a partir de fontes renováveis (particularmente eólica e solar) via eletrólise da água.
Branco	Natural ou geológico
Turquesa	Produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO ₂ .
Musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou bio digestão anaeróbica.

Fonte: EPE (2021)

Segundo o *Hydrogen Council (Hydrogen Insights, 2023)*, o mundo soma mais de 1.000 projetos de usinas de hidrogênio no mundo, a mencionada entidade reúne os maiores produtores do gás, sendo que a sua obtenção quanto à pegada ambiental vai depender dos processos envolvidos. Estima que num cenário da produção do vetor energético “verde” atingir a quantidade de 600 milhões de toneladas por ano (mt/ano), poderia responder por 22 % da demanda mundial de energia em 2050, o que se traduziria na redução de 20 % das emissões de GEE no mundo. Já as projeções da Agência Internacional de Energias Renováveis - IRENA são mais modestas, pois para esse órgão, o setor poderia produzir 409 t/ano em 2050, o que significa 12 % da demanda global de energia. (IRENA, 2022, *Inovation trends in electrolyzers*). A Figura 2.2 ilustra as possíveis rotas para a produção de hidrogênio.

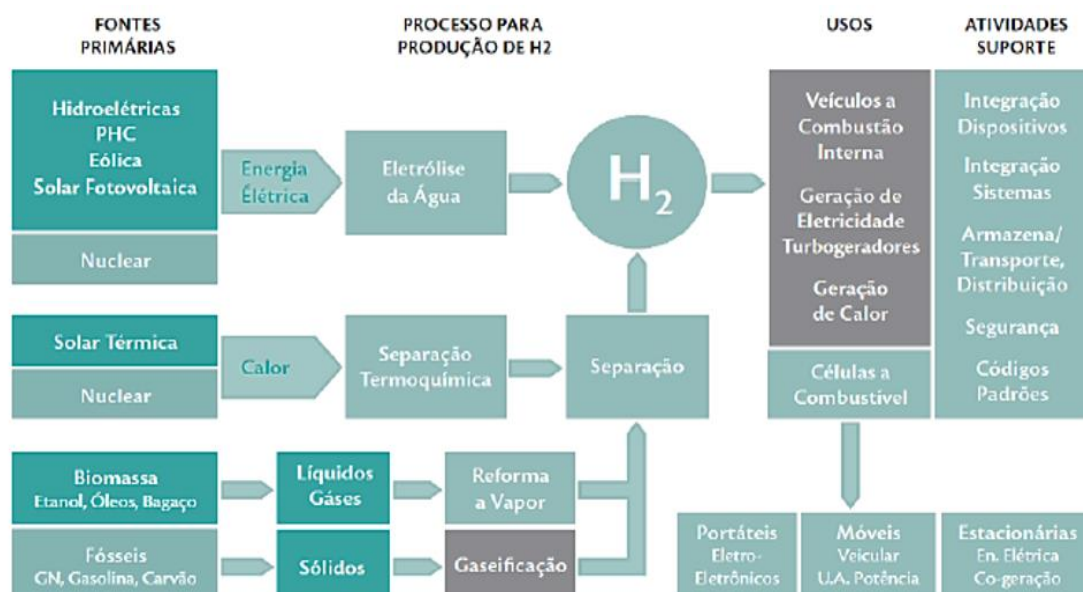


Figura 2.2 - Possíveis rotas para produção de hidrogênio

Fonte: CGEE (2010)

Nos dias de hoje, a contribuição do hidrogênio na matriz energética global tem baixa representatividade, uma vez que apenas aproximadamente 100 milhões de toneladas anuais são utilizados com finalidades químicas em processos industriais, como por exemplo, o refino de petróleo, produção de fertilizantes, siderúrgicas e indústria química. Os especialistas acreditam que o processo produtivo predominante de H_2V nos próximos anos será o de eletrólise da água, método que será obtido em plantas equipadas com eletrolisadores (Zaparolli, 2022).

Conforme mencionado anteriormente, a classificação dada ao H_2V é devida ao fato de ser produzido a partir de um meio com baixo ou nula intensidade de carbono. Ao se considerar a matriz energética brasileira atual e o potencial de produção de energias renováveis do Brasil, pode-se concluir que o H_2V produzido no país tem um importante potencial para auxiliar no processo de transição para uma economia global de baixo carbono (PUC-RS, 2022).

Durante décadas, o hidrogênio vem sendo tratado como uma fonte de energia de grande potencial e disruptiva para o futuro, mas com significativos desafios tecnológicos e de mercado, o hidrogênio vem se tornando um objetivo estratégico de governos e empresas de forma global. O mercado de hidrogênio poderá ser potencializado a partir de políticas energéticas pós-pandemia, com a implementação de medidas visando a retomar a economia e acelerar a transição energética em diversos países. Vale ressaltar que o H_2V pode ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo ou nulo carbono, conforme mencionado, dependendo do processo de produção, em setores de difícil eletrificação e também, como vetor para armazenamento de energia, viabilizando maior entrada de renováveis variáveis como a eólica,

a solar, etc. Por estes motivos, o H₂V é visto como um recurso com capacidade de promover a conexão dos mercados de combustíveis, elétrico, industrial, dentre outros (EPE, Nota Técnica, Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio, 2021).

A expectativa é que o hidrogênio desempenhe um papel crucial como portador de energia de baixo carbono e matéria prima na descarbonização das economias. Na atualidade, a produção de hidrogênio depende de recursos fósseis e se traduz em cargas ambientais substanciais. Em termos de locais para implementação de plantas de eletrólise, as ilhas geográficas possuem um grande potencial como “*hubs*” (espaços físicos ou virtuais integrados) de exportação de hidrogênio, devido aos fatores de capacidade dos geradores de eletricidade eólica e fotovoltaica (PV) nessas áreas específicas, a maioria das vezes baixas em densidade populacional e, conseqüentemente com baixa demanda local. Além disso, a produção de hidrogênio em larga escala pode representar uma oportunidade para o desenvolvimento econômico da região em questão. Neste sentido, são aconselhadas avaliações ambientais e técnico-econômicas abrangentes de ciclo de vida, com a finalidade de avaliar potenciais “*clusters*” (agrupamentos) de produção de hidrogênio em locais que apresentam pontos favoráveis (Terlouw *et al.*, 2022).

O Brasil está envidando esforços a fim de fazer parte do mapa global da produção de H₂V, o vetor energético limpo que detém potencial para atender demandas do setor elétrico e automotivo com baixo impacto ambiental. O hidrogênio possui alto poder calorífico (Tabela 1) cerca de três vezes superior ao do diesel, da gasolina e do gás natural. Quando transformado em energia, suprimindo um motor a combustão ou em qualquer outra aplicação, não apresenta emissões de GEE e uma vez liberado na atmosfera, em contato com o oxigênio, resulta em vapor d’água (Zaparolli, 2022).

O Brasil conta com abundância de sol e ventos, razão pela qual o país se revela com grande potencial na produção do H₂V, uma vez que sua matriz energética é baseada em fontes renováveis beneficiada pelos seus recursos naturais mencionados e também pelos custos de produção competitivos. A aplicação do H₂V na indústria, no lugar de insumos primários na produção de cimento, vidros, mineração, siderurgia, geração de energia e transportes pesados, poderá desempenhar um papel crucial na redução de emissões de GEE, contribuindo com a descarbonização da indústria e da economia do país (IPEA, Panorama do Hidrogênio no Brasil, 2022).

De acordo com o *Hydrogen Council* (*Hydrogen Insights*, 2021), a escolha da tecnologia para distribuição do hidrogênio está estreitamente ligada à sua finalidade do uso, critérios de

pureza e necessidade de armazenamento de longo prazo. O transporte na forma liquefeita mostra maior pureza além de facilidades para distribuição posterior por via rodoviária para atender a postos de abastecimento de veículos movidos a pilha de combustível, por exemplo.

Quando comparado com o hidrogênio convertido em amônia, o hidrogênio liquefeito mostra baixa densidade de energia volumétrica, além de elevadas perdas diárias com o armazenamento. Por outro lado, os níveis de pureza da amônia (NH_3) são inferiores ao hidrogênio liquefeito, além de que devido ao grau de toxicidade seu armazenamento em áreas residenciais é restrito (*Hydrogen Council, Hydrogen Insights*, 2021).

2.1.3 Potencial de recursos para produção de hidrogênio verde no Brasil

Em 2021 foram anunciados diversos projetos de P&D em escala piloto bem como projetos em escala industrial, dentre eles, os projetos do *hub* no Estado do Ceará no porto de Pecém; os projetos no porto de Suape, em Pernambuco; e os projetos no porto de Açu, no Estado do Rio de Janeiro, atualmente em estudo de viabilidade técnica e econômica. Na Figura 2.3, é apresentado o mapa de potencial técnico de produção de H_2V .



Figura 2.3 - Projetos de H_2V no Brasil

Fonte: EPE (2024)

Obs.: nº 16 UNIGEL: encontra-se em recuperação extrajudicial (Bloomberg, 2024).

Recentemente foram lançados dois projetos no Porto Piauí, a 351 km de Teresina (Presidência da República, 2024).

2.2 Aspectos, características químicas e físicas do hidrogênio

O gás hidrogênio é 14,4 vezes mais leve que o ar. Além de ser um vetor energético, é um combustível primário, pois ele pode ser encontrado na natureza em forma pura ou misturada com outros gases. O Brasil tem reservas localizadas nos estados de Ceará, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Roraima e Tocantins (Miranda, 2019).

Cabe mencionar que a manipulação do hidrogênio, em função de sua baixa densidade e baixos pontos de fusão e ebulição, apresenta desafios, uma vez que esse vetor energético, em condições normais de temperatura e pressão, é inodoro e possui grande potencial de difusão e efusão. Em relação ao seu potencial energético, o hidrogênio apresenta um potencial três vezes maior em relação ao diesel, visto que 1 kg de hidrogênio tem três vezes mais conteúdo energético que 1 L de diesel.

O hidrogênio, como vetor energético, tem em comum com a eletricidade a característica da versatilidade; entretanto, a diferença entre eles é que o hidrogênio pode ser utilizado como portador de energia química por sua composição de moléculas, além de elétrons, o que facilita o armazenamento e transporte de uma maneira estável, a exemplo do petróleo, biomassa, gás natural e carvão. Seu transporte geralmente é realizado em forma de gás sob alta pressão (500-700 bar) ou de forma liquefeita, reduzindo a temperatura a -252°C , que é um processo complexo e de alto custo. (MME, Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro, 2021).

O hidrogênio também pode ser convertido em amônia (NH_3) ou transportado via a tecnologia *Liquid Organic Hydrogen Carrier* (LOHC), compostos orgânicos insaturados que podem armazenar hidrogênio por meio de processos com base na hidrogenação e desidrogenação (demanda elevadas quantidades de calor). O LOHC é líquido em condições normais de pressão e temperatura, com características similares ao diesel e gasolina, assim, pode-se fazer uso da infraestrutura disponível do diesel e armazenar hidrogênio por longos períodos, a porcentagem segura de 10-20%, que não é o caso do hidrogênio liquefeito. (Em locais onde há gasodutos, o hidrogênio pode ser transportado em sua forma gasosa comprimida a 350 ou 700 bar (70 MPa) (Niermann *et al.*, 2018)). As Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4, apresentam o poder calorífico de combustíveis diversos, as emissões de CO_2 no ciclo de vida da produção de hidrogênio por rota tecnológica do mundo e os tipos de hidrogênio e emissão de carbono, respectivamente.

Tabela 2.2 - Poder calorífico de combustíveis diversos

Combustível	Valor do poder calorífico superior (a 25°C e 1 atm)	Valor do poder calorífico inferior (a 25° C e 1 atm)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Fonte: Santos e Santos (2005)

Tabela 2.3 - Emissões de CO₂ no ciclo de vida da produção de hidrogênio por rota tecnológica no mundo

Tecnologia	Intensidade de Carbono (kgCO ₂ /kg/H ₂)
Reforma a vapor do metano	10,1 – 17,2
Gaseificação do carvão	14,7 - 26,1
Pirólise do metano	4,2- 9,1
Biomassa	0,3 – 8,6
Eletrólise (gás natural ciclo combinado)	23,0
Eletrólise (Eólica)	0,5 – 1,1
Eletrólise (Solar)	1,3 - 2,5
Eletrólise (Nuclear)	0,5 - 1

Fonte: Tenhumberg e Buker (2020)

Tabela 2.4 - Tipos de hidrogênio e emissão de carbono

Tipo de hidrogênio	Fonte combustível/processo	Emissão de carbono kg- CO ₂ /kg- H ₂
Marrom	Carvão/gasificação	18 a 20
Cinza	Gás natural/reforma vapor	8 a 12
Turquesa	Gás natural/pirólise	5 a 11
Azul	Gás natural/apreensão CO ₂	0,6 a 1
Amarelo	Rede eletricidade/eletrólise	0 a 9
Rosa	Calor/nuclear/eletrólise	0 a 0,4
Verde	Energia renovável/eletrólise	0

Fonte: Academia Cearense de Energia (ACE) (2021) *apud* Castro (2021)

2.2.1 Aplicações do hidrogênio

O H₂V possui aplicação em diversos setores industriais, e é 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 por exemplo, a gasolina. Também, pode ser utilizado como vetor energético, acumulando energia renovável produzida em períodos de alta produção e baixa demanda de energia elétrica. Estima-se que a produção mundial atual de hidrogênio a partir de fontes fósseis emite em torno de 830 milhões de toneladas de CO₂ por ano. Nesse contexto, o H₂V tem sido apontado como uma alternativa para os diferentes processos intensivos de carbono, por ser um componente importante para a indústria em geral. Além disso, o hidrogênio pode ser empregado para abastecer motores que operam com motor a combustão interna ou com células a combustível, auxiliando na descarbonização do setor de transportes (PUC-RS, 2022).

O uso de energias fósseis é economicamente conveniente, mas o meio ambiente tem sido afetado, pois o Brasil continua a contribuir com a descarga de grandes quantidades de CO₂, causando o efeito estufa com consequências para o aquecimento global. Assim, a Economia do Hidrogênio, é vislumbrada a ser estabelecida para as próximas décadas, com o objetivo de reduzir os impactos do carbono. Para consolidar esta economia, o hidrogênio deve ser produzido de forma massiva, sendo que a matéria prima mais disponível para sua produção é a água. No caso do Brasil, a eletrólise, em combinação com uma fonte renovável de energia e geração de energia com célula a combustível, seria uma boa base para melhorar o fornecimento de energia distribuída em áreas remotas, onde a rede elétrica não está presente ou é deficiente (Saliba-Silva *et al.*, 2019). O ciclo produtivo do H₂V é apresentado na Figura 2.4.

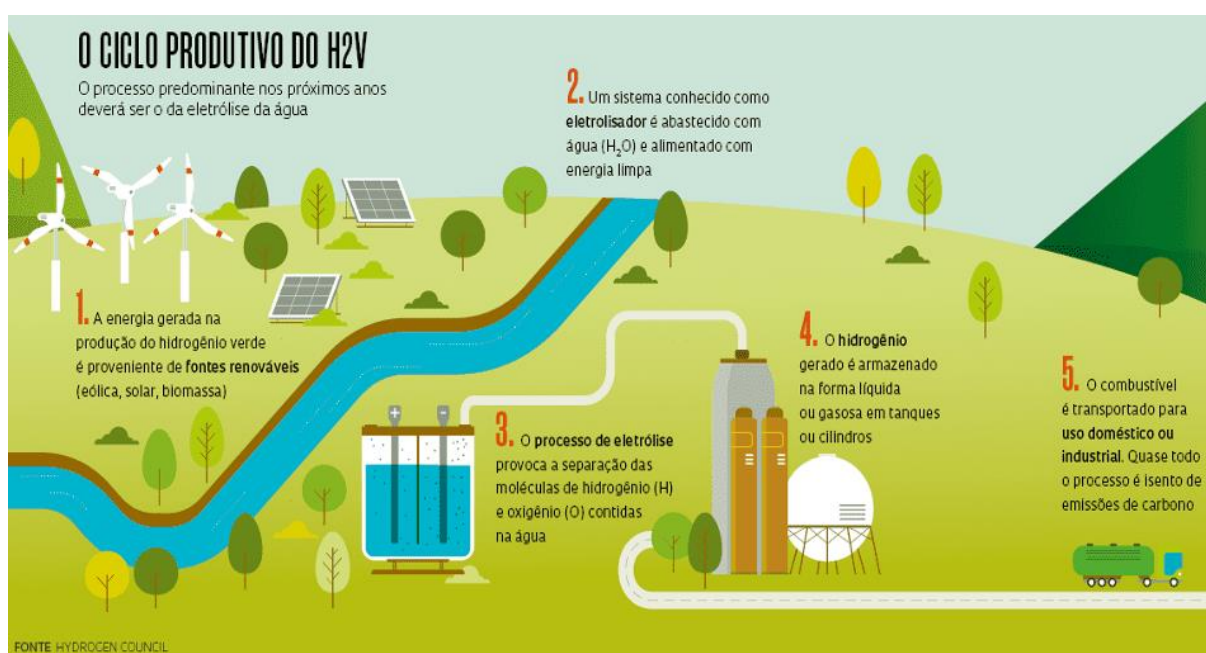


Figura 2.4 - Ciclo produtivo do H₂V

Fonte: Zaparolli (2023) *apud* Hydrogen Council (2022)

2.2.2 Segurança do hidrogênio

De acordo com estudos da HySafe (*International Association of Hydrogen Safety*), avaliar a segurança é de suma importância nas instalações do hidrogênio como nova tecnologia, dadas as suas características específicas de periculosidade. Neste sentido, visto que atualmente diversas normas e documentos ainda estão sendo revisados, a abordagem que deverá ser adotada é a que considera as instalações de hidrogênio como sistemas perigosos aos quais se aplica uma abordagem de segurança orientada ao risco, utilizada hoje em dia em instalações similares. Na aplicação da mencionada abordagem, considera-se que as instalações de hidrogênio são um sistema complexo, sujeitas a desafios que podem levar a efeitos indesejados, com vários graus de impacto de danos e, portanto, vários níveis de risco. A essência da filosofia, cujo objetivo é reduzir o nível de risco gerado por diversos perigos a níveis aceitáveis, está baseada em um conceito de tipo camada, isto é, considera-se que os riscos são mantidos em nível baixo, utilizando 3 grupos de camadas de proteção/segurança, realizando as seguintes ações:

- Desenvolver um projeto da instalação com características inerentemente apropriadas que irão assegurar que a instalação será projetada de tal forma que terá um nível de proteção incorporado nas soluções adotadas, combinada com um filosofia de operação prudente que deve buscar alcançar objetivos de produção, sem colocar em perigo o nível de segurança, e realizando inspeções e manutenções contínuas na instalação;
- Implementar sistemas especiais no projeto da instalação, os chamados sistemas de segurança, projetados para enfrentar desafios específicos: barreiras de segurança para diminuir o efeito da reação dos sistemas a um conjunto de sinais de detecção aos desafios existentes, que serão seguidos de funções de mitigação realizadas pelos sistemas técnicos;
- Desenvolver um conjunto de procedimentos e abordagens gerenciais para lidar com casos de emergência, uma vez que as camadas anteriores de segurança tenham falhado: funções de mitigação e procedimentos de emergência projetados como última camada de proteção para diminuir o risco à população, ao meio ambiente e trabalhadores, caso as outras camadas tenham falhado.

Para cada projeto adotado é realizada a avaliação sistemática dos riscos e as ações a serem tomadas a fim de manter o risco abaixo dos níveis toleráveis. Essa avaliação sistemática é chamada de “Análise Quantitativa de Risco” (*Quantitative risk assessment-QRA*), método matemático utilizado para avaliar valores numéricos de nível de diversos tipos de risco: individual, ambiental, de trabalhadores e público, em comparação com critérios de risco

regulatórios. O objetivo da avaliação de risco é avaliar o risco relacionado a uma atividade específica com a finalidade de gerenciar esse risco de forma eficaz. Vale ressaltar que, embora o QRA utilize métodos científicos e dados verificáveis, há incertezas, limitações e limites de aplicação, desta forma, este método é utilizado como ferramenta complementar (HySafe, 2009).

A norma ISO 45001/2018 define o perigo como uma fonte com potencial de provocar lesões e deterioração à saúde. Quanto às propriedades da combustão do hidrogênio, as mesmas indicam: seu manuseio não é fácil, é muito leve o que pode causar problemas de vazamento e é também altamente inflamável (Najjar, 2013). A inflamabilidade do hidrogênio é em função de seu nível de concentração que é bem maior que a de outros combustíveis (Middha *et al.*, 2010; Mirza *et al.*, 2011).

Todo o processo de técnicas de identificação de riscos à segurança tem sido aplicado com sucesso em setores diversos da indústria de hidrogênio, dentre as técnicas, podem-se mencionar (*Safety Planning and Management in EU Hydrogen and Fuel Cells Projects - Guidance Document*, 2021):

- Lista de verificação (*Check-list*);
- Análise E-SE;
- Análise de falha de modos e efeitos;
- Análise de árvore de falhas e estudo de perigo e operabilidade.

A “Gestão de Segurança do Processo” (*process safety management-PSM*) trata da identificação, compreensão e controle na prevenção de lesões e incidentes ligados ao processo (incêndios, explosões, vazamentos tóxicos) (Amyotte e Rigas, 2013). A PSM foi apresentada em 1971 por especialistas na Federação Europeia de Engenharia Química e posteriormente evoluiu para a criação de sistemas e estruturas na década de 1980 (EPSC,2018).

2.2.3 Certificação do hidrogênio

As diferentes rotas de produção do hidrogênio determinam as respectivas intensidades de emissão de CO₂, a certificação irá qualificar critérios e indicadores de sustentabilidade no âmbito da descarbonização global e ao cumprimento das metas responsáveis de *Environmental, Social and Governance* (ESG). Assim, a certificação é o instrumento fundamental para delimitar os parâmetros dos diferentes tipos de hidrogênio para o mercado. A emissão de certificados de hidrogênio irá garantir sua origem e qualificar seus derivados a ofertantes e demandantes do novo vetor energético. Naturalmente, a implantação e o desenvolvimento do hidrogênio, tanto em nível nacional como global, vão depender do estabelecimento e ampla

aceitação de sistemas de certificação, bem como do rastreamento de sua produção, que irá monitorar a cadeia de valor, essencial para as empresas do setor.

Atualmente não está disponível um sistema de certificação internacional consolidado. Nesse sentido, é necessária uma regulamentação incluindo códigos e normas que possam proporcionar a confiança do mercado e incentivar novos investimentos em energias renováveis e infraestrutura. Conforme o relatório da IRENA (*Creating a Global Hydrogen Market*, 2023), as certificações podem ser voluntárias ou obrigatórias. Vale destacar que as iniciativas de certificação vêm aumentando nos últimos cinco anos, em que se pode mencionar a União Europeia, Japão, Austrália e China.

No que diz respeito ao Brasil, a White Martins, empresa que instalou a primeira planta projetada para produção em larga escala da América do Sul, contratou a empresa certificadora alemã TÜV Rheinland e será a primeira produtora de hidrogênio do Brasil detentora do selo “*Green hydrogen certification*” (Castro *et al.*, Portal do Hidrogênio Verde, 2023).

2.2.4 Legislação do hidrogênio

Existem diversos projetos de lei tramitando atualmente onde se destacam:

- PL 1880/2022: cria programas de incentivo para a produção em escala, de células de combustível aproveitando o potencial das cadeias de valor do hidrogênio, etanol e biogás. Iniciativa da Comissão de Meio Ambiente do Senado Federal (Senado Federal, 2022);

- PL 2308/23: marco legal de produção e uso do hidrogênio aprovado em 28.11.23 pela Comissão Especial da Câmara dos Deputados sobre Transição Energética, cujo texto trata de princípios, objetivos, taxonomia, governança, certificação e incentivos fiscais e financeiros. Em 11.07.2024 foi aprovada pela Câmara dos Deputados a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, chamada de Hidrogênio Verde, **a lei 14.948 foi sancionada pelo Presidente da República em 02.08.2024, que institui o marco legal de hidrogênio de baixa emissão de carbono.** A governança do setor ficará a cargo da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (Câmara dos Deputados, 2023).

O projeto de lei abaixo recebeu voto favorável do relator e tramita nas comissões da Câmara.

- PL5816/2023 sobre a indústria de hidrogênio de baixo carbono e suas tipificações, altera a lei 9427/1996, 9478/1997, 10438/2002, 11.488/2007, 11.508/2007.

Dentre as definições estipuladas no PL 5816, cabe mencionar as seguintes:

- 4º I - hidrogênio de baixa emissão de carbono: combustível ou insumo industrial coletado ou obtido a partir de fontes diversas de processo de produção, e que possua emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE), conforme análise do ciclo de vida, com valor inicial menor ou igual a quatro quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido (7 kg CO₂eq/kg H₂);

- 4º II - hidrogênio renovável: hidrogênio combustível ou insumo industrial, coletado ou obtido a partir de fontes renováveis, incluindo solar, eólica, hidráulica, biomassa, biogás, biometano, gases de aterro, geotécnica, das marés e oceânica;

- 4º III - hidrogênio verde: hidrogênio renovável e de baixo carbono produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes solar e eólica, respeitado o critério de adicionalidade e observado os critérios de temporalidade ou de exigência de geração renovável mínima de 90 % em bases anuais por subsistema;

- 4º VIII - Estudo de análise de risco (EAR): parte integrante do estudo ambiental que contempla a avaliação da vulnerabilidade do empreendimento e da região em que está localizado, incluindo técnicas de identificação de perigos, estimativas de frequência de ocorrências anormais e o gerenciamento de riscos;

- 4º IX - Plano de gerenciamento de risco (PGR): documento que descreve como o gerenciamento de risco do empreendimento será executado, monitorado e controlado, e;

- 4º X - Plano de ação de emergência (PAE): documento integrante do plano de gerenciamento de risco do empreendimento que estabelece as ações a serem executadas pelo empreendedor em caso de situação de emergência e identifica os agentes a serem dela notificados (Senado Federal, 2023).

Vale ressaltar o Capítulo VI Da Sustentabilidade, Seção 1 Do Uso da Água para a Produção de Hidrogênio, transcrito a seguir:

- Artigo 26. O poder público deverá dar prioridade na análise para emissão de outorga de uso de recursos hídricos para produção de hidrogênio de baixo carbono. Parágrafo único. A suspensão da outorga de uso de recursos hídricos emitida nos termos do *caput* somente poderá ocorrer para atendimento ao disposto no inciso III do artigo 1º da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997;

- Artigo 27. Os projetos de produção de hidrogênio de que trata esta Lei deverão priorizar o uso das águas originadas do processo de dessalinização, bem como o uso de águas de chuva e o reuso não potável de águas cinzas de que trata o artigo 49-A da Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007;

- Artigo 28: São proibidos a emissão de outorga e o uso de recursos hídricos para projetos de produção de hidrogênio de que trata esta Lei em locais com conflito pelo uso de águas. Parágrafo único. O Poder Executivo federal estabelecerá os locais com conflito pelo uso de águas de que trata o *caput*;

- Artigo 29. Os preços unitários estabelecidos para cálculo da cobrança pelo uso da água, nos termos do artigo 20 da Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, para a produção de hidrogênio, não poderão exceder os valores praticados nas outorgas vigentes para o mesmo recurso hídrico.

2.3 Processos de produção de hidrogênio verde

A eletrólise é uma fonte potencial de energia do hidrogênio, uma vez que há mais abundância de água do que de hidrocarbonetos. Por outro lado, existem regiões geopolíticas, em nível nacional como global, onde não há disponibilidade de hidrocarbonetos, com destaque para o gás natural, que é a fonte predominante na reforma do hidrogênio. Assim, o hidrogênio produzido a partir da água se destaca. No que tange aos custos, a eletrólise pode produzir hidrogênio numa escala distribuída e suprir a demanda de hidrogênio dos primeiros veículos com célula de combustível, por exemplo. Vale ressaltar o papel que poderá representar este vetor energético no mercado de combustíveis de transporte, um dos setores responsáveis por altos índices de emissões de GEE. A tecnologia do processo químico-físico da eletrólise se ajusta ao mercado brasileiro, uma vez que o país conta com abundância de recursos naturais e uma matriz energética limpa (Saliba-Silva *et al.*, 2009). A produção de H₂V é apresentada na Figura 2.5.

A produção de hidrogênio verde

Alternativa para descarbonizar o planeta e reduzir as emissões de gases de efeito estufa

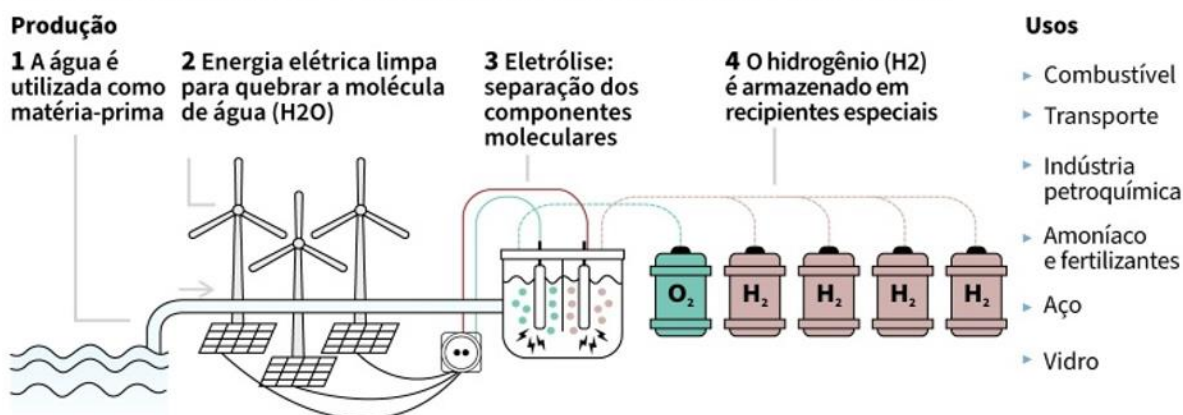


Figura 2.5 - Produção de H₂V

Fonte: Ministério de Energia do Chile – Agência France Presse-AFP (2023)

O princípio de eletrólise da água se traduz na passagem de corrente contínua entre dois eletrodos que estão imersos num eletrólito. No cátodo, o terminal negativo, se forma o hidrogênio e no ânodo, o terminal positivo, se forma o oxigênio (Kopenen, 2015).

Segundo Knob (2013), a história da eletrólise da água começou na primeira revolução industrial no ano de 1800, quando Nicholson e Carlisle foram os primeiros a descobrir a possibilidade da decomposição eletrolítica da água.

Na Tabela 2.5, é apresentada a linha do tempo da geração de hidrogênio por meio da eletrólise da água, realizada na indústria há mais de um século.

Tabela 2.5 - Histórico da eletrólise

Ano	Evento
1800	Nicholson e Carlisle descobrem a quebra eletrolítica da água
1902	Existência de aproximadamente 400 eletrolisadores industriais em operação
1939	Construção da primeira grande planta (10.000 Nm ³ de H ₂ /h)
1948	Primeiro eletrolisador pressurizado (Zdansky/Lonza)
1966	Primeiro sistema de membrana eletrolítica polimérica (PEM) General Eletric
1972	Primeira unidade de eletrólise por sólido óxido
1978	Primeiros sistemas alcalinos avançados

Fonte: Knob (2013)

A eletrólise é um processo relativamente simples para obtenção de hidrogênio, com pureza de até 99,999 % em volume (Ursua *et al.*, 2012 *apud* Palhares, 2016) a depender da secagem e eliminação de impurezas do gás. Segundo Machado (2020) o processo de eletrólise da água é a quebra das ligações das moléculas de água causada por uma corrente elétrica que transita entre dois eletrodos inertes em uma solução eletrolítica, a reação global é apresentada na Equação 2.1.



De acordo com Wimmer (2008), um sistema eletroquímico deve se compor por dois eletrodos (os condutores elétricos) que são imersos em um eletrólito que transporta íons. Duas leis de Faraday, de 1835, resumem o fenômeno da eletrólise:

- A quantidade do produto primário que se forma num eletrodo é proporcional à eletricidade que passa pela solução.
- As quantidades de produtos primários diferentes que se formam num eletrodo pela mesma quantidade de eletricidade são proporcionais às suas massas moleculares relativas divididas pela variação do seu número de oxidação.

O enunciado da lei de Faraday pode ser sintetizado da seguinte maneira: “A passagem de uma corrente elétrica, de um condutor metálico para um condutor eletrolítico, ou o contrário,

é sempre acompanhada por uma reação eletroquímica.” A Figura 2.6 ilustra o processo da eletrólise.

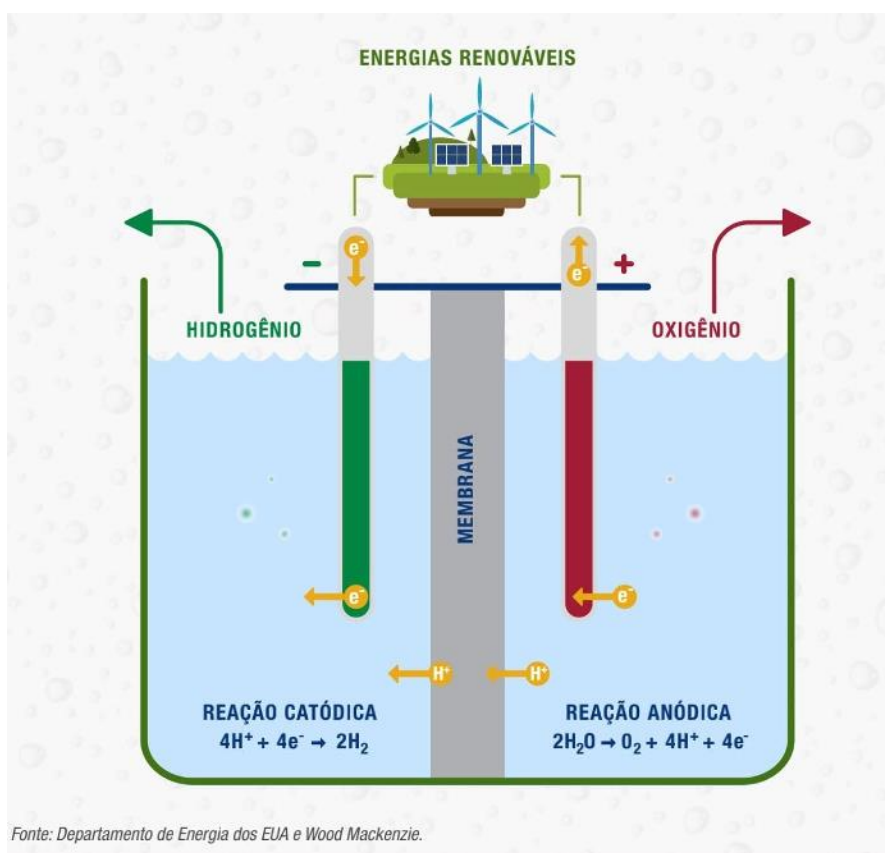
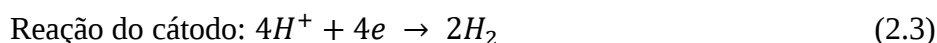
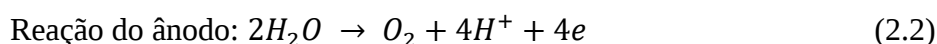


Figura 2.6 - Produção hidrogênio verde por via da eletrólise

Fonte: Departamento de Energia dos EUA e Wood Mackenzie *apud* Iberdrola (2022)

Segundo o Departamento de Energia dos EUA, assim como as células de combustível, os eletrolisadores consistem em um ânodo e um cátodo, os quais são separados por um eletrólito. Os eletrolisadores funcionam de formas diferentes, em função dos diversos tipos de material eletrolítico e as classes iônicas que conduz. A Figura 2.6 apresenta um eletrolisador do tipo PEM com membrana eletrolítica polimérica ao centro. No ânodo, a água reage para formar oxigênio e íons de hidrogênio carregados positivamente. Os elétrons fluem através de um circuito externo enquanto os íons de hidrogênio se movem através da membrana até o cátodo, onde os íons de hidrogênio se combinam com os elétrons do circuito externo para formar o hidrogênio. A reação global é apresentada nas Equações 2.2 e 2.3.



De acordo com Camargo (2021), existem dois parâmetros experimentais que definem o tipo de eletrólise da água: a temperatura e o pH do eletrólito. Quanto maior é a temperatura,

menor é o consumo de energia elétrica. A partir destas características, as tecnologias para o processo de eletrólise da água podem ser catalogadas em baixa temperatura ($<200^{\circ}\text{C}$), média temperatura ($220 < T < 600^{\circ}\text{C}$) e alta temperatura ($>600^{\circ}\text{C}$).

Teoricamente, só é necessária tensão elétrica de 1.23 V para acionar os eletrolisadores de água na produção de hidrogênio. No entanto, requer uma tensão muito maior 1.8 – 2.0 V no processo prático de eletrólise, devido aos sobre potenciais no cátodo e no ânodo. Portanto, vários tipos de eletro-catalisadores têm sido desenvolvidos para reduzir os sobre potenciais¹ da reação de evolução do hidrogênio e reação de evolução do oxigênio (Wang *et al.*, 2022).

A eletrólise da água combinada com fontes de energias renováveis, como a hidráulica, eólica e solar fotovoltaica, é considerada uma forma limpa e sustentável de produção de hidrogênio (Zeng e Zhang, 2010 *apud* Palhares, 2016).

Considerando que algumas fontes renováveis de energia são intermitentes (solar, eólica) não podem ser usadas diretamente como combustível para transporte particular ou público, o H_2V , ao contrário, é passível de ser armazenado em suas formas líquida ou gasosa, transportado, é não contaminante, independe de fontes primárias, é renovável e pode ser usado de diversas formas (Machado, 2020).

Um aumento significativo na capacidade de fabricação e implantação de eletrolisadores será necessária para responder à crescente demanda por H_2V , e este deve ser limpo; portanto, como mencionado, produzido a partir de fontes renováveis de energia. Neste cenário, a capacidade instalada de eletrolisadores de água precisa crescer para cerca de 350 GW até 2030 acima da capacidade de eletrólise de aproximadamente 0.5 GW, atualmente disponível. Esta projeção implica numa extraordinária expansão do mercado para os eletrolisadores, que desempenham um papel crucial no esforço em direção à descarbonização em toda a economia.

Diversos países já incluíram especificamente metas de implantação de capacidade de eletrolisadores em suas estratégias nacionais de hidrogênio. Os custos de investimento para plantas de eletrólise podem ser reduzidos em um 40 % no curto prazo e num 80 % no longo prazo, por meio de estratégias-chave, como o projeto e construção aprimorados do eletrolisador, economias de escala, substituição de materiais escassos por materiais abundantes, aumento da

¹ No caso de alguns metais, é necessária uma deposição extra, isto também ocorre quando se deseja passar uma corrente maior através do eletrodo, para que a reação da deposição ocorra a uma taxa maior. Ainda no caso dos eletrodos reversíveis, é necessário um potencial extra. Assim, se diz que o eletrodo está polarizado e o sobre potencial é a diferença numérica entre o potencial do eletrodo de trabalho e seu potencial reversível (Ponte, UTFPR).

eficiência de operações e taxas de aprendizado, com implantação de alta tecnologia alinhada com a meta climática de limitação de aumento em relação aos níveis de 2015.

Vale ressaltar que os eletrolisadores sofrem rápida degradação, o que significa que também é necessário o desenvolvimento de pesquisas para aumentar os processos de eficiência e do ciclo de vida tecnológico (IRENA, *Inovation Trends in Electrolyzers*, 2022).

Os eletrolisadores podem ser classificados por:

- Tipo de eletrólito (alcalina, PEM, óxido sólido).

Os eletrolisadores alcalinos usam uma solução alcalina como eletrólito, em geral, hidróxido de potássio (KOH) com concentrações mássicas de 25-30 %. Os eletrolisadores do tipo PEM possuem um eletrólito sólido, que é uma fina membrana polimérica geralmente feita de Nafion (eletrólito polimérico fabricado pela empresa DuPont). Os eletrolisadores de óxido sólido utilizam um eletrólito de cerâmica (Camargo, 2021; Palhares 2016).

- Temperatura (de baixa temperatura, que operam a 80° C; de alta temperatura, que operam a 500° C). Os eletrolisadores alcalinos operam entre 20-80° C. Os eletrolisadores do tipo PEM operam entre 20-200° C. A tecnologia de óxido sólido opera a 50-1000° C (Camargo, 2021);
- Estado do eletrólito (líquidos, como ácidos ou alcalinos; sólidos, como a zircônia estabilizada com ítria cerâmica). Os eletrolisadores alcalinos utilizam eletrólito líquido enquanto as tecnologias PEM e SOEC utilizam eletrólito sólido (Portal Hidrogênio Verde, 2021).

Existem cinco grupos de sub tecnologias relevantes para a eletrólise da água, que são importantes para a redução de custo dos eletrolisadores:

- 1) Condições de operação e estrutura da célula;
- 2) Materiais eletro catalisadores;
- 3) Separadores (diafragmas, membranas);
- 4) Capacidade de empilhamento dos catalisadores (*stacks*); e
- 5) Foto eletrólise (IRENA, 2021).

A eficiência dos sistemas eletrolisadores hoje varia entre 60 % e 81 % dependendo do tipo de tecnologia e do fator de carga (Albrecht *et al.*, 2020 *apud* IPEA, Panorama do Hidrogênio no Brasil, 2022).

A seguir, são listados os pontos -chave do eletrolisador:

- “*Stack*” ou pilha do eletrolisador separa a água em hidrogênio e oxigênio. O equilíbrio da planta compreende o fornecimento de água e energia, purificação de água, compressão e outros componentes;
- Eletrolisadores bem projetados podem garantir um importante armazenamento de energia e gerenciar a viabilidade de energia solar e eólica;
- Os materiais e processos para fabricação de eletrolisadores requerem de mais inovação, especialmente com o fim de reduzir características de desempenho entre os diferentes componentes (IRENA, “*Making the breakthrough*”, 2021).

Segundo o Portal do Hidrogênio Verde (2021), o principal desafio da produção de hidrogênio eletrolítico é superar os obstáculos tecnológicos visando a reduzir os custos de produção. Portanto, o desenvolvimento dos eletro-catalisadores livres de metais nobres para separação da água é indispensável para o custo eficiente de produção de hidrogênio. Nesta linha de pesquisa, destacam-se as universidades chinesas. Já na pesquisa de separadores (membranas), destaca-se a Coreia, enquanto pesquisadores da Europa se apresentam na pesquisa de tecnologia de capacidade de empilhamento para eletrolisadores.

O que deve levar em consideração para selecionar o tipo de eletrolisador:

- Tipo de aplicação;
- Condições de operação;
- Custo;
- Impacto ambiental;
- Tipo de recurso energético;
- Disponibilidade comercial;
- Manutenção;
- Experiência; e
- Assistência técnica e treinamento.

Destaca-se que em uma planta de produção de hidrogênio a partir da eletrólise, é necessário contar com equipamento adicional para resfriamento, purificação, compressão e armazenamento. Além disso, deve contar com fornecimento de energia, condicionamento de energia apropriado e sistemas de controle de segurança (Koponen, 2019).

As três versões mais utilizadas para o processo de ruptura eletrolítica da molécula da água para produção de hidrogênio com um alto grau de pureza são:

- a) Eletrólise da água que utiliza eletrólitos alcalinos (*alkaline water electrolysis* - AWE), um diafragma poroso separa compartimentos catódico e anódico.

- b) Eletrólise da água que utiliza membrana de troca iônica ou eletrólito polimérico sólido (*proton exchange membrane* - PEM), a qual vai atuar simultaneamente como eletrólito e separador de eletrodos porosos.
- c) Eletrólise do vapor de água a altas temperaturas (700-1000° C) (*solid oxide electrolyzer*-SOEC), onde se utiliza uma cerâmica condutora de íons O^{2-} e a água dissociada na célula é introduzida na forma de vapor no lado catódico. A quebra eletrolítica vai gerar uma mistura de hidrogênio com vapor de água (Machado, 2020).

2.3.1 Eletrolisador de água alcalina (AWE)

Pode ser considerado como uma tecnologia madura, atinge a faixa de MW e representa a mais alta tecnologia eletrolítica comercializada. Uma vantagem desta tecnologia é que este tipo de eletrolisador possui componentes fabricados de materiais baratos e abundantes (Lappalainen, 2019). A Figura 2.7 apresenta a célula alcalina.

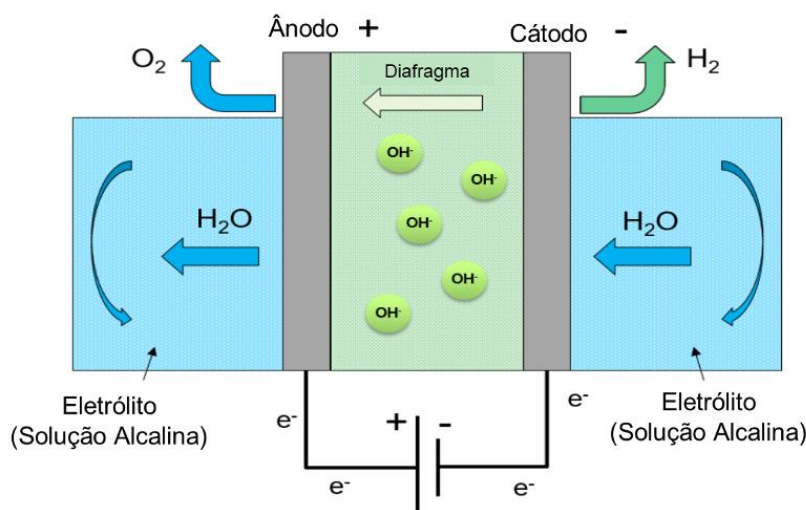
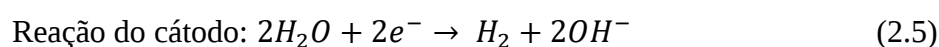
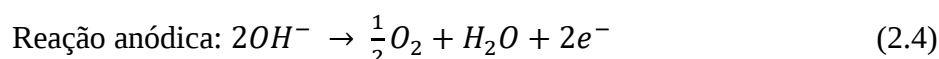


Figura 2.7 - Esquema de princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise de água alcalina

Fonte: Lappalainen (2019)

Conforme mencionado anteriormente, este tipo de dispositivo opera entre 20-80° C (Camargo, 2021). O eletrolisador possui uma célula estruturada a partir de dois eletrodos que estão separados por um diafragma e imersos numa solução aquosa alcalina que é composta de hidróxido de potássio (KOH) concentrado. O meio entre eletrodos é um diafragma permeável a íons OH, meio líquido. O diafragma transporta ânions de hidróxido (OH^-) entre os eletrodos, mas separa os gases produzidos que são o O_2 e o H_2 . Uma vez aplicada a energia elétrica da fonte de corrente contínua, para criar a diferença de potencial necessária em dois eletrodos, a água é reduzida no cátodo e ocorre a oxidação da água no ânodo de forma simultânea. O

hidrogênio é gerado no cátodo e o OH^- produzido é transportado para o ânodo através do diafragma. Os ânions OH^- se recombina para produzir O_2 na superfície do ânodo. Os níveis de pureza do O_2 e do H_2 são respectivamente de 99.9 vol- e 99.7 vol % (Lappalainen, 2019). Os eletrodos geralmente são de Níquel, Cobalto, Ferro ou algumas perovskitas (mineral de óxido de cálcio e titânio, com fórmula geral ABO_3) (Millet e Grigoriev, 2013 *apud* Camargo, 2021). No que tange à eficiência desta tecnologia, a mesma está entre 59-70 % e opera em escala comercial. A reação é apresentada nas Equações 2.4 e 2.5.



Segundo o IPEA (Panorama do Hidrogênio no Brasil, 2022), a eletrólise alcalina é considerada uma tecnologia madura e comercial, pois possui custos de capital relativamente baixos se comparada com outras tecnologias, devido a que não utiliza materiais preciosos em sua composição. O custo de capital do sistema atual de produção de hidrogênio por eletrólise alcalina gira em torno de 1.000 a 1.500 €/kW (Yue e Lambert, 2021). Esta tecnologia é utilizada desde 1920, principalmente para a produção de hidrogênio nas indústrias de fertilizantes e cloro.

Em relação às vantagens dos eletrolisadores alcalinos, podem-se mencionar:

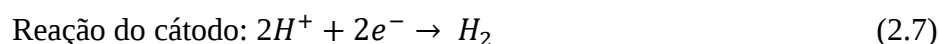
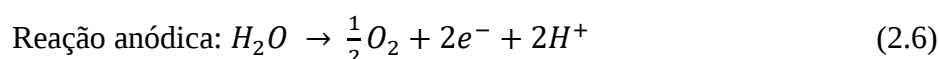
- 1) Baixo custo de capital devido aos materiais baratos necessários para fabricação de eletrodos e separadores (amianto está sendo substituído devido ao nível de periculosidade);
- 2) Tecnologia madura que já demonstrou viabilidade a longo prazo;
- 3) Requerem água ultrapura, e a condutividade serve como medida geral para a tolerância máxima de concentração de ion: permitem níveis de condutividade de 1-5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto eletrolisadores do tipo PEM tem um limite mais rigoroso de até 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Madsen, 2022, *Hydrotech World*). Sistemas complexos de purificação de água não são necessários.

Dentre as desvantagens:

- 1) Baixa faixa de carga parcial: 20-40 % (Carmo *et al.*, 2012);
- 2) Baixa densidade de corrente operacional: 0,2-0,8 A/cm^2 (Kumar *et al.*, 2022);
- 3) Baixa pressão operacional: 2-10 bar (Arsad *et al.*, 2023).

2.3.2 Eletrolisador de membrana de troca de prótons (PEM)

Conta com uma membrana de um tipo de plástico específico que responde pela condução dos prótons, separando os gases do hidrogênio e do oxigênio, resolvendo desta maneira, o problema da baixa densidade que o eletrolisador alcalino possui (Monteiro, 2021). Este tipo de células opera entre 20-200° C (Sapountzi e Gracia, 2017 *apud* Camargo, 2021). Este eletrolisador é formado por dois eletrodos que conduzem os elétrons e um eletrólito que conduz os íons. Eles são prensados pela membrana formando um conjunto eletrodo-membrana que é imerso em água pura. A oxidação ocorre no ânodo e a redução ocorre no cátodo. A seguir ocorre a oxidação da água produzindo hidrogênio, elétrons e prótons. Os elétrons são transferidos via uma fonte de tensão externa de corrente direta e os prótons são transportados através da membrana. É no cátodo onde elétrons e prótons são combinados para formar o hidrogênio (Letcher, 2016; Matinson e Schoor *et al.*, 2014 *apud* Camargo, 2021). A reação global é apresentada nas Equações 2.6 e 2.7.



O eletrolisador PEM foi introduzido na década de 1960 pela General Electric, com o objetivo de superar desvantagens operacionais que apresentavam os eletrolisadores alcalinos. A água utilizada é água pura, estes eletrolisadores são relativamente de pequeno porte o que facilita sua utilização em áreas urbanas densas; porém, eles precisam de catalisadores de eletrodo caros (platina, irídio) e materiais de membrana cuja vida útil é atualmente mais curta que a dos eletrolisadores, o que implica em custos mais elevados. Estes eletrolisadores oferecem várias vantagens sobre os eletrolisadores alcalinos, como operação flexível, pressão de saída mais alta, de até 350 bar (Grigoriev *et al.*, 2020) e menor porte, mas, associados a custos de investimento mais altos, 2.000-3.000 euros/kW (Yue *et al.*, 2021) e vida útil mais curta. O alto custo inicial impulsionado pelo uso de metais preciosos é certamente uma das principais barreiras para a implantação mais ampla de eletrolisadores PEM. Por exemplo, placas bipolares constituem uma parte significativa do custo total ao nível da pilha, devido ao uso de material de titânio revestido de ouro e platina (IRENA, *Inovations trends in electrolyzers for hydrogen production*, 2022).

O tamanho da planta de eletrólise deve ser em diferentes potências nominais do eletrolisador, de 1 a 90 MW. Este intervalo se dá com base nos certificados de garantia física dos estudos de caso, seguindo 6 diretrizes:

- a) a operação é intermitente sem qualquer outra fonte de alimentação quando a energia reduzida não é suficiente para iniciar o eletrolisador;
- b) produção de hidrogênio proporcional à potência do eletrolisador;
- c) o consumo médio de energia em microsiemens (μS) é de 39.5 kWh/kg;
- d) horas de trabalho anuais 720 h (no nordeste);
- e) vida útil de 20 anos e;
- f) preço do hidrogênio verde = US\$4.2/kg (Macedo e Peyerl, 2021).

Atualmente, a produção primária de platina é de aproximadamente 200 toneladas por ano, sendo que 20 % a mais são obtidos da reciclagem de reformadores catalíticos em carros e equipamentos elétricos. Diante disso, IRENA estima que isso pode facilitar a instalação de 2.000 GW de capacidade de eletrolisador e 4.000 GW até o ano 2030, considerando a vida útil de um eletrolisador em 10 anos e reciclagem completa da platina de pilhas desativadas. Assim, o custo da platina não representa um grande gargalo na cadeia de suprimentos, dado que inovações devem reduzir a exigência de platina dos eletrolisadores PEM nos próximos anos (IRENA, *Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production*, 2022). No que tange à eficiência desta tecnologia, a mesma está entre 65-82 % e é já é comercializada (Camargo, 2021). A Figura 2.8 apresenta o conjunto do eletrodo com membrana.

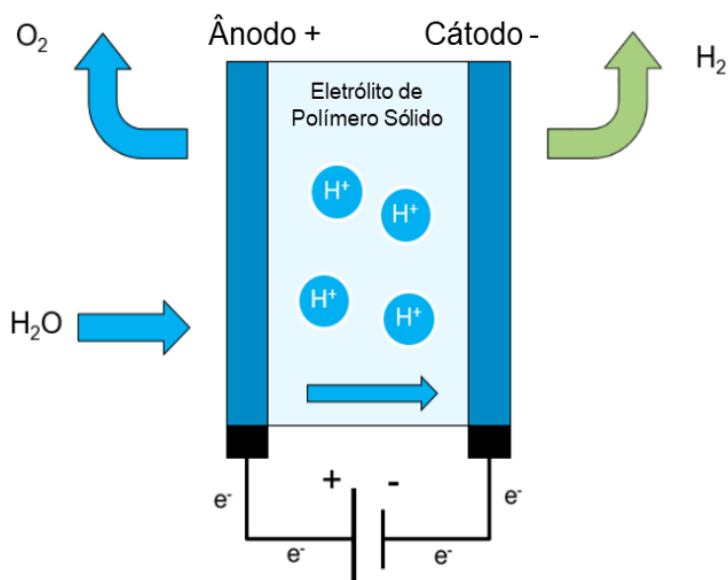


Figura 2.8 - Seção transversal esquemática do conjunto do eletrodo com membrana

Fonte: Lappalainen (2019)

Dentre as vantagens do eletrolisador tipo PEM, são apontadas:

- Operação flexível:

- Pressão de saída mais alta (de até 350 bar: Grigoriev *et al.*, 2020) e pequeno porte (IRENA, 2022)
- Maior desempenho devido à espessura reduzida do eletrólito;
- Eliminação do uso de eletrólitos líquidos corrosivos;
- Maior compactidade de projeto e flexibilidade;
- Processos de fabricação também são simplificados;
- Pressão de operação do eletrolisador torna-se mais alta (Portal Hidrogênio Verde, 2021).

Desvantagens:

- Alto custo inicial impulsionado pelo uso de materiais nobres (placas bipolares formam uma parte importante do custo total no nível da pilha devido ao uso de material de titânio revestido de ouro ou platina (IRENA, *Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production*, 2022).
- A forte acidez do eletrólito junto com a baixa temperatura de operação, exige o uso de metais nobres, como a platina, que torna o eletrolisador PEM uma tecnologia cara;
- A condutividade da membrana polimérica depende das condições de umidade (Portal Hidrogênio Verde, 2021).

2.3.3 Eletrolisador de óxido sólido (SOEC)

Permite a eletrólise de água/vapor em altas temperaturas (600°-900° C) (Lappalainen, 2019). O resultado é uma maior eficiência, em comparação com outras tecnologias de eletrólise da água. Esta tecnologia está em estágio de P&D. O princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise sólida (SOEC) é apresentado na Figura 2.9.

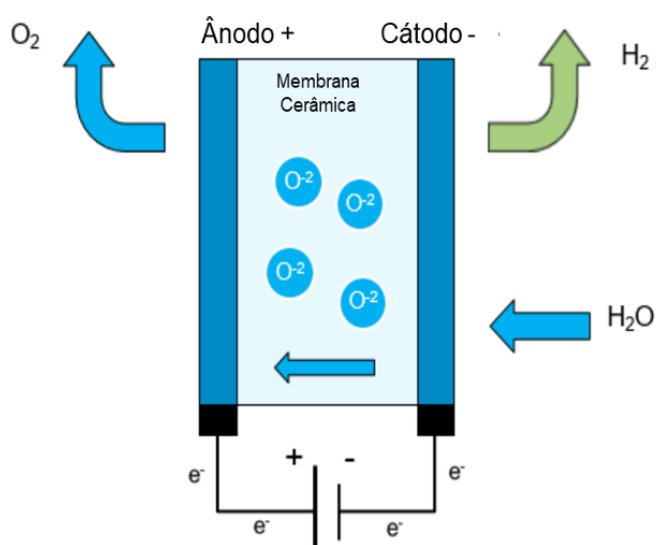


Figura 2.9 - Esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise de óxido sólido

Fonte: Lappalainen (2019)

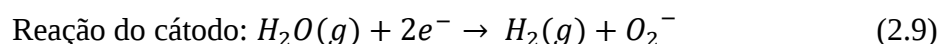
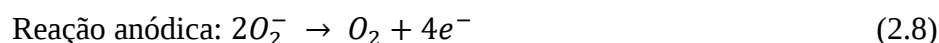
Vantagens:

- Alta eficiência de conversão em comparação com eletrolisadores de baixa temperatura que teoricamente podem chegar a 75 %;
- As células de eletrólise de óxido sólido são capazes de eletrolisar moléculas de CO₂ para produzir CO₂ e eletricidade.

Desvantagens:

- O primeiro desafio é a alta temperatura operacional que limita as opções de materiais que podem ser usados na fabricação e montagem de componentes de células;
- Os componentes da célula são vulneráveis à corrosão, especialmente no eletrodo do ânodo;
- A taxa de degradação também é um fator vital (Portal Hidrogênio Verde, 2021).

A reação é apresentada nas Equações 2.8 e 2.9.



A eficiência desta tecnologia é de 100 % (Camargo, 2021). As Tabelas 2.6, 2.7 e 2.8 apresentam as vantagens, desvantagens e características técnico-econômicas dos diferentes tipos de eletrolisadores, respectivamente.

Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias de eletrólise da água

AWE	Tecnologia bem estabelecida Comercializada para aplicações industriais Eletro catalisadores sem metais nobres Custo relativamente baixo	Densidades de corrente limitadas Cruzamento dos gases Eletrólito líquido altamente concentrado
PEM	Tecnologia comercializada Opera em densidades de corrente mais altas Alta pureza dos gases <i>Design</i> de sistema compacto Resposta rápida	Custo dos componentes da célula Eletro catalisadores de metais nobres Eletrólito ácido
SOEC	Alta temperatura de trabalho Alta eficiência	Estabilidade limitada Em desenvolvimento

Fonte: Kumar e Lim (2022)

Em termos de desempenho das diferentes células de eletrólise, o mesmo pode-se comparar traçando uma curva de corrente e tensão, medido em células típicas. As células PEM e AWE na eletrólise de água requerem uma voltagem E° de 1.23 V, para dar início à reação. Já

a SOEC requer E° de 0,85 V. As células alcalinas convencionais podem ser operadas próximo a 100 ° C, pois a alta concentração de KOH aumenta o ponto de ebulição do eletrolisador.

Tabela 2.7 - Características tecno-econômicas dos eletrolisadores AWE e PEM

Tecnologia	Unidade	AWE		PEM	
Ano		2017	2025	2017	2025
Eficiência	kW eletricidade/kW de H ₂	51	49	58	52
Eficiência (<i>lower heating value</i> - LHV)	%	65	68	57	64
Vida útil da pilha	Horas operação	80.000	90.000	40.000	50.000
CAPEX-custo total do sistema (fornecimento de energia e custos de instalação inclusos)	€/kW	750	480	1.200	700
OPEX	% do CAPEX inicial/ano	2	2	2	2
CAPEX (reposição da pilha)	€/kW	340	215	420	210
Pressão típica de saída	Bar	Atmosférica	15	30	60
Vida útil do sistema	Anos	20		20	

Fonte: Grigoriev *et al.* (2020)

Tabela 2.8 - Características tecno-econômicas de diferentes tecnologias de eletrolisadores

	AWE			PEM			SOEC		
	Hoje	2030	Longo prazo	Hoje	2030	Longo prazo	Hoje	2030	Longo prazo
Eficiência Elétrica (% LHV)	63-70	65-71	70-80	56-60	63-68	67-74	74-81	77-84	77-90
Pressão de operação (bar)	1-30			30-80			1		
Temperatura de operação (° C)	60-80			50-80			650 1000		
Vida útil da pilha (horas de operação)	60.000 90.000	90.000 100.000	100.000 150.000	30.000 90.000	60.000 90.000	100.000 150.000	10.000 30.000	40.000 60.000	75.000 100.000
Faixa de carga (% relativa à carga nominal)	10-110			0-160			20-100		
Pegada da planta (m ² /kWe)	0.095			0.048					

Fonte: IEA (2019)

Pesquisas apontam que o hidrogênio produzido através do processo de eletrólise da água usando eletricidade gerada por fontes renováveis poderá atingir um preço competitivo até o ano de 2030, e que poderão ser implementadas outras alternativas de hidrogênio renovável, como por exemplo, por meio da reforma a vapor do etanol e de outros biocombustíveis. O custo atual

é entre US\$3 e US\$8/kg (Zaparolli, 2022) e o custo estimado está entre US\$2 e US\$5,2/kg (MME/EPE, Plano Decenal de Expansão de Energia-PDE 2031, 2022). A energia nuclear também é considerada outra opção de hidrogênio zero carbono, tanto pela rota termoquímica, quanto pela eletrólise da água (Santana e Gonçalves, 2021).

2.4 Custo do hidrogênio verde produzido

Na produção de hidrogênio verde, os custos estão entre US\$2.50 e 6.80/Kg enquanto o preço atual da produção de hidrogênio cinza está em US\$1 e 1.80/kg e o hidrogênio azul a US\$1.40 e 2.40/kg. Os mercados de produção mais atraentes para o hidrogênio verde são aqueles que contam com recursos renováveis e de baixo custo. Em regiões do Oriente Médio, África, Rússia, Estados Unidos e Austrália, o hidrogênio verde pode ser produzido por €3/kg a €5/kg enquanto na Europa os custos de produção variam de €3 a €8/kg. Além disso, o hidrogênio verde tornou-se viável devido à crescente queda nos custos de energia renovável e à integração de sistemas de energia. Alguns estudos, por exemplo, já demonstraram a viabilidade de um custo nivelado de produção de hidrogênio através de um sistema híbrido renovável (Macedo e Peyerl, 2021).

Atualmente, os custos de produção do hidrogênio eletrolítico de €3.7/kg de hidrogênio, estão ao alcance e é provável uma redução para €2/kg de hidrogênio em 2040, aproximando-se assim, da paridade de custos do hidrogênio produzido a partir de gás natural, mesmo quando se aplicam preços “históricos” do gás natural (Terlouw *et al.*, 2022). A Figura 2.10 apresenta as projeções de custo para projeto de grande escala.

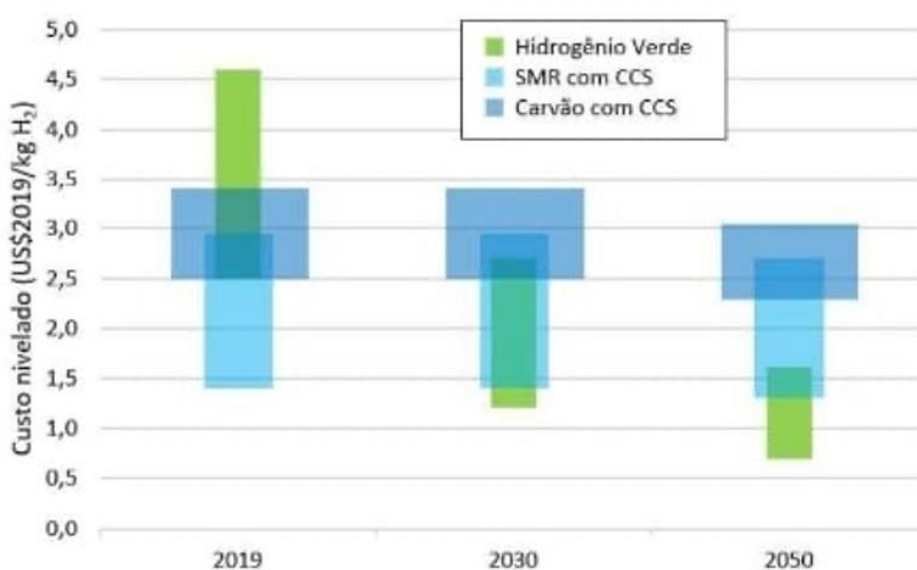


Figura 2.10 - Projeções das faixas de custo nivelado para projetos de grande escala

Fonte: EPE (2021)

De acordo com a IEA, o valor do hidrogênio cinza é de US\$1/kg, o hidrogênio azul, em média, US\$2,3/kg e o hidrogênio verde entre US\$3 e US\$8/kg, vai influenciar a fonte de energia utilizada e a região do mundo onde é produzida. A IRENA espera que ao aumentar a oferta de energias renováveis, até 2030 o custo do hidrogênio verde poderá acompanhar o do hidrogênio azul, e na próxima década o custo do hidrogênio verde pode chegar perto do valor do hidrogênio cinza (Zaparolli, 2022 atualizado 2023).

A Fundação Getúlio Vargas (2023) expressa que o Brasil tem potencial para produzir o H₂V mais barato do mundo, produzido por eletrólise, podendo atingir o valor entre US\$0,84 a US\$1,31/kg até 2030, segundo dados da *Bloomberg New Energy Finance*, devido à disponibilidade de energia eólica com melhor preço das Américas e sua posição estratégica da região Nordeste, como canal de exportação para a Europa.

2.4.1 Custos adicionais

Segundo Terlouw *et al.* (2022), melhorias materiais e tecnológicas (maior eficiência do material e sistemas novos e alternativos) em eletrolisadores PEM, podem reduzir os problemas de disponibilidade de itens associados ao aumento da produção de hidrogênio.

Os autores afirmam que alguns materiais (especialmente o irídio) e a disponibilidade de terreno pode ser um fator limitante ao aumento progressivo de produção de H₂V com eletrolisadores de membrana eletrolítica (PEM). Isso implica em que os tomadores de decisão devem considerar aspectos, além dos custos e emissões de gases de GEE, ao projetar sistemas de produção de hidrogênio em larga escala para evitar riscos decorrentes do fornecimento de materiais escassos, por exemplo.

3. METODOLOGIA



Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia

Fonte: Autor (2024)

Este estudo foi conduzido de forma a pesquisar a produção e aplicação do hidrogênio, com destaque para a eletrólise da água. O plano metodológico se desenrola da seguinte maneira: primeiramente, o estudo apresenta uma introdução que estabelece o cenário e a importância da transição energética, delineando os propósitos da pesquisa. Assim, é importante quantificar o consumo de água em cada processo produtivo de energia, desde a etapa da preparação eletroquímica até a produção final de hidrogênio. Como estudo de caso, são apresentadas as características da planta de eletrólise do Centro de Hidrogênio Verde (CH2V), da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), instalada recentemente na área de expansão da UNIFEI no Parque Científico e Tecnológico de Itajubá. A pesquisa se concentra em identificar os fatores que afetam a quantidade de água consumida (PCTI), bem como as possíveis estratégias de otimização para reduzir o consumo, sem comprometer a eficiência e qualidade na produção do hidrogênio.

São abordados os pontos a seguir:

- Análise do processo eletrolítico, onde são apresentados os processos utilizados nas plantas de produção de hidrogênio verde, destacando as reações eletroquímicas envolvidas, as condições operacionais e os principais equipamentos utilizados;
- Avaliação do consumo de água, em que é apresentado o consumo de água ao longo das diferentes etapas do processo, desde a alimentação dos eletrólitos até a coleta do hidrogênio. Identificar as possíveis fontes passíveis de serem utilizadas no processo;
- Impacto ambiental. Avaliar o impacto ambiental do consumo de água em plantas de eletrólise, considerando aspectos como escassez de recursos hídricos e potenciais efeitos na biodiversidade local;
- Estratégias de otimização. Propor e apresentar possíveis estratégias de otimização para reduzir o consumo de água no processo de produção de hidrogênio verde, incluindo a reciclagem de água, o uso de sistemas de recuperação e incorporação de melhorias mais nas tecnologias existentes;
- Contribuição para a sustentabilidade. Analisar o papel do hidrogênio verde como um vetor energético sustentável e seu impacto na redução das emissões de GEE. Avaliar como a otimização do consumo de água pode contribuir, para tornar a produção de hidrogênio verde ainda mais ambientalmente amigável.

O estudo está focado no consumo de água na produção de hidrogênio por meio da eletrólise. Antes, são descritos alguns conceitos e dados sobre tópicos diretamente relacionados.

A pesquisa começa com uma revisão abrangente da literatura para compreender o processo de obtenção do hidrogênio e a eficiência de diferentes tipos de eletrolisadores. A quantificação da água usada em cada etapa dos processos eletrolíticos é apresentada por meio de uma pesquisa detalhada.

Uma análise abrangente da literatura existente foi realizada, a fim de dar ênfase à transição energética, examinando a evolução para fontes de energia mais limpas. Além disso, a eletrólise da água é minuciosamente abordada, com exploração das suas várias abordagens e estágios; o papel do hidrogênio na Transição Energética: uma pesquisa profunda é conduzida sobre o papel do hidrogênio como agente de transição energética, tanto em âmbito global, quanto local; tecnologias de eletrólise: diversas técnicas de eletrólise serão avaliadas, para compreender suas características, vantagens e desvantagens; consumo de água e energia na eletrólise: o estudo procura quantificar o uso de água e energia durante o processo de eletrólise, permitindo uma compreensão mais precisa da eficiência envolvida; sustentabilidade na produção: os aspectos de sustentabilidade ligados à produção de hidrogênio serão pesquisados,

abrangendo implicações ambientais, sociais e econômicas. No estudo, é justificado porquê a eletrólise de membrana de troca de prótons (PEM) é escolhida no contexto brasileiro. Além disso, é quantificada a quantidade e avaliada a qualidade da água no processo PEM.

A etapa de resultados preliminares apresenta análises iniciais derivadas da metodologia adotada, exibindo dados relacionados ao descarte de água gerado, parâmetros de qualidade da água, eficiência dos sistemas de eletrólise, custos de produção de hidrogênio e suas ramificações. Uma breve análise econômica considerando custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) relacionados ao consumo de água é conduzida. A viabilidade técnica, econômica e ambiental das estratégias de otimização é avaliada.

A seção de conclusões resume os resultados obtidos em relação aos objetivos do estudo, relacionando-os com a literatura revisada e delineando possíveis trajetórias futuras para pesquisas e implementações. A metodologia proposta oferece um roteiro para abordar a produção de hidrogênio através da eletrólise da água, contribuindo para uma análise fundamentada dos aspectos relacionados à transição energética, eficiência, custos e sustentabilidade. Uma abordagem sistemática para analisar o consumo de água no processo de eletrólise para produção de hidrogênio verde. O objetivo central é entender a quantidade de água usada em cada etapa, da preparação eletroquímica à produção final de hidrogênio, e propor estratégias de otimização. Ao final, os resultados da pesquisa contribuirão para entender como otimizar o consumo de água na produção de hidrogênio verde por eletrólise, considerando sua sustentabilidade e impacto na transição energética.

4. RESULTADOS

Com o objetivo de determinar a relevância do tema do estudo, foi realizada uma pesquisa bibliométrica na plataforma SCOPUS, a seguir são apresentados os resultados e observações por meio da Tabela 4.1 abaixo e gráficos gerados no Bibliometrix, programa que fornece sumarização de dados. Os gráficos selecionados, nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 indicam os artigos globais mais citados nas duas *strings* (combinações) consultadas, a produção científica por país e os países mais citados. Por fim, a Figura 4.5 apresenta um *treemap* (mapa de árvore) com a relevância das palavras-chave.

Tabela 4.1 - *Strings* de busca.

Palavras-chave	Nº artigos	Observações
<i>Electrolysis AND hydrogen Production</i>	2.078	Resultados amplos, porém, alguns artigos se relacionam com o tema de interesse. Foram detectados autores referenciados.
<i>Water AND consumption AND hydrogen AND production</i>	1.526	Resultados amplos, foram detectados artigos no tema de interesse.

Fonte: Autor (2024)

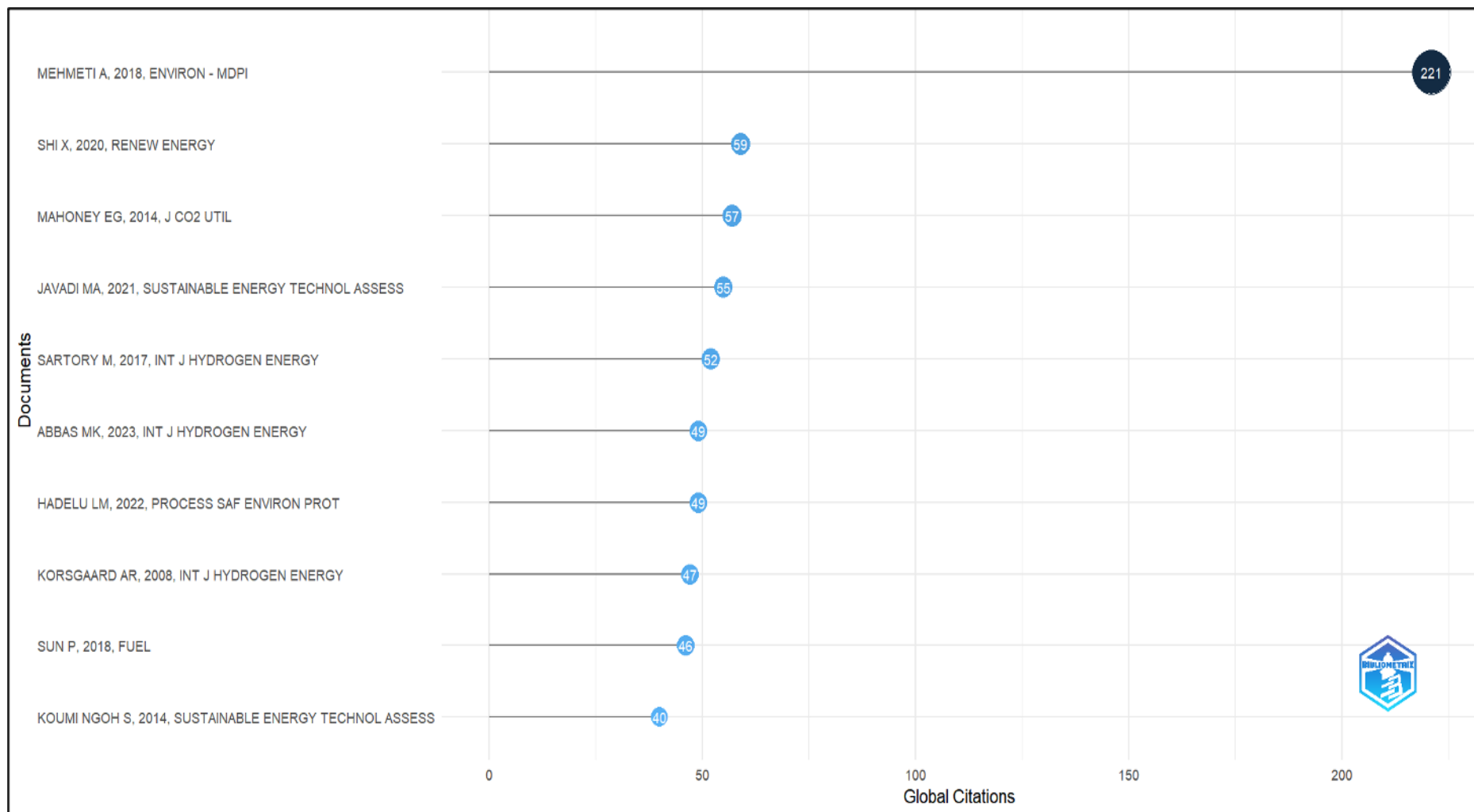


Figura 4.1 - Artigos globais mais citados (*electrolysis and hydrogen production*)

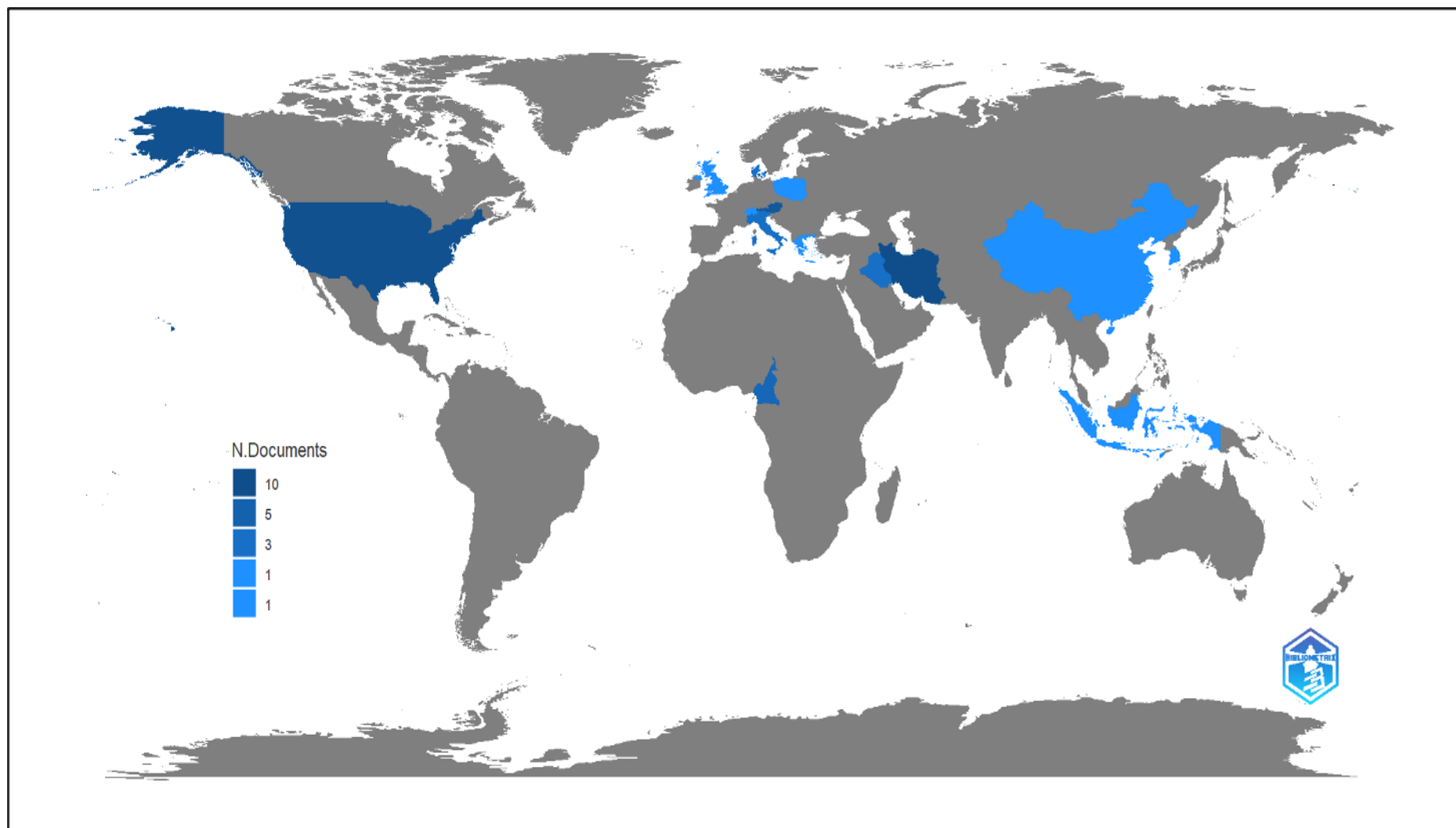


Figura 4.2 - Produção científica por país (*electrolysis and hydrogen production*)

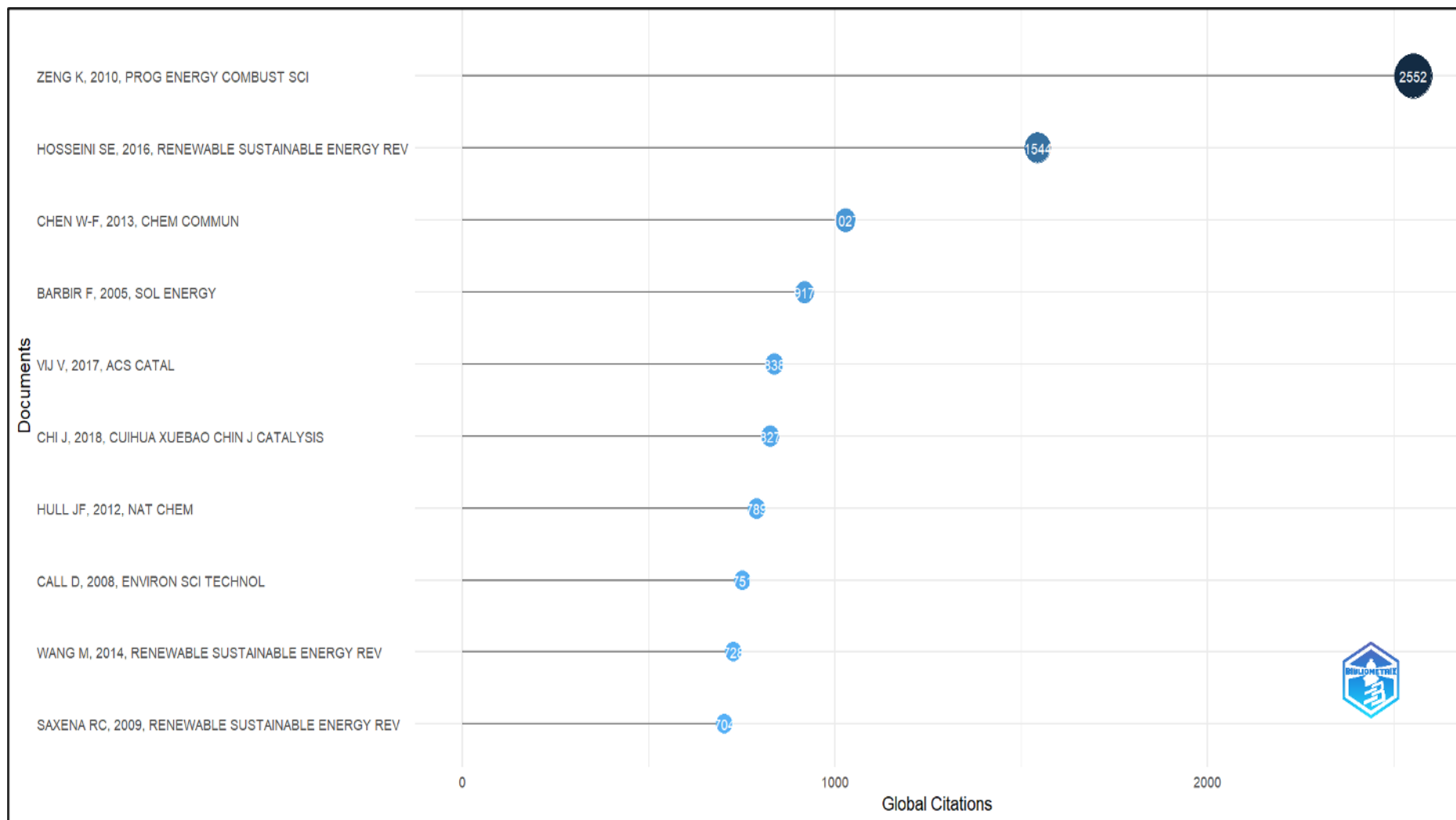


Figura 4.3 - Artigos globais mais citados (*water and consumption and hydrogen and production*)

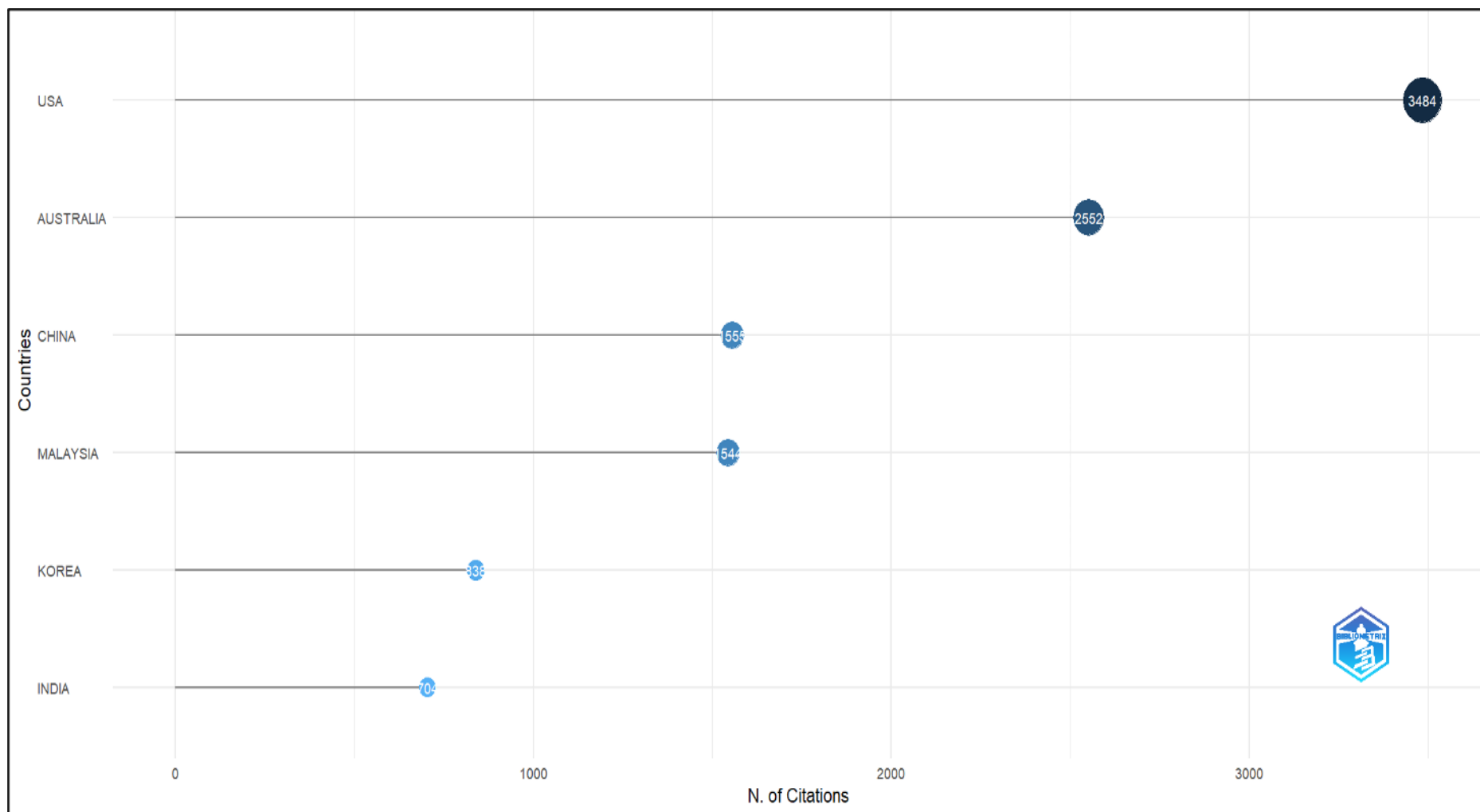


Figura 4.4 - Países mais citados (*water and consumption and hydrogen and production*)

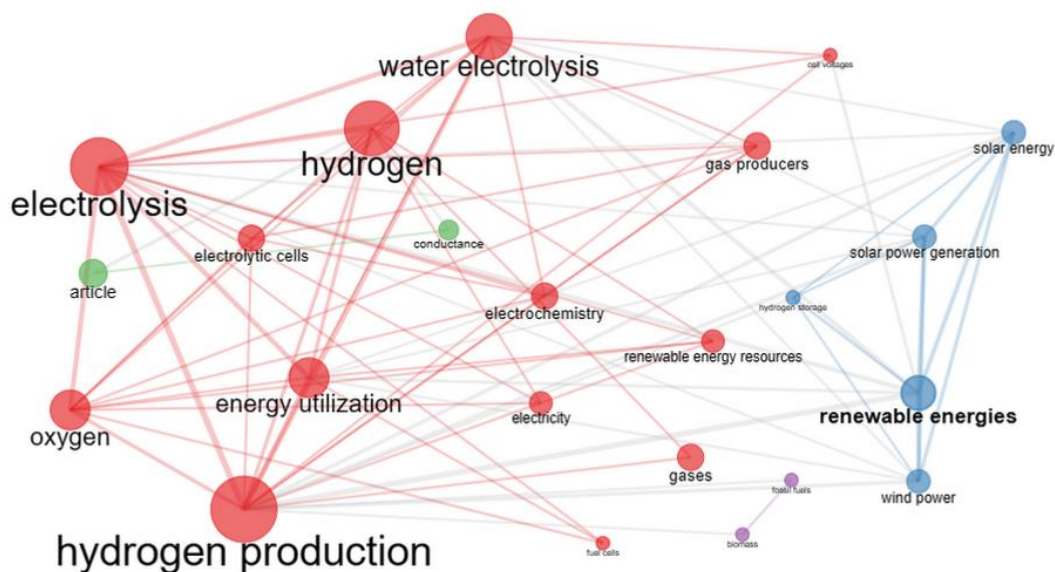


Figura 4.5 - Relevância de palavras-chave

4.1 Consumo de água na eletrólise

É fato que o mundo tem um problema de água – e o setor de energia deve lidar com isso. Aproximadamente um quarto da população não tem acesso a água potável para consumo e quase a metade não conta com infraestrutura de serviços sanitários apropriados. Aproximadamente dois terços da população mundial sofrem com escassez hídrica durante pelo menos um mês por ano, e as mudanças climáticas tornarão os fluxos de água mais inacessíveis. (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) - *The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water*).

Ao mesmo tempo, o sistema global de energia utilizou em torno de 370 bcm de água doce em 2021 ou aproximadamente, 10 % do total de retiradas globais de água doce. A água é essencial para quase todos os aspectos de fornecimento de energia, desde a geração de eletricidade até a produção de combustíveis fósseis e o cultivo de biocombustíveis.

De acordo com a IEA (2023), no cenário de zero emissões líquidas de GEE – em um enfoque mais ambicioso – as retiradas de água pelo setor de energia decaem em quase 20 bcm em 2030. As maiores diminuições ocorrem no setor de energia onde as retiradas se reduzem em quase 15 %, pois a geração de energia a carvão seria rapidamente substituída por energia solar e eólica. Uma eficiência energética mais significativa também desempenha um papel importante na redução do volume de água necessária para atender a demanda global de energia.

Diferentes caminhos em direção a um futuro com baixas emissões de GEE têm diversas implicações relacionadas ao uso da água. Algumas tecnologias de baixas emissões de GEE tais como biocombustíveis, energia solar concentrada, captura de carbono ou nuclear tem altas exigências de água. A água também é uma consideração importante para o hidrogênio.

A IEA estima que o fornecimento atual de hidrogênio consome aproximadamente 1.5 bcm de água doce, menos do 5 % do total consumido pelo setor de energia. No cenário de emissões líquidas de GEE nulas, um crescimento rápido na produção de hidrogênio dobra este número em aproximadamente 3 bcm em 2030 (em torno de 5 % do total). Enquanto o volume médio de água consumida por tonelada de hidrogênio produzido a partir de eletricidade se reduz em mais de 25 % devido ao crescimento da geração de energia solar e eólica. A produção de hidrogênio eletrolítico em regiões ricas em energia renovável, mas com escassez de água, requer uma avaliação cuidadosa, e, nesses locais, o uso de plantas de dessalinização pode ajudar a limitar o esgotamento de recursos de água doce (IEA, *World Energy Outlook*, 2023).

De acordo com Shi *et al.* (2019), a pegada hídrica na produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise é bem menor do que tem sido reportada na literatura e grande parte dessa água poderia ser consumida de forma indireta fora dos países produtores do hidrogênio. Em teoria, 1 normal metro cúbico (Nm^3) de hidrogênio consome diretamente 0.81 L de água na eletrólise da água, entretanto o consumo é normalmente 25 % maior na realidade (Shi *et al.*, 2019), por exemplo, 1 Nm^3 (0,09 kg) de hidrogênio demanda 1 L de água. Isto é, o consumo direto de água não é significativo, mas no que se refere ao consumo indireto de água na geração da energia e dos equipamentos utilizados para produção do hidrogênio pode ser até vinte vezes maior dependendo do fornecimento de energia elétrica. Vale ressaltar que não há estudos na literatura abordando a distribuição geográfica da pegada hídrica da produção de hidrogênio ao longo de toda a cadeia de fornecimento, pois é importante avaliar a perspectiva de ciclo de vida regional com o fim de estimar o impacto relacionado à água o qual pode variar significativamente para diferentes locais geográficos (Shi *et al.*, 2019).

Em termos gerais, o consumo de água tem aumentado mais do que o dobro da taxa de crescimento populacional nos últimos 100 anos, com cerca de 70 % sendo usado agora na agricultura, 19 % na indústria e 11 % na construção civil (ONU, 2018). Embora não haja escassez hídrica globalmente, a escassez de água doce ameaça a segurança alimentar e nutricional de cerca de 25 % da população mundial (UNICEF, 2019). A Figura 4.6 apresenta a retirada anual global e consumo de água por setor.

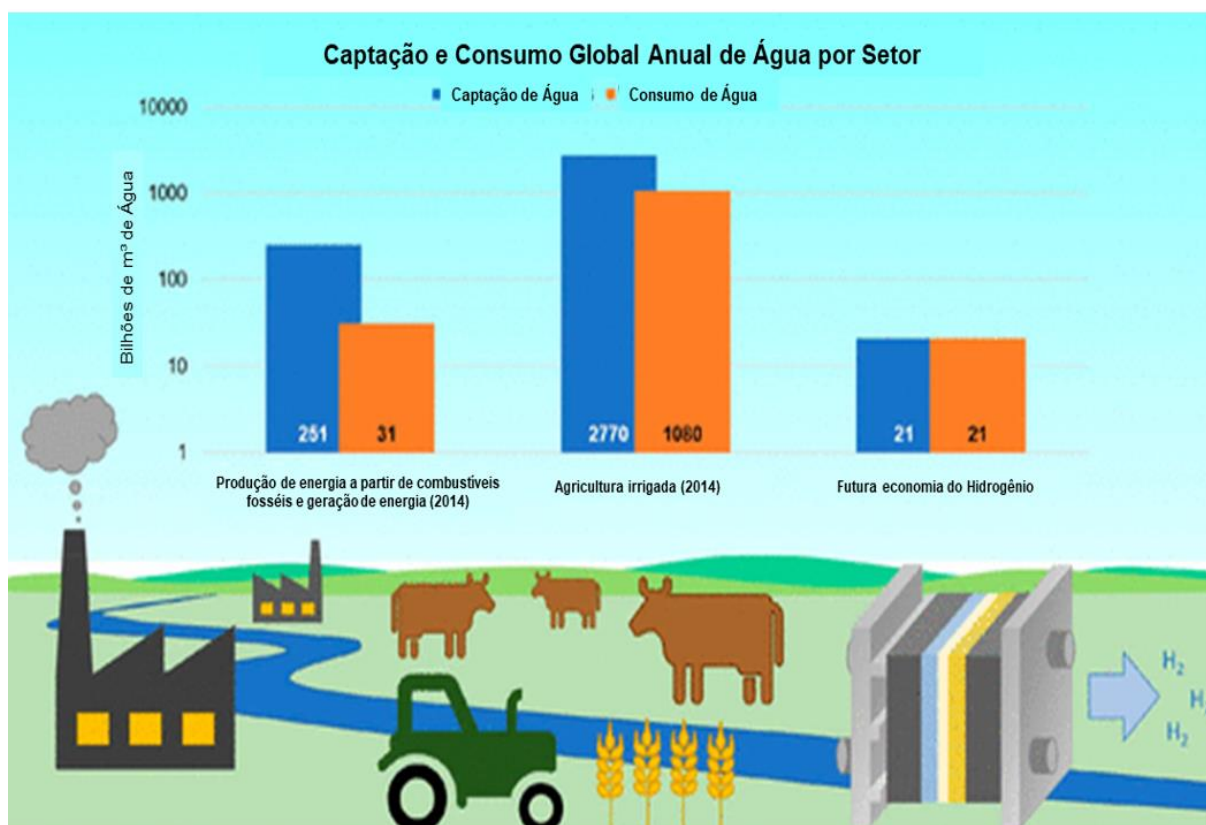


Figura 4.6 - Retiradas de água globais anuais e consumo por setor. Comparação da retirada global de água doce e o consumo de três setores diferentes: produção e geração de energia por combustíveis fósseis, agricultura e a implementação da economia global de hidrogênio

Fonte: Beswick (2021)

De acordo com Yue e Lambert (2021), a produção de 1 kg de hidrogênio por meio de um eletrolisador PEM requer 18 L de água e 54 kWh de eletricidade, na suposição de que toda a produção atual de hidrogênio, 70 toneladas métricas (TM) fosse produzida por meio da eletrólise da água, o consumo de água representaria 1.3 % do consumo de água do setor de energia global. Uma alternativa é a osmose reversa, abordada em tópico a seguir, sendo que a dessalinização da água de mar cujo custo de eletricidade nesse processo é de US\$0,7 a 2,5/m³, é considerada como tendo uma influência pequena no custo final do hidrogênio. A Tabela 4.2 mostra as estimativas de consumo de água para geração de hidrogênio.

Tabela 4.2 - Estimativas de consumo de água para geração de hidrogênio (gal/kg H₂)

Processo	Eletrólise	
	Central	Distribuída
Tratamento de água	3,9	3,9
Produção	2,9	2,9
Resfriamento	1,2	0
Total	8,0	6,8
Faixa ¹⁾ (Baixa-alta)	(2,9-10,7)	(2,9-8,5)

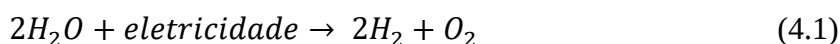
Fonte: Simon *et al.* (2010) *apud* Lampert *et al.*, (2015) Barros *et al.* (2023)

4.2 Definição do consumo de água

Segundo Lampert *et al.* (2015), a definição do consumo de água tem um impacto significativo em qualquer estimativa de ciclo de vida da quantidade de água consumida na produção seja de um combustível ou de um recurso.

A quantidade de água retirada pode diferir da quantidade de água consumida no processo produtivo. No caso das termelétricas, é consumido somente o 2 % da quantidade de água retirada, enquanto a diferença de 98 % é devolvida à fonte. A água retirada e não devolvida pode ser evaporada, incorporada nos produtos ou degradada a uma qualidade inferior para uso futuro.

Ainda de acordo a Lampert *et al.* (2015), na produção de quaisquer formas de energia se consome água. Assim, a fim de poder satisfazer a demanda que tende a aumentar, é preciso que o montante de água seja quantificado em cada um dos processos. Avaliar o consumo de água dependendo de cada tecnologia, permitiria identificar as áreas passíveis de aprimorar a conservação e minimizar o estresse hídrico nas regiões produtoras de energia. Os autores afirmam que há uma relação complexa entre a produção e o consumo de energia e água; a produção de energia consome água, assim como o tratamento e distribuição de água. Na produção de hidrogênio por via da eletrólise ocorre a reação da Equação 4.1.



Esta reação implica no consumo de 2.4 galões de água por kg de H_2 , sendo que a água utilizada no processo de eletrólise geralmente recebe um pré-tratamento para alcançar um alto nível de pureza. Além disso, para uma operação de eletrólise estável também é necessária água de resfriamento. Portanto, a eletrólise da água consome água como insumo de entrada do processo na reação de produção de hidrogênio, como rejeito no processo de pré-tratamento da água, e ainda no processo de resfriamento. Os autores esclarecem que o processo de produção de hidrogênio verde necessita de um pré-tratamento da água que vai gerar dois fluxos, um de alta qualidade (necessário para o processo) e outro de qualidade inferior que é rejeitado.

É possível calcular a quantidade de água pura necessária utilizando a composição atômica da H_2O . Visto que o O_2 é 16 vezes mais pesado que o H_2 , ele é responsável por 89 % da massa de água. Por exemplo, a produção de 100.000 toneladas de H_2V por ano consumirá 900.000 toneladas de água ultrapura (Madsen, 2022).

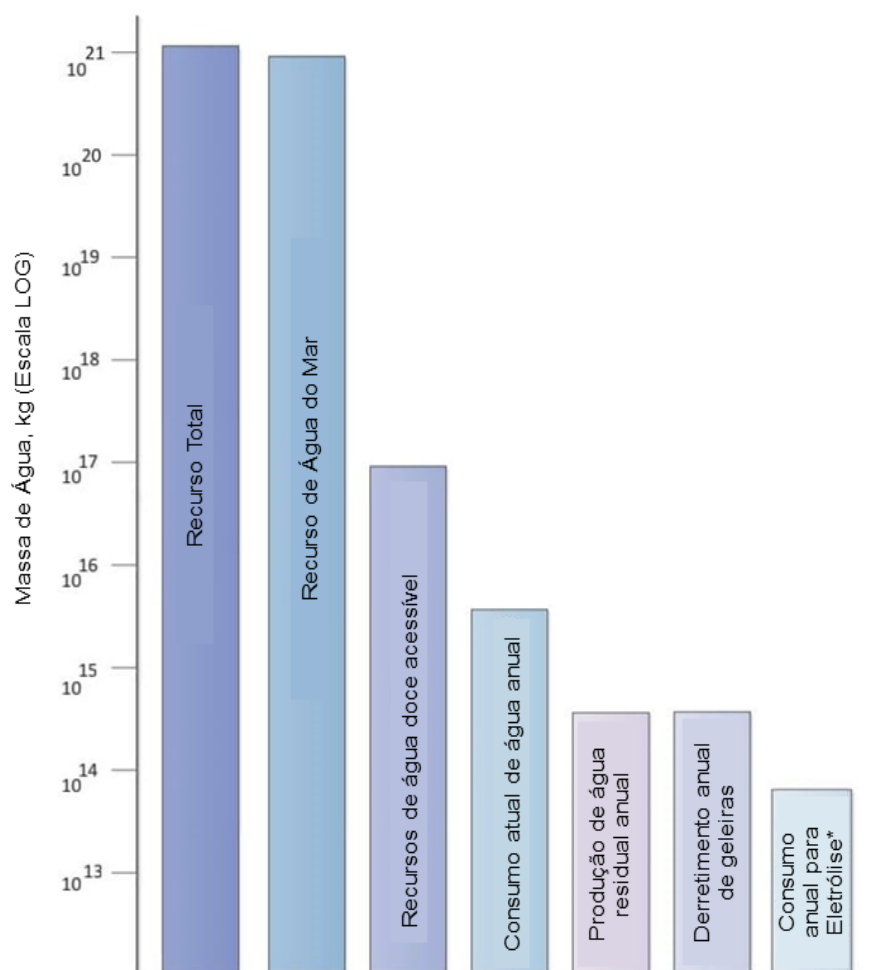
São necessários cerca de 9 L de água para produzir 1 kg de H_2V , gerando 8 kg de O_2 como um subproduto que, em menor escala, pode ser utilizado no setor de saúde ou em maior escala, para fins industriais. Entretanto, o acesso à água doce pode ser um problema em áreas

com escassez de água. Usar água de mar pode-se tornar uma alternativa em regiões costeiras. O uso de água de mar, leva a danos corrosivos e à produção de cloro; entretanto, estão sendo realizadas pesquisas com o objetivo de utilizar a água de mar na eletrólise (IPEA, *World Energy Outlook*, 2022). Experimentos realizados por William em 1975, mostraram que é possível a eletrólise direta por água de mar, mas a produção de cloro predomina sobre a do oxigênio no ânodo, ademais de alterações no cátodo produtor de hidrogênio, que geram precipitados insolúveis no cátodo e na água de mar circundante (Camargo, 2021).

Segundo Newborough (2021), a descarbonização poderá reduzir o consumo de água oxigenando corpos d'água hipóxicos, aumentando a eficiência do tratamento de águas residuais e o fornecimento de água potável em regiões áridas e otimizando o uso de água do mar. Contudo, é necessário formular a pergunta: “o mundo conta com água suficiente para satisfazer a demanda futura para produção do H₂V?” A massa total de água na terra é de cerca de $1,4 \times 10^{21}$ kg. Em torno de 2,5 % da água do planeta é doce, onde apenas $9,3 \times 10^{16}$ kg é classificado como água superficial acessível em lagos e rios. As geleiras e águas subterrâneas representam >99,7 % do recurso de água doce.

Na atualidade, se utilizam cerca de $4,6 \times 10^{15}$ kg de água por ano (Newborough, 2021) e estimativas indicam que são produzidos cerca de $3,6 \times 10^{14}$ kg de águas residuais por ano, as que precisam ser tratadas previamente a serem devolvidas aos rios, ou utilizadas para consumo humano. Vale destacar que atualmente, a perda anual do derretimento de glaciares causado pelo aquecimento global é de uma proporção similar, aproximadamente $3,4 \times 10^{14}$ kg.

Assim, água doce e águas residuais podem permitir a produção de H₂V, entretanto em regiões áridas e em parques eólicos/solares *offshore*, o eletrolisador precisará de água do mar dessalinizada. Considerando que os recursos de água de mar na Terra são aproximadamente, 39 vezes maiores do que os recursos de água doce, juntas, essas quantidades suportam os recursos hídricos disponíveis para atender ao uso já estabelecido e a nova futura demanda associada à produção de H₂V (Newborough, 2021). A Figura 4.7 apresenta a demanda anual de água para a produção de H₂V, em relação aos recursos hídricos da terra.



*Supondo que todo o consumo existente de combustíveis fósseis seja substituído por hidrogênio verde (162 TWh)

Figura 4.7 - Demanda anual de água para produção de H₂V em relação aos recursos hídricos da Terra.

Fonte: Newborough (2021)

Shi *et al.* (2020) apresentaram uma estimativa do potencial de consumo de água e pegada de escassez de água em 17 vias de produção de hidrogênio por meio do uso do método de avaliação de impacto *Life Cycle Assessment* (LCA) ReCiPe 2016, e verificaram uma faixa significativa de consumo de água para 1 kg de hidrogênio produzido por meio da eletrólise, desde 8,8 m³ quando é utilizada a energia eólica e de 223 m³ quando é utilizada a energia elétrica da rede. Conforme Barros *et al.* (2023), em outro estudo de LCA, o consumo de água da energia solar fotovoltaica para o H₂ pode variar entre 22 e 126 L por kg H₂.

Em relação a outras projeções para a demanda de água na produção de hidrogênio, os requisitos de água doce se mostram bastante baixos, com base na suposição de que o hidrogênio produzido no futuro será a partir de fontes renováveis de energia como eólica e solar, cuja geração tem pouco ou nenhum consumo de água. Já na produção de energia primária e geração

de energia a partir de combustíveis fósseis, a necessidade de água é bastante significativa. Em 2014, foram retirados 251 bcm de água doce para geração e produção de energia a partir de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, e foram consumidos 31 bcm de água para refrigeração, mineração, fraturamento hidráulico² (*fracking*) e refino. (IEA, 2023).

Se for feita uma comparação, se forem consumidos 20,5 bcm de água para a produção de hidrogênio por eletrólise ainda representa 33 % menos do que o uso atual relacionado à energia dos combustíveis fósseis. Ainda, a eletrólise tornará obsoleta as fontes de energia dos combustíveis fósseis, pois o setor de energia irá se direcionar às tecnologias renováveis o que se traduziria numa economia de 10 bcm de água doce. Por este motivo, é evidente que o uso de hidrogênio como método para alcançar uma sociedade de energia renovável terá como resultado uma significativa economia de água (Beswick *et al.*, 2021).

4.3 Qualidade da água

Em relação à qualidade da água necessária para produção de H₂V, Madsen (2022) distingue três tipos: água ultrapura (matéria prima para o eletrolisador); água de resfriamento; e água bruta.

São diversos os parâmetros que influem na qualidade da água necessária à eletrólise: tipo de eletrolisador, material dos eletrodos, projeto do sistema e também o fabricante do eletrolisador. Vale ressaltar que cada íon e molécula na água afeta o eletrolisador, pois alguns podem aumentar o OPEX devido à corrosão ou aumentar a necessidade de limpeza, enquanto outros podem reduzir a eficiência ou danificar o eletrolisador de forma irreversível. Por estes motivos é necessário que o sistema de pré tratamento de água seja sob medida para cada projeto específico, o que torna difícil a padronização de qualidade da água para todos os eletrolisadores.

Segundo Barros *et al.* (2023), no que se refere à produção do H₂V em escala industrial será necessária uma quantidade de água doce considerável, a partir, por exemplo, da divisão de água alcalina. Por outro lado, a água da rede pública é considerada a fonte mais apropriada para a eletrólise devido ao menor risco de abastecimento, custos menores e ausência de processos complexos de licenciamento. Quanto à água do mar e o efluente da estação de tratamento de águas residuais (ETAR) os mesmos demonstraram ser possíveis fontes de água, onde os fatores que mais afetam as respectivas adequações ao processo de produção de H₂V são os custos de transporte de água e o descarte de resíduos do tratamento de água.

² O faturamento hidráulico é o processo que viabilizou a exploração de gás não convencional mediante injeção de água e elevadas pressões contendo elementos químicos e propantes. (Riccomini *et al.*, 2021).

Conforme mencionado anteriormente, a água que será utilizada no processo de eletrólise é pré tratada para alcançar um elevado nível de pureza, com baixa concentração de sólidos dissolvidos. Estes autores analisaram a produção do gás hidrogênio a partir de águas residuais e de baixo teor usando separação de água alcalina (AWE) (Barros *et al.*, 2023).

No que se refere às tecnologias utilizadas para o pré-tratamento de água com a qualidade almejada, as duas principais são a osmose reversa e a troca iônica. O processo de osmose reversa consiste na aplicação de alta pressão ao afluente, em que uma membrana impede a passagem de moléculas dissolvidas. Parte da água, de qualidade inferior e considerada como consumida, é rejeitada para manutenção das concentrações constantes das impurezas no reator. Segundo os autores, a taxa de rejeição de água no tratamento de água por osmose reversa foi assumida como 25 % para eletrólise central e eletrólise distribuída, o que resulta em fatores de consumo de água de tratamento respectivamente em 3,9 e 3,9 gal/kg H₂ para esses dois processos. A osmose reversa possibilita a remoção de moléculas muito pequenas de poluentes de uma solução, em especial em relação a íons monovalentes. Remove bactérias, sais, açúcares, proteínas, corantes e micro poluentes, sendo que o limite de peso molecular da membrana osmose reversa é inferior a 200 Da. A pressão aplicada varia entre 3,4 bar e 100 bar (Barros *et al.*, 2023).

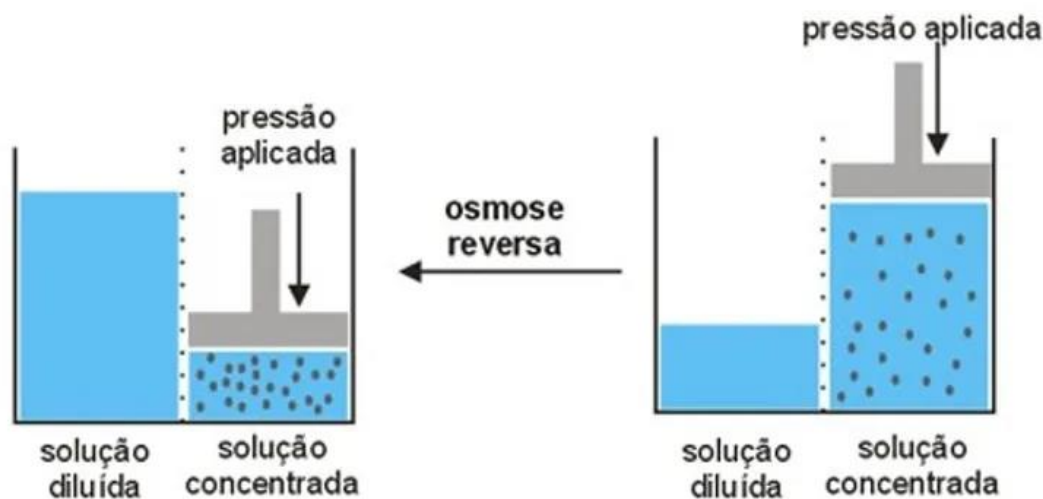


Figura 4.8 - Osmose reversa

Fonte: Lomazzi (2022)

Assim, a água rejeitada após o pré-tratamento de osmose reversa é consumida, embora ainda não esteja claro se essa água poderia ou não ser devolvida às instalações municipais ou recursos hídricos superficiais. Vale ressaltar que a salinidade da água afeta a taxa de rejeição e o potencial de descarga.

No que respeita à troca iônica, a mesma usa resinas para trocar de forma seletiva, íons dissolvidos em uma solução com prótons (troca catiônica) ou íons de hidróxido (troca aniônica).

Os prótons e os íons de hidróxido são neutralizados, o que terá como resultado água de elevadíssima pureza. Vale ressaltar que a resina de troca iônica deve ser regenerada de forma periódica, com o uso de ácidos e bases concentrados e que a tecnologia de troca iônica consome quantidades diminutas de água (Barros *et al.*, 2023).

Segundo Newborough (2021), a taxa de consumo de água para a eletrólise é de 9kg H₂O/1kg H₂, que pode ser expressa em 0,27t/MWh (LHV). No entanto, independentemente da fonte, a entrada de água na pilha de eletrolisador deve primeiro ser limpa e deionizada. O processo desde purificação por osmose reversa é usado comumente antes da deionização, para garantir que o eletrolisador receba água com condutividade elétrica suficientemente baixa. Uma parte da água retirada para abastecimento é, portanto, rejeitada. Para água doce, a taxa de retirada necessária varia de cerca de 0,3t/MWh para água de entrada muito limpa a aproximadamente 1,5t/MWh para água de rio. Atualmente, um valor típico para um eletrolisador PEM disponível comercialmente conectado à rede de abastecimento de água é de 0,51t/MWh (17kg/kg H₂).

4.4 Alternativas da água

Conforme expressado anteriormente, a qualidade da água é essencial no processo da eletrólise, pois as impurezas podem prejudicar o eletrolisador, na superfície dos eletrodos e/ou na membrana. Em geral, a água necessária é a desmineralizada, do tipo I ou II (Sociedade Americana para Testes e Materiais - ASTM). Vale ressaltar que a maioria dos eletrolisadores disponíveis no mercado inclui o processo de remoção de íons, realizando, dessa forma, o tratamento da água.

Há diversas fontes de água disponíveis na natureza que podem ser utilizadas: superficial, subterrânea, de rede pública de abastecimento, residuais industriais e urbanas e de mar (Simões *et al.*, 2021).

A água doce acessível representa pouco menos de 1 % da água do planeta (Beswick *et al.*, 2021) e deve-se evitar a criação de qualquer carga adicional sobre o uso de água doce, especialmente em áreas onde a água potável é difícil de obter. No entanto, quase todos os 90 % restantes, ou cerca de 1,4 bilhões de km³, é a água de mar, que pode ser purificada através de processos de dessalinização antes de ser usada como matéria prima da eletrólise.

A principal tecnologia de dessalinização hoje é a osmose reversa (RO) que usa uma pressão aplicada e uma membrana semipermeável para rejeitar os íons presentes na água, consumindo menos energia do que outros métodos de dessalinização, como a destilação. Cabe

ressaltar que parte da água que alimenta o processo de RO não pode ser utilizada, e a recuperação define a porcentagem de água limpa utilizável que é produzida pelo processo, fora da quantidade total da água de alimentação. A produção de H₂V consumirá 1,5 ppm da água doce da Terra ou 30 ppb de água do mar por ano, uma quantidade menor da que é atualmente consumido por energia baseada em combustíveis fósseis e geração de energia (Beswick *et al.*, 2021).

A eletrólise com água de mar se traduziria numa perda de eficiência energética, uma vez que a corrosão da água de mar reduziria a vida útil do equipamento, razão pela qual os sistemas vão exigir manutenção. Na atualidade, os catalisadores e membranas para eletrolisadores não oferecem tolerância às impurezas presentes no eletrólito (Dresp e Dionigi *et al.*, 2019 *apud* Camargo, 2021). Assim, o desafio é desenvolver dispositivos mais resistentes às impurezas (Dresp e Dionigi *et al.*, 2019; Yu, Zhu *et al.*, 2019 *apud* Camargo, 2021).

Em relação à utilização de águas residuais como matéria prima para produzir H₂V por meio da eletrólise, de acordo com Newborough (2021), o uso do oxigênio bem como do hidrogênio melhora a viabilidade comercial da eletrólise, a partir do momento que existe uma demanda garantida de oxigênio, alguns dos custos de produção de hidrogênio podem ser compensados. Segundo os autores, a indústria da água está particularmente bem posicionada explorar isso, pois tem margem para:

- Fornecer a água necessária para a eletrólise; processar o fluxo de água rejeitado pelo sistema do eletrolisador;
- Utilizar H₂V para tratamento de águas residuais a fim de melhorar a eficiência do processo;
- Recuperar calor do eletrolisador a fim de melhorar a eficiência do processo;
- Usar fontes de energia renovável ou proveniente de resíduos no local para fornecer eletricidade; e
- Exportar H₂V.

O tratamento de águas residuais resulta na emissão de três gases responsáveis pelo aquecimento global (óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e CO₂) (Campos *et al.*, 2016 *apud* Newborough e Cooley, 2021). O tratamento das águas residuais é fundamental para garantir a produção de água de qualidade suficiente antes de devolvê-la aos rios e oceanos ou para uso como água potável. A áreação do lodo ativado para o tratamento de esgoto é a parte mais crítica do processo de tratamento de efluentes, com uso intensivo de energia, onde micro-organismos e oxigênio agem em conjunto para quebrar a matéria orgânica. Visto que as estações de tratamento de águas residuais tendem a ser instaladas relativamente perto das cidades, surgem

inúmeras possibilidades para criar centros de hidrogênio descentralizados e impulsionar a implantação de eletrolisadores (Newborough, 2021).

4.5 Reciclagem e reutilização

A *International Water Association* (AWA) afirma que as tecnologias de dessalinização são uma das três soluções para a escassez de água, pois essas tecnologias provaram seu valor, e cada vez mais usam muito menos energia. Usinas de dessalinização foram construídas principalmente em áreas onde há escassez ou ausência de água potável, contando com o uso de fontes de energia disponíveis ao menor custo possível. Os principais países produtores de água dessalinizada que possuem mais de 5 milhões de m³/dia de capacidade instalada de dessalinização são: Reino da Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos, Estados Unidos, Espanha e República Popular da China (Valdes *et al.*, 2021).

De acordo com Valdes *et al.*, (2021), a água para consumo humano pode ser obtida da água do mar ou salobra através do processo de dessalinização. Dentre as principais tecnologias, a osmose reversa domina o mercado global de dessalinização devido à sua sistemática diminuição no consumo de energia de 20kWh/ m³ de água purificada nos anos 70 a 2.5kWh/m³ nos dias de hoje. Entretanto, diversos estudos indicaram que o principal impacto negativo deste processo é a geração de salmoura (*reverse osmose concentrate-ROC*) como subproduto.

4.6 Impacto Ambiental

O H₂V com frequência apresenta impactos de mudanças climáticas mais baixos se comparado com hidrogênio azul e é insensível a emissões de fuga de metano e incertezas associadas. O H₂V, portanto, parece ser a melhor opção economicamente viável (Terlouw *et al.*, 2022).

A qualidade da água pode ser outra importante preocupação ambiental, por exemplo, quando uma quantidade significativa de salmoura - um resíduo altamente salino coproduzido e gerado a partir da dessalinização -, é descarregada no ambiente marinho. No que diz respeito ao consumo da água, a implantação da produção de hidrogênio em larga escala em combinação com a demanda adicional inesperada de água devido a diversas razões, tais como: mudanças climáticas, aumento populacional, desenvolvimento econômico e intensificação agrícola, podem resultar em escassez hídrica, o que já ocorre em Creta (Grécia) e Tenerife (Espanha). Essas avaliações devem ser objeto de trabalhos futuros em nível regional (Terlouw *et al.*, 2022).

A Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) é a ferramenta que visa contribuir na tomada de decisão industrial rumo à gestão sustentável de recursos (Li *et al.*, 2020 *apud* Oliveira L., 2021).

Segundo Oliveira L. (2021), o ciclo de vida da produção de hidrogênio compreende do início ao final da cadeia de valor, isto é, a partir da captação da matéria prima ao uso final. Abrange a análise de todos os processos envolvidos (extração produção, transporte, distribuição, armazenamento, utilização e reutilização). Vale ressaltar que os métodos de avaliação do ciclo de vida evoluem de forma rápida a fim de detalhar os diversos impactos ambientais envolvidos.

Conforme mencionado anteriormente, as duas formas de pré tratamento da água antes de iniciar o processo de produção de H_2 através da eletrólise são: osmose reversa e a troca iônica. De acordo com Lampert *et al.* (2015) na osmose reversa, uma parcela da água é rejeitada para manutenção das concentrações constantes das impurezas no reator.

O ROC (*reverse osmose concentrate*) é uma salmoura que causa diversos impactos ao meio ambiente, associados com a descarga em corpos hídricos receptores. Na literatura o efluente ROC também é conhecido como rejeito, uma vez que o principal objetivo do processo de dessalinização é obter água apta para o consumo humano. Salienta-se que existe um crescente interesse em pesquisar o potencial de reuso do ROC (Valdes *et al.*, 2021).

O rejeito ROC é descarregado em corpos hídricos naturais com ou sem diluição, dependendo das regulamentações governamentais locais vigentes e seu nível de restrição correspondente com o fim de evitar a degradação dos ecossistemas aquáticos marinhos, bem como do meio ambiente. Assim, diversos estudos avaliaram os impactos ambientais do mencionado rejeito. Foram comparados o impacto ambiental da água dessalinizada e da água reciclada e verificou-se que a descarga de salmoura pode causar diferentes problemas ao meio ambiente, por exemplo, a destruição de grandes áreas no fundo do mar e severos impactos no ambiente regional (Valdes *et al.*, 2021).

As causas principais do impacto ambiental do ROC encontrados pelos autores Valdés *et al.* (2021), a salinidade de descarga da planta, temperatura, pH, produtos químicos e metais pesados, onde é realizada a descarga do rejeito pela planta tem um impacto ambiental crítico, uma vez que tem contato direto com o ambiente marinho. Os principais impactos ambientais associados com descargas são a formação de biofilme, alterações na batimetria do fundo do mar, alterações nos padrões de circulação da água, alterações no habitat local e alterações nos padrões de transporte de sedimentos (Valdes *et al.*, 2021).

4.7 Estudo de caso : planta CH2V UNIFEI

Em outubro de 2021, a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) foi selecionada pela *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*, Agência Alemã de

Cooperação Internacional, para receber um recurso de €5 milhões destinado à construção do Centro de Hidrogênio Verde (CH2V), formado por um centro de aplicação e estudos com área de 800 m² e uma planta industrial de produção de H₂V. O laboratório de aplicação está destinado à pesquisa, desenvolvimento e disseminação de informação sobre a o H₂V, assim como à capacitação profissional. A planta industrial irá produzir o hidrogênio pelo processo de eletrólise da água e uso de energia renovável solar.

A implementação do CH2V da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), faz parte do Projeto H2 Brasil, que integra a Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, conduzido pela *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH* e o Ministério de Minas e Energia (MME), e conta com o apoio do Ministério Federal da Cooperação Econômica e do Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha. O CH2V é a maior parceria dentro do Projeto H2 Brasil e a maior dentro de uma universidade na América Latina (H₂ Brasil).

A unidade de produção de H₂V se compõe de um eletrolisador do tipo PEM (membrana de troca de prótons), fabricado pela empresa alemã Neuman & Esser, que foi instalado numa área de expansão do campus, integrada ao Parque Científico e Tecnológico de Itajubá. A Figura 4.9 apresenta a planta de eletrólise do CH2V da UNIFEI. Na Tabela 4.3 são apresentados os dados técnicos da planta mencionada.

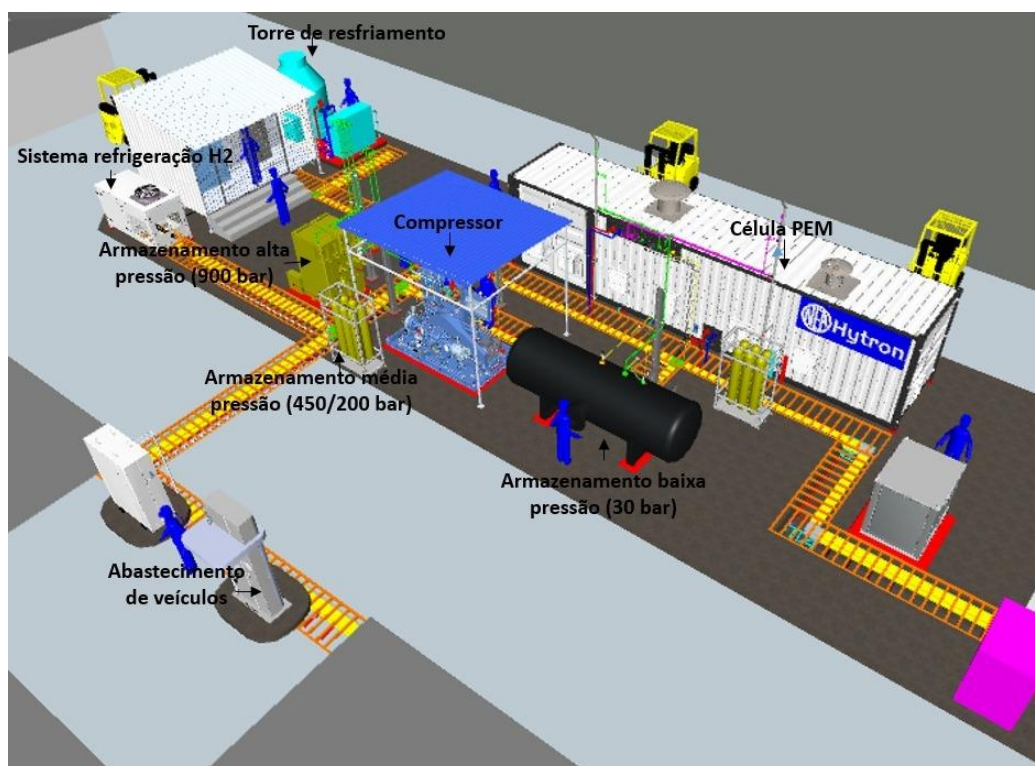


Figura 4.9 - Planta de eletrólise do CH2V/UNIFEI

Fonte: Adaptado da empresa Neuman & Esser (2024)

Tabela 4.3 - Dados técnicos da planta de produção e abastecimento de hidrogênio CH2V/UNIFEI

Eletrolisador	PEM
Fabricante	Neuman & Esser (NEA Group-Alemanha)
Potência	300 kW
Vazão	50 Nm ³
Pureza do H ₂	99,999 % @30 bar (g)
Pressão de abastecimento veicular	700 bar (g) – H70
Temperatura de abastecimento ao início	– 40° C
Armazenamento de hidrogênio	40 kg @ 900 bar (g)
Fonte de alimentação H ₂ O	Poço artesiano existente

Fonte: Dados da empresa Neuman & Esser (2024)

Componentes da planta de eletrólise

O sistema de eletrólise de H₂ está montado num container de 40' e é dividido em módulos: sistema de retificação, módulo de produção de água, módulo de eletrólise, módulo de purificação do H₂ e módulo de gerenciamento térmico.

O módulo de produção de água é composto de bomba centrífuga e sistema de osmose reversa, sendo seu consumo de água de 5 L/min (300 L/hora). O mencionado módulo de produção de água inicialmente utilizará água de um poço artesiano já existente no local e futuramente, poderá utilizar água fornecida pela Companhia de Água e Saneamento de Minas Gerais-COPASA ou de um novo poço artesiano.

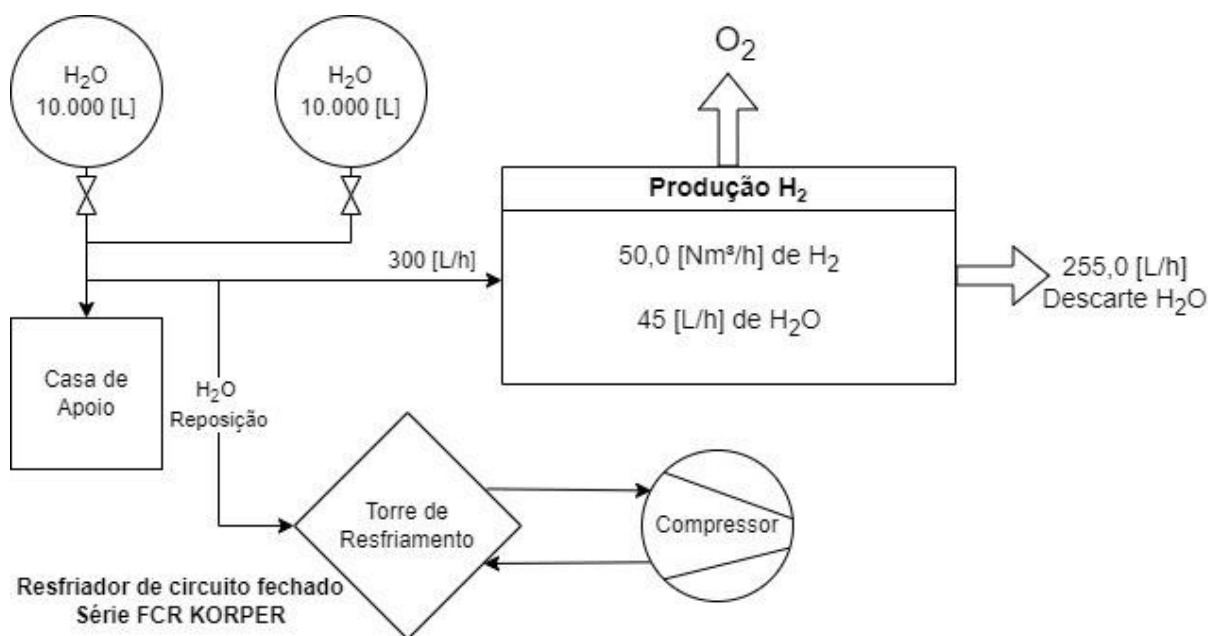
O módulo de gerenciamento térmico é responsável por manter a temperatura nos “stacks” em no máximo, 65°C. Vale destacar que aproximadamente 99,75 % da água que circula nos “stacks” tem a função de gerenciamento térmico, e 0,25 % da água ingressante ao “stack” é utilizada no processo da eletrólise. A vazão de água total nos “stacks” é de 126,7 L/min (Neuman & Esser, 2024).

Devido às condições atuais de disponibilidade de água, a produção na planta do CH2V poderá chegar a 50 L/hora de hidrogênio. O restante dessa água é direcionado às torres de resfriamento, regenera a resina de troca iônica e resfria equipamentos (compressor, retificador do eletrolisador). A Tabela 4.4 apresenta o consumo de água no eletrolisador do CH2V/UNIFEI. A Figura 4.10 apresenta o percurso da água no eletrolisador do CH2V/UNIFEI.

Tabela 4.4 - Consumo de água eletrolisador PEM do CH₂V/UNIFEI

Descrição	Quantidade
Consumo de H ₂ O por kg de H ₂ produzido	10 L/kg H ₂
Vazão de H ₂	50 Nm ³ /h
Densidade normal do H ₂ (0°C e 1 ATM)	11,2 Nm ³ /kg
Vazão mássica do H ₂	4,46 kg/h
Vazão de H ₂ O (dissociada em H ₂ + O ₂)	44,64 L/h
Vazão de H ₂ O a ser dissociada (15 % eficiência osmose reversa)	0,74 L/min
H ₂ O bruta	5 L/min
Descarte	4,26 L/min

Fonte: Dados da empresa Neuman & Esser (2024)

Figura 4.10 - Fluxograma do balanço hídrico no eletrolisador PEM do CH₂V/UNIFEI

Fonte: Autor (2024)

4.8 Diretrizes para gestão da água aplicada nas plantas de produção de hidrogênio verde

De acordo com Woods (2023), o correto entendimento do uso dos recursos hídricos, bem como o desenvolvimento de abordagens efetivas para a gestão desses recursos, é essencial para alcançar o equilíbrio do desenvolvimento econômico com o meio ambiente e a aceitação da sociedade. A economia do hidrogênio produzido via eletrólise deve prever uma regulação clara sobre o papel da indústria da água: alterar políticas públicas que afetam a segurança energética e hídrica e incentivar estratégias para adaptar e dissociar a produção de hidrogênio da utilização da água existente.

O gerenciamento da demanda de água se mostra indispensável, conforme apresentado num estudo da IRENA, o qual recomenda que as avaliações sobre a água sejam integradas desde o início nos projetos de produção de hidrogênio. Atualmente, mais de um terço dos projetos planejados estão localizados em regiões expostas à escassez de recursos hídricos, devido a interrupções e incertezas com relação a regulamentações ambientais (IRENA, 2023).

Conforme mencionado anteriormente, a eletrólise para produção de hidrogênio requer água ultrapura, tipo I ou II, de acordo com o que determina a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), com condutividade iônica de $5\mu\text{S}/\text{cm}$ (ISO 2696), a fim de não causar danos ao equipamento (Simões *et al.*, 2021).

Em termos de alternativas de fontes de água para produção de hidrogênio, a água de reuso se apresenta como uma solução sustentável para o Brasil, infelizmente não há uma legislação em nível nacional sobre o uso e padrões de qualidade da água de reuso, entretanto, há sete estados que possuem legislações e normas ao respeito. No Brasil, atualmente, a água de reuso é aplicada em várias atividades não potáveis, tais como, agricultura, irrigação paisagística e limpeza urbana (Moura *et al.*, 2020). Água de reuso é definida como a reutilização de águas oriundas de efluentes que foram tratados (Barros *et al.*, 2015 *apud* Moura *et al.*, 2020). Não há suficientes dados disponíveis a respeito do cenário mundial sobre reuso da água. No que diz respeito ao volume global, pode-se mencionar a China, México e Estados Unidos de América, onde se destacam os estados de Arizona Califórnia, Florida e Texas. Quanto à tecnologia, Califórnia, Cingapura e Japão são referências.

Em conformidade com a Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil, publicado pela Agência Nacional de Água e Saneamento - ANA, em 2018, a vazão de reuso de águas no Brasil é estimada em $2\text{m}^3/\text{s}$ (equivalente ao abastecimento de 800.000 habitantes), com a possibilidade de alcançar um potencial de $10/15\text{m}^3/\text{s}$ até 2030 (Águas do Brasil, 2020).

Em nível global, a disponibilidade de águas residuais é de 380.000 GL, ou seja, uma quantidade muito maior do que os 34.500 GL necessários para produção projetada de 2,3 Gt de hidrogênio quando a economia deste vetor tenha atingido sua maturidade. Por outro lado, a reutilização de efluentes terciários das estações de tratamento de águas residuais (ETAR) pode melhorar o seu impacto ambiental. Nesse sentido, a localização próxima de plantas de produção de hidrogênio e estações de tratamento de efluentes de águas terciárias se mostra um aspecto importante a ser abordado pelas empresas e poder público (Woods *et al.*, 2022).

Outra alternativa vislumbrada atualmente, é a implantação de plantas de dessalinização de água de mar. As mencionadas plantas se mostram uma solução viável; entretanto, tem um

custo alto e requerem insumos energéticos significativos. Na atualidade, cerca de 1 % da população mundial que vive em áreas costeiras, depende da dessalinização da água (Boretti e Rosa, 2019).

Assim, tendo em vista que a escolha da fonte de água é influenciada por diferentes fatores qualitativos e quantitativos, a ferramenta de apoio que tem sido utilizada na tomada de decisão é a abordagem de valor sustentável (Catarino *et al.*, 2011 *apud* Simões *et al.*, 2021) em que são considerados aspectos econômicos e sociais.

De acordo com estudo de Simões *et al.* (2021), o abastecimento de água nos eletrolisadores se traduz nas seguintes etapas. Vale ressaltar que, dependendo do local da fonte, a ordem das etapas pode ser em sequência diferente.

- Captação ou retirada da água;
- Transporte para a planta de produção;
- Armazenamento da água;
- Tratamento da água ao nível exigido pelas especificações técnicas; e
- Eliminação dos resíduos.

No estudo da IRENA (*Water for Hydrogen Production*, 2023), as medidas apontadas visando a otimizar o consumo de água na produção de hidrogênio via eletrólise, se apresentam a seguir:

- 1) Impactos relacionados com os recursos hídricos e riscos potenciais devem ser cuidadosamente analisados no desenvolvimento de projetos de produção de H₂V, em especial nas regiões de escassez hídrica, onde deve ser estabelecida e aplicada uma regulamentação rigorosa sobre o uso da água;
- 2) A retirada e consumo de água devem ser considerados como indicadores de desempenho dos projetos de produção de H₂V, os quais devem ser monitorados durante a operação;
- 3) Regulamentações, bem como incentivos financeiros, devem priorizar os projetos que apresentarem maior eficiência no consumo de água;
- 4) O aumento de incentivos e pesquisas são necessários a fim de alcançar maior eficiência nos eletrolisadores e reduzir o consumo de água para o resfriamento;
- 5) Nos projetos de produção de hidrogênio em regiões de escassez hídrica, devem incentivar-se as tecnologias de resfriamento com eficiência hídrica, tal como o resfriamento a ar;

- 6) Em zonas costeiras, onde há e tende a haver escassez hídrica, deve incentivar-se a produção de hidrogênio e processos de resfriamento com água de mar, mesmo com aplicação de regulamentação para poluição térmica e gestão de salmoura.

5. CONCLUSÕES

A descarbonização do planeta depende da mudança nas ações da população cujas emissões de gases poluentes provocam o aquecimento global, responsável pelos eventos climáticos extremos já presentes na atualidade, os quais prejudicam todas as camadas sociais por meio de graves consequências humanitárias e econômicas. Verifica-se que é essencial que os países intensifiquem campanhas educativas efetivas, a fim de esclarecer quais ações da vida cotidiana devem ser alteradas visando ao bem comum.

O consumo significativo de água nos diversos setores da economia, assim como na produção de hidrogênio, onde o mencionado recurso natural tem um papel fundamental, torna os esforços consistentes do poder público ainda mais necessários, no que se refere à conscientização da população. Esses esforços visam a promover a despoluição das diversas fontes de recursos hídricos e a divulgação ampla da importância do reuso, uma vez que, conforme estudos de especialistas, tanto a água de reuso como a água de efluentes tratada, representam uma alternativa possível para substituir o uso de água potável, por exemplo, na alimentação dos eletrolisadores em plantas de produção de hidrogênio de baixo carbono.

Todas as rotas de produção requerem de água como insumo. Contudo, a produção do hidrogênio de baixo carbono que se destaca é por meio da eletrólise, onde a tecnologia PEM se apresenta como a de menor intensidade de consumo de água, seguida da AWE.

Atualmente, há insuficiência de dados sobre o volume de água requerido em toda a cadeia de produção do hidrogênio por meio da eletrólise. Os estudos de especialistas afirmam que, além da região, é essencial avaliar a fonte e consumo de água antes da implantação de plantas de eletrólise para produção de H_2V , a fim de verificar a viabilidade econômica. Na atualidade, há insuficiência de dados sobre o volume de água requerido, em toda a cadeia de produção do hidrogênio por meio da eletrólise. Dentre os estudos futuros necessários, estão o uso de outras fontes que não sejam água potável (dessalinização e água de reuso) a redução de custos nas tecnologias de purificação, o uso da água de rejeito e alternativas para substituir materiais de alto custo utilizados em componentes dos eletrolisadores. A ciência irá desempenhar papel fundamental principalmente nas áreas de Química, Engenharia de Materiais, Engenharia Elétrica e Mecânica de Fluidos.

Na economia do hidrogênio, o Brasil é um dos países que se apresenta como privilegiado uma vez que dispõe de abundantes fontes renováveis de energia, o que o coloca no papel de um dos produtores de hidrogênio de baixo carbono mais barato do mundo. Salienta-se o fato de que

a cadeia produtiva de hidrogênio abre oportunidades de negócios e novos postos de trabalho, o que deve impulsionar a chamada “economia verde”.

REFERÊNCIAS

AFP. Agencia Francesa de Imprensa. Chile inaugura sua primeira planta de produção de hidrogênio verde. **France** **24**, 2023. Disponível em: < <https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20230810-chile-inaugura-su-primera-planta-de-producci%C3%B3n-de-hidr%C3%B3geno-verde>>. Acesso em: 08 janeiro 2024.

ARSAD A. Z. *et al.* Hydrogen Electrolyser Technologies and their modelling for sustainable energy production: a comprehensive review and suggestions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 72, p. 27841-71, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923017020?via%3Dihub>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

BARROS *et al.* Nota Técnica: Qualidade da água requerida para produção de hidrogênio verde a partir da eletrólise da água, 2023.

BERNUY-LÓPEZ, C. Eletrolysis Technologies and LCOH: current states and prospects 2030. **Hydrogen Tech World**, April 2023. Disponível em: <<https://hydrogentechworld.com/electrolysis-technologies-and-lcoh-current-state-and-prospects-for-2030>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

BESWICK R. R; OLIVEIRA A. M; YAN, Y. 2021. Does the green hydrogen economy have a water problem?. **ACS Energy Lett**, v. 6, n. 9, p. 3164-69, 2021. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.1c01375>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

BLANCO, H. Produção de hidrogênio em 2050: de quanta água será necessária a 4EJ?. **Energy Post Eu**, 2021. Disponível em: <<https://energypost.eu/hydrogen-production-in-2050-how-much-water-will-74ej-need/>> Acesso em 15 janeiro 2024.

CAMARGO C. **Catalisadores contendo metais de transição sobre estruturas de nitrogênio e carbono para produção de hidrogênio por meio da eletrólise de água salgada**. 2021. 177p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

CARMO, M; FRITZ, D. L; MERGEL, J; STOLTEN, D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 12, p. 4901-34, 2023. Doi: <10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

CASTRO, N; LEAL, L. M; ELIZEU, B. Principais iniciativas e desafios para a certificação do hidrogênio. **Portal do Hidrogênio Verde**, 2023. Disponível em: <<https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/principais-iniciativas-e-desafios-para-a-certificacao-do-hidrogenio/>>. Acesso em: 11 agosto 2023.

CEBDS - CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. O que é o Acordo de Paris?. **Clima, Energia e Finanças Sustentáveis**, 2019. Disponível em: <<https://cebds.org/noticia/o-que-e-o-acordo-de-paris/>>. Acesso em 11 agosto 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, 2010.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica, Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. EPE, 2021. Disponível em:

<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>>. Acesso em 22 janeiro 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **ABC Energia**, 2023.

GRIGORIEV, S. A.; FATEEV, V. N.; BESSARABOV, D. G.; MILLET, P. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 49, p. 26036-58, 2020. doi: <10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>. Acesso em 18 janeiro 2024.

HYSAFE. International Association for Hydrogen Safety. **Regulations General**, 2008. Disponível em: <<http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/RegulationsGeneral>>. Acesso em 12 janeiro 2024.

IEA. International Energy Agency. **Water-Energy Nexus, World Energy Outlook**, IEA Publications: Paris, 2016.

IEA. International Energy Agency. **The future of hydrogen**, IEA Publications: Paris, 2019.

IEA. International Energy Agency. **Environment and climate**, IEA Publications: Paris, 2023.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Panorama de Hidrogênio no Brasil**, 2022.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production**, 2022.

KNOB, D. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. 113p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

KOPENEN J. **Review of water electrolysis technologies and design of renewable energy production systems**. 2015. 94p. Dissertação (Mestrado) - Programa em Engenharia Elétrica, Universidade de Tecnologia de Lappeenranta, Finlândia, 2015.

KUMAR, S. S.; LIM, H. An overview on water electrolysis technologies for green hydrogen production, **Energy Reports**, v. 8, p. 13793-823, 2022. doi: <<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127>>. Acesso em 10 março 2024.

LAMPERT, D. J.; CAI, H.; WANG, Z.; KEISMAN, J.; WU, M.; HAN, J.; DUNN, J.; SULLIVAN, J. L.; ELGOWAINY, A.; WANG, M.; KEISMAN, J. Development of a Life Cycle Inventory of Water Consumption Associated with the Production of Transportation Fuels. **Syria Studies**, v. 7, n. 1, p. 37–72, 2015. doi: <10.13140/RG.2.1.3886.9201>. Acesso em 22 fevereiro 2024.

LAPPALAINEN M. Techno - economic feasibility of hydrogen production via polymer membrane electrolyte electrolysis for future power-to-x systems. 2019. 97p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Ambiental e Energética, Universidade de Tampere, Finlândia, 2019.

LOMAZZI, C. O que é osmose reversa?. **Engenharia de Ponta em Purificação e Água**, 2022. Disponível em: <<https://www.ipabras.com.br/post/artigo-técnico-o-que-é-osmose-reversa>>. Acesso em 11 de agosto de 2023.

MACEDO, S. F. M., PEYERL, D. Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 19, p. 10460-473, 2022.

MACHADO, S. A. S. **Eletrólise da água**. Instituto de química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2020.

MADSEN, H. T. **Water treatment for green hydrogen: what you need to know**. Hydrotech World, 2022. Disponível em: <<https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know#>>. Acesso em 11 de agosto de 2023.

MIDDHA, P.; HANSEN, O. R.; GRUNE, J.; KOTCHOURKO, A. CFD calculation of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: Validation against ignited impinging hydrogen jet experiments. **Journal of hazardous materials**, v. 179, n. 1-3, p. 84-94, 2010. doi: <10.1016/j.jhazmat.2010.02.061>. Acesso em 07 janeiro 2024.

MIRANDA, P. E. V. **Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies**. 1st Edition, ELSEVIER, Academic Press, 438 p, 2019.

MIRZA, N. R.; DEGENKOLB, S.; WITT, W. Analysis of hydrogen incidents to support risk assessment. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 18, p. 12068-77, 2011. doi: <10.1016/j.ijhydene.2011.06.080>. Acesso em 22 janeiro 2024.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro**, 2011.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. O Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de Projetos em Energia Limpa. **Contexto Internacional**, v. 30, n. 1, p. 9-47, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cint/a/9RkZZcmTbc6mm8wRHHc5j3Q/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 15 novembro 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil**. UN, 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 22 janeiro 2024.

NAJJAR, Y. S. H. Hydrogen safety: the road toward green technology. **International Journal of Energy**, v. 38, n. 25, p. 10716-28, 2013. doi: <10.1016/j.ijhydene.2013.05.126>. Acesso em 20 novembro 2024.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Fuel Cells Bulletin. Green Hydrogen: water use implications and opportunities. **Fuel Cells Bulletin**, v. 2021, n. 12, p. 12-15, 2021. doi: <10.1016/S1464-2859(21)00658-1>. Acesso em 08 fevereiro 2024.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. ECODEBATE. Entenda os diversos impactos das mudanças climáticas. **EcoDebate**, 2023. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2023/08/15/entenda-os-diversos-impactos-das-mudancas-climaticas/>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

OCHA. Occasional Policy Briefing Series. **Water Scarcity and Humanitarian Action: Key Emerging Trends and Challenges**. OCHA, 2010. Disponível em: <<https://www.unocha.org/sites/unocha/files/Water%20%20Scarcity%20and%20Humanitarian%20Action%20Nov10%20fnl.pdf>> Acesso em 03 março 2024.

ONU. Organização das Nações Unidas. **The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water**. UNESCO World Water Assessment Programme. Disponível em: <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>>. Acesso em 22 fevereiro 2024.

PALHARES, D. D. F. **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina de água e energia solar**. 2016. 121p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

PORTAL HIDROGÊNIO VERDE. O que é o projeto H2Brasil?. H2VBrasil, 2021. Disponível em: <<https://www.h2verdebrasil.com.br/h2brasil/>>. Acesso em 18 novembro 2024.

PUC-PR. Pontifícia Universidade Católica - Paraná. **Os 5 Ds da Transição Energética no Brasil**. Programa de Pós Graduação PUCPR virtual, 2023. Disponível em: <<https://posdigital.pucpr.br/blog/transicao-energetica>>. Acesso em 11 março 2024.

RIGAS, F; AMYOTTE, P. **Hydrogen Safety**. 1.ed. Flórida: CRC Press, 304p, 2012.

SALIBA-SILVA, A. M.; CARVALHO, F. M. S.; BERGAMASCHI, V. S.; LINARDI, M. Water Electrolysis for Hydrogen Production in Brazilian Perspective. **The 8th latin-american congress on electricity generation and transmission**, p. 1-6, 2009.

SANTANA F.; GONÇALVES, A. **Hidrogênio Verde: Conceitos, Usos e Legislação no Brasil**, 2021. Disponível em: < <https://sergipetec.org.br/uploads/2021/10/Hidrog%C3%AAnio-Verde-Conceitos-Usos-e-Legisla%C3%A7%C3%A3o-no-Brasil.pdf>>. Acesso em 10 outubro 2024.

SANTOS, F. M. S.; SANTOS, F. A. C. O combustível hidrogênio. **Educação, ciência e tecnologia**, p. 252-70, 2005. Disponível em <<https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/435/1/Combust%C3%ADvel%20hidrog%C3%A9nio.pdf>>. Acesso 07 fevereiro 2024.

SAULNIER, R.; MINNICH, K.; STURGESS, P. K. Water for the Hydrogen Economy. **WaterSMART Solutions Ltd**, 2020. Disponível em: < https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy_WaterSMART-Whitepaper_November-2020.pdf>. Acesso em 27 janeiro 2024.

SHI, X.; LIAO, X.; LI, Y. Quantification of fresh water consumption and scarcity footprint of hydrogen from water electrolysis: a methodology framework. **Renewable Energy**, v. 154, p. 786-96, 2020. <doi: 10.1016/j.renene.2020.03.026>. Acesso em 8 março 2024.

SIMÕES, S. G.; CATARINO, J.; PICADO, A.; LOPES, T. F.; BERARDINO, S. D.; AMORIM F.; GÍRIO, F.; RANGEL, C. M.; LEÃO, T. P. C. Water availability and water usage solutions for eletrolysis in hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, n. 15, 2021. doi: < 10.1016/j.jclepro.2021.128124>. Acesso em 15 janeiro 2024.

TENHUMBERG, N.; BÜKER, K. Ecological and economic evaluation of hydrogen production by different water electrolysis technologies. **Chem. Ing. Tech**, v. 92. n. 10, p. 1586-95, 2020.

TERLOUW, T.; BAUER, C.; MC KENNA, R.; MAZZOTI, M. Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment. **Energy and Environmental Science**, n. 9, 2023. Disponível em: < <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ee/d2ee01023b>>. Acesso em 20 março 2023.

UNICEF. Fundo das Nações Unidas para a Infância. **1 in 3 people globally do not have access to safe drinking water**. UNICEF, WHO, 2019. Disponível em: <<https://www.unicef.org.uk/press-releases/1-in-3-people-globally-do-not-have-access-to-safe-drinking-water-unicef-who/>>. Acesso em 14 janeiro 2024.

VALDES, H; SAAVEDRA, A; FLORES, M; VERA-PUERTO, I; AVIÑA, H; BELMONTE, M. Reverse Osmose Concentrate: psycho-chemical characteristics, environmental impact, and technologies. **Membranes**, v. 11, n. 753, p. 1-21. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2077-0375/11/10/753>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

WANG, T; CAO, X; JIAO, L. PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. **Carbon Neutrality**, v. 1, n. 21, p. 1-19, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s43979-022-00022-8>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

WIMMER, A. C. S. **Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes de uma indústria petroquímica**. 2009. 195p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZAPAROLLI, D. Brasil prepara-se para iniciar a produção de hidrogênio verde. **Revista FAPESP**, v. 314, 2023. Disponível em: < <https://revistapesquisa.fapesp.br/brasil-prepara-se-para-iniciar-producao-de-hidrogenio-verde/#:~:text=O%20Brasil%20est%C3%A1%20fazendo%20um,automotivo%20com%20baixa%20impacto%20ambiental>>. Acesso 11 março 2024.

ZHANG, H; LIN, G; CHEN, J. Evaluation and calculation on the efficiency electrolysis system for hydrogen production. **International Journal of Energy**, v. 35, n. 20, p. 10851-58, 2010. doi: <10.1016/j.ijhydene.2010.07.088>. Acesso em: 12 janeiro 2024.