

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA

**TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E IMPACTOS
AMBIENTAIS RESULTANTES DA SUA COMBUSTÃO**

MATHEUS HENRIQUE SCABIN MEDEIROS

SÃO PAULO

2023

MATHEUS HENRIQUE SCABIN MEDEIROS

**TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E IMPACTOS
AMBIENTAIS RESULTANTES DA SUA COMBUSTÃO**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Profa. Dra. Patrícia Matai

SÃO PAULO

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Scabin Medeiros, Matheus Henrique. TECNOLOGIAS DE
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E IMPACTOS AMBIENTAIS
RESULTANTES DA SUA COMBUSTÃO / Matheus Henrique

Scabin Medeiros. São Paulo, 2023. 54 f.

Monografia – Universidade de São Paulo. Orientadora: Prof.^a
Dra. Patrícia Matai.

1. energia. 2. fontes não renováveis. 3. fontes renováveis. 4.
hidrogênio. 5. aquecimento global. I. Matai, Patrícia , orient. II.
Título.

AGRADECIMENTOS

A todos os familiares e amigos que apoiaram e motivaram durante essa jornada acadêmica.

A orientadora, Profa. Dra. Patrícia Matai, por nos orientar e incentivar no desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Ao corpo docente da Universidade de São Paulo, por toda a capacitação técnica e moral compartilhada ao longo da especialização.

A Universidade de São Paulo, pelos recursos disponibilizados, pelos colaboradores que convivemos, pelas experiências presenciadas e pelas pessoas que possibilitou que conhecêssemos.

RESUMO

As formas de geração de energia, historicamente, estão relacionadas majoritariamente com os combustíveis fósseis, cuja exploração e uso intensificou-se próximo à revolução industrial, voltada justamente para o desenvolvimento tecnológico das máquinas à vapor. Essa energia gerada, posteriormente, foi nomeada como não renovável devido à quantidade finita desses recursos disponível na Terra. Com os avanços tecnológicos, a exploração destes recursos aumentou exponencialmente e novas formas de geração de energia foram estudadas e implementadas, dando origem aos diversos tipos diferentes de combustíveis não renováveis, como o caso dos derivados de petróleo, gás natural e carvão mineral. Contudo, a evolução da sociedade e das pesquisas, trouxeram em pauta preocupações que são discutidas atualmente, como a poluição oriunda da queima dos combustíveis fósseis. Nas últimas décadas, falou-se em diversas ocasiões sobre o aquecimento global, camada de ozônio, entre outros. Atualmente, existe uma preocupação mundial com as consequências causadas pelo aquecimento global. Em suma, corresponde ao aumento residual da temperatura média terrestre, devido ao acúmulo de gases poluentes na atmosfera principalmente os gases de efeito estufa. Visando combater os efeitos da poluição, passou-se a buscar novas formas de geração energética que fossem menos prejudiciais ao planeta e aos seres vivos, originando então as fontes renováveis, representadas principalmente pelas fontes renováveis: solar, eólica e biomassa. A origem desta nova matriz energética carrega um impacto ambiental positivo atrelado a novas políticas mundiais de emissões de poluentes, tratamento de resíduos e melhoria contínua na qualidade de vida. Durante o percurso evolutivo das energias renováveis, passou-se a estudar a viabilidade da geração baseada na combustão do hidrogênio, processo que servirá como ferramenta principal de pesquisa para o presente estudo. A utilização do hidrogênio (H₂) como combustível alternativo está relacionada principalmente pela alta quantidade de energia específica (por unidade de massa), sua baixa densidade e abundância na atmosfera. Entretanto, este elemento é considerado uma fonte secundária, pois não é encontrado livremente na natureza, sendo o H₂ obtido por meios de processos químicos. Com o avanço dos estudos, o hidrogênio está ganhando representatividade como a melhor forma alternativa para suprir a demanda energética mundial que está em constante crescimento. Além disso, quando utilizado como combustível, apresenta como resultado a formação de água, ou seja, sua reação não produz poluentes. Entretanto, esse fundamento é válido apenas para hidrogênio gerado de maneira limpa a partir de diversas fontes renováveis, por meio da quebra de moléculas que contenham o elemento hidrogênio (H) em sua composição. Na prática, atualmente a fonte deste elemento está diretamente ligada aos combustíveis fósseis. Dentro desse contexto, surgiram diferentes formas de classificar o gás hidrogênio (H₂), intimamente ligadas com sua forma de obtenção, podendo ser principalmente as denominadas hidrogênio verde, marrom ou cinza. Este estudo teve como objetivo apresentar as tecnologias de produção de H₂ dos diferentes tipos de hidrogênio, focando principalmente nas consequências ambientais originadas da combustão desta substância. Fica evidente ao analisar alguns resultados obtidos experimentalmente que este modelo de fonte energética proporciona a descarbonização da matriz global, apenas nos casos que se enquadrarem na forma de produção sustentável. Contudo, existem casos como o hidrogênio azul, que em suas etapas produtivas emitem gases poluentes em baixas quantidades, sendo menos prejudiciais que outras tecnologias

de obtenção de energia, com fontes não-renováveis. A viabilidade econômica para este tipo de tecnologia é o principal motivo que ainda impossibilita a alteração das matrizes globais, necessitando ainda de alguns aprimoramentos e desenvolvimentos capazes de baratear o custo de fabricação e armazenamento.

Palavras-chave: energia, fontes não renováveis, fontes renováveis, combustível, petróleo, hidrogênio, hidrogênio verde, poluição, poluentes, aquecimento global.

ABSTRACT

Analysis of the Environmental Impacts of Hydrogen Combustion

The forms of energy generation have historically been predominantly associated with fossil fuels, whose exploration and intensive use intensified around the Industrial Revolution, aimed at the technological development of steam engines. This energy generated was later categorized as non-renewable due to the finite amount of these resources available on Earth. With technological advancements, the exploration of these resources increased exponentially, and new forms of energy generation were studied and implemented, giving rise to various types of non-renewable fuels, such as petroleum derivatives, natural gas, and coal. However, societal and research advancements have brought up concerns that are currently being discussed, such as pollution resulting from the combustion of fossil fuels. In recent decades, there have been numerous discussions about global warming, the ozone layer, among others. Currently, there is global concern about the consequences of global warming. In short, it corresponds to the gradual increase in average global temperature due to the accumulation of polluting gases in the atmosphere, mainly greenhouse gases. To combat the effects of pollution, efforts have been made to seek new forms of energy generation that are less harmful to the planet and living beings, leading to the development of renewable sources, mainly represented by solar, wind, and biomass energy. The origin of this new energy matrix carries a positive environmental impact linked to new global policies on pollutant emissions, waste treatment, and continuous improvement in the quality of life. Throughout the evolutionary path of renewable energies, the feasibility of hydrogen combustion-based generation began to be studied, which will serve as the main research tool for this study. The use of hydrogen (H_2) as an alternative fuel is primarily related to its high specific energy content (per unit mass), low density, and abundance in the atmosphere. However, hydrogen is considered a secondary source because it is not found freely in nature; H_2 is obtained through chemical processes. With the advancement of studies, hydrogen is gaining prominence as the best alternative to meet the world's growing energy demand. Furthermore, when used as a fuel, it results in the formation of water, meaning its reaction does not produce pollutants. However, this principle only holds true for hydrogen generated cleanly from various renewable sources by breaking down molecules containing the hydrogen element (H) in their composition. In practice, the current source of this element is directly linked to fossil fuels. Within this context, different classifications of hydrogen gas (H_2) have emerged, closely related to its method of production, mainly known as green, brown, or gray hydrogen. This study aimed to present H_2 production technologies for different types of hydrogen, focusing primarily on the environmental consequences resulting from the combustion of this substance. It becomes evident when analyzing some experimentally obtained results that this model of energy source allows for the decarbonization of the global matrix, but only in cases that fall under sustainable production methods. However, there are cases such as blue hydrogen, which emit low amounts of polluting gases during their production stages, making them less harmful than other non-renewable energy technologies. The economic viability of this technology is the main factor that still prevents a shift in global energy matrices, requiring further improvements and developments capable of reducing the cost of manufacturing and storage.

Keywords: energy, non-renewable sources, renewable sources, fuel, petroleum, hydrogen, green hydrogen, pollution, pollutants, global warming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Objetivos de desenvolvimento sustentável	17
Figura 2.2 - Modelo de eletrólise da água	19
Figura 2.3 - Categorias de hidrogênio	23
Figura 2.4 - Alternativas para produção de hidrogênio.....	25
Figura 2.5 - Fluxograma de processo de reforma a vapor	26
Figura 2.6 - Comparativo ATR & SMR	28
Figura 2.7 - Gaseificador de leito fixo de fluxo ascendente.....	33
Figura 2.8 - Gaseificador de leito fixo de fluxo descendente.....	34
Figura 2.9 - Gaseificador de leito fluidizado	35
Figura 4.10 - Consumo energético de 2010	39
Figura 4.11 - Previsão de matriz energética em 2040.....	39
Figura 4.12 - Gráfico emissão de CO ₂ por categoria de hidrogênio	42
Figura 5.13 - Gráfico da demanda anual global de hidrogênio.....	44
Figura 5.14 - Gráfico da demanda global de hidrogênio por processo produtivo	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tecnologias de produção de hidrogênio	40
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo.....	11
1.2	Organização do trabalho	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	12
2.2	ENERGIAS NÃO-RENOVÁVEIS.....	15
2.3	ENERGIAS RENOVÁVEIS	15
2.4	SUSTENTABILIDADE	17
2.5	ELETRÓLISE.....	19
2.6	HIDROGÊNIO	22
2.6.1	HIDROGÊNIO CINZA.....	25
2.6.2	HIDROGÊNIO AZUL	27
2.6.3	HIDROGÊNIO MUSGO	30
2.6.4	HIDROGÊNIO VERDE	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4	RESULTADOS OBTIDOS.....	38
4.1	COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS DE HIDROGÊNIO	38
4.1.1	CINZA & AZUL	40
4.1.2	MUSGO & VERDE	41
4.1.3	AZUL & VERDE.....	41
5	DISCUSSÕES	43
5.1	INVESTIMENTOS – BRASIL X MUNDO.....	43
6	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

A descarbonização da matriz energética vem ocupando cada vez mais espaço na pauta mundial, desde o Acordo de Paris em 2015, com a finalidade de mitigar e reduzir os gases causadores do efeito estufa, principais agentes envolvidos nas questões climáticas que afetam a humanidade.

Visando diminuir as emissões dos gases poluentes e viabilizar um futuro sustentável controlando o aquecimento global, será necessário substituir os combustíveis fósseis por fontes alternativas e renováveis de energia e, por isso, existem estudos voltados, dentre as opções disponíveis, para a utilização do hidrogênio como combustível. (IEA, 2022)

No Brasil, devido às condições climáticas favoráveis para a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis como eólicas, solar e hídricas, existe um potencial relevante que resulta em um grande exportador de hidrogênio (H_2). Porém, atualmente a produção brasileira de H_2 é oriunda principalmente do setor industrial de petróleo e fertilizantes, resultados de processos com altas emissões de gás carbônico (CO_2). (ETENE, 2021)

Dessa forma, o hidrogênio verde é amplamente defendido como a mais promissora, dentro das diversas possibilidades, para a descarbonização. Entretanto, existem tópicos econômicos importantes que devem ser considerados quando o assunto é a transição da matriz energética. Segundo dados do Caderno Setorial ETENE, publicado de dezembro de 2021, a viabilização só será alcançada quando houver avanços tecnológicos voltados para a produção, transporte e armazenamento do hidrogênio, definição de marcos regulatórios adequados para os países produtores e políticas econômicas que auxiliem e estimulem a criação de novas cadeias produtivas baseadas neste novo combustível alternativo.

1.1 Objetivo

Este estudo teve como objetivo a análise dos diferentes tipos de hidrogênio, focando principalmente: na produção do gás hidrogênio (H_2) e majoritariamente nas consequências ambientais advindas da sua combustão.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em 7 capítulos principais, conforme descrição que se segue:

O capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, ressaltando a motivação e a importância do estudo realizado.

O Capítulo 2 apresenta o objetivo principal da pesquisa.

No Capítulo 3 encontra-se a revisão bibliográfica, iniciada por uma breve contextualização histórica, seguida por subcapítulos teóricos. que abrangem os temas relacionados com a produção e combustão do hidrogênio.

O capítulo 4 apresenta os materiais e métodos empregados no trabalho.

O Capítulo 5 contempla uma análise dos resultados obtidos, com um comparativo ilustrativo sintetizando a pesquisa realizada.

O Capítulo 6 contém uma breve discussão sobre o tema, abrangendo questões políticas e econômicas voltadas para o hidrogênio em um cenário global e nacional.

Por fim, no Capítulo 7 encontra-se a conclusão final sobre o estudo realizado, com base nos resultados obtidos e objetivos inicialmente traçados para a pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A Revolução Industrial foi um período de intensas mudanças econômicas, sociais e tecnológicas que ocorreram principalmente no século XVIII e se estenderam pelo século XIX. Uma das principais transformações desse período foi a transição do uso de fontes de energia baseadas em recursos naturais, como a força humana e animal, para fontes de energia mais abundantes e eficientes, impulsionando o avanço da industrialização em larga escala. (HOBSBAWN, 1979)

Antes da Revolução Industrial, a energia era obtida principalmente por meio do trabalho manual, utilizando a força física dos seres humanos e dos animais. No entanto, essa abordagem tinha limitações significativas em termos de potência e eficiência. Foi com a descoberta e o desenvolvimento de novas fontes de energia que a industrialização ganhou impulso. (HOBSBAWN, 1979)

Uma das principais fontes de energia que impulsionaram a Revolução Industrial foi o carvão mineral. Com a invenção e a melhoria das máquinas a vapor, o carvão se tornou uma fonte crucial de energia para alimentar locomotivas, navios, máquinas industriais e usinas. A disponibilidade de carvão em grandes quantidades em regiões como a Inglaterra, a Alemanha e os Estados Unidos, possibilitou a produção em massa de bens manufaturados e o crescimento da indústria. (CARVALHO, 2008).

Outra fonte de energia importante foi a energia hidráulica. A construção de canais, aquedutos e moinhos de água permitiu aproveitar a energia das correntes de água para mover máquinas e impulsionar a produção industrial. A energia hidráulica foi particularmente relevante para indústrias como a têxtil, onde as rodas d'água eram usadas para acionar teares e máquinas de fiar. (CARVALHO, 2008).

A revolução também viu o surgimento e a utilização crescente da energia a vapor. Além das máquinas a vapor movidas a carvão, a energia a vapor também era usada em locomotivas e barcos a vapor, permitindo o transporte rápido de mercadorias e pessoas em uma escala sem precedentes. A utilização da energia a

vapor abriu caminho para a mecanização da indústria e a produção em massa. (GOEKING, 2010)

No final do século XIX, ocorreu outro salto significativo com a descoberta do petróleo e o aproveitamento dos seus derivados como fonte de energia. A invenção do motor a combustão interna permitiu que essa nova fonte de energia fosse amplamente utilizada em veículos, máquinas industriais e na geração de eletricidade. (GOEKING, 2010)

As fontes de energia desempenharam um papel fundamental na transformação da sociedade e da economia durante a Revolução Industrial. A transição para fontes de energia mais abundantes e eficientes, como o carvão, a energia hidráulica, a energia a vapor e o petróleo, foi essencial para impulsionar o crescimento industrial, aumentar a produtividade e estabelecer as bases para a era moderna. No entanto, é importante reconhecer que o uso intensivo dessas fontes de energia também trouxe consequências ambientais e sociais, como a poluição e as condições de trabalho precárias, que foram desafios importantes a serem enfrentados posteriormente. (EXCEN, 2007)

Durante a segunda metade do século XX, ocorreram mudanças significativas nas percepções sobre o uso de recursos energéticos e seus impactos ambientais. O aumento da conscientização sobre a poluição e a degradação ambiental causadas pelas fontes de energia tradicionais, como o carvão e o petróleo, levou ao reconhecimento da necessidade de se buscar alternativas mais sustentáveis. (BBC News, 2021)

A crise do petróleo na década de 1970 foi um marco importante nesse sentido. A dependência excessiva dos combustíveis fósseis levou a um aumento acentuado nos preços do petróleo e expôs a vulnerabilidade das economias baseadas nessa fonte de energia. Esse evento desencadeou um interesse renovado nas energias renováveis como uma solução viável para a diversificação da matriz energética e a redução da dependência dos combustíveis fósseis. (BBC News, 2021)

Nos anos seguintes, o desenvolvimento tecnológico acelerou o uso de energias renováveis: os painéis solares começaram a ser mais eficientes e acessíveis, tornando a energia solar uma opção cada vez mais viável para geração de

eletricidade. Os aerogeradores também evoluíram, permitindo que a energia eólica se tornasse uma fonte significativa de energia em várias partes do mundo. Além disso, houve avanços no uso de biomassa, energia geotérmica e energia das marés. (LEITE; ALVES; PICCHI, 2020)

Paralelamente, a crescente preocupação com as mudanças climáticas impulsionou ainda mais o desenvolvimento e a adoção das energias renováveis tais como o hidrogênio. A compreensão de que as emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis vinham contribuindo para o aquecimento global levou a um aumento da pressão por alternativas mais limpas e sustentáveis. (UNFCCC, 2014)

Os avanços tecnológicos, a conscientização ambiental e a necessidade de segurança energética levaram muitos países a implementarem políticas de incentivo para promover o uso das energias renováveis. Incentivos fiscais, tarifas de alimentação, leis de energia renovável e metas de redução de emissões foram implementados em várias nações ao redor do mundo. (GTSC, 2022)

Hoje, as energias renováveis desempenham um papel cada vez mais importante na matriz energética global. Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento continuam impulsionando a eficiência e a viabilidade econômica das energias renováveis. Além disso, a transição para as energias renováveis é vista como um passo fundamental para alcançar a sustentabilidade energética e enfrentar os desafios das mudanças climáticas. (IEA, 2016)

Embora ainda existam obstáculos a serem superados, como a intermitência das fontes renováveis e a necessidade de infraestrutura adequada, a crescente conscientização sobre os benefícios ambientais, sociais e econômicos destas fontes de energia indica um futuro promissor. A busca por um sistema energético mais limpo e sustentável continua a impulsionar a inovação e a adoção de fontes de energia renováveis em todo o mundo. (IEA, 2016)

2.2 ENERGIAS NÃO-RENOVÁVEIS

As fontes de energia não-renováveis são aquelas que dependem de recursos limitados e que se esgotam ao longo do tempo. Essas fontes de energia são geralmente baseadas em combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural, que foram formados ao longo de milhões de anos a partir de matéria orgânica em decomposição. (MACKAY, 2008)

Essas fontes de energia não-renováveis desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento industrial e tecnológico, fornecendo uma grande quantidade de energia para diversos setores da sociedade. No entanto, elas têm impactos ambientais significativos, como a emissão de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global e a poluição do ar e da água. (EXCEN, 2007)

Além disso, a exploração e extração desses combustíveis fósseis podem causar danos ambientais, como a destruição de ecossistemas e o esgotamento de recursos naturais. A dependência contínua dessas fontes de energia não-renováveis também pode levar a questões geopolíticas, disputas por recursos e flutuações nos preços dos combustíveis. (UNFCC, 2014)

Devido a esses impactos e à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, há um crescente interesse em buscar alternativas mais sustentáveis e limpas, como as fontes de energia renováveis. No entanto, a transição completa para uma matriz energética baseada em fontes renováveis ainda é um desafio em muitas partes do mundo, devido a considerações técnicas, econômicas e infra estruturais. (UNITED NATIONS, 2021)

2.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As fontes de energia renováveis são naturalmente reabastecidas pela natureza em um curto período de tempo. Essas fontes de energia são sustentáveis e têm um impacto ambiental significativamente menor em comparação com as fontes de energia não-renováveis. (MACKAY, 2008)

Existem várias formas de energia renovável, incluindo energia solar, energia eólica, energia hidrelétrica, energia geotérmica e energia da biomassa. A energia solar é derivada da luz do sol e pode ser capturada e convertida em eletricidade por meio de painéis solares. A energia eólica é gerada pelo movimento do vento e pode ser aproveitada por meio de turbinas eólicas para produzir eletricidade. A energia hidrelétrica utiliza a força da água em rios ou represas para girar turbinas e gerar eletricidade. A energia geotérmica é obtida a partir do calor interno da Terra, aproveitando o vapor ou água quente subterrânea para produzir energia térmica ou elétrica. A energia da biomassa é derivada de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, resíduos florestais e resíduos de alimentos, que podem ser convertidos em biogás, biocombustível ou eletricidade. (EXCEN, 2007)

Estas fontes de energia renováveis têm benefícios significativos. Elas são abundantes, amplamente disponíveis e não se esgotam com o uso. Além disso, elas não produzem emissões de gases de efeito estufa significativas durante a geração de energia, o que ajuda a mitigar o aquecimento global e reduzir a poluição do ar. As energias renováveis também promovem a independência energética, pois podem ser produzidas localmente, diversificando a matriz energética de um país e reduzindo a dependência de combustíveis importados. (UNITED NATIONS, 2021)

Embora as fontes de energia renováveis tenham muitos benefícios, há desafios a serem superados. A disponibilidade e a intermitência dessas fontes podem exigir soluções de armazenamento de energia para garantir um fornecimento contínuo e confiável. Além disso, a infraestrutura e a tecnologia para a implantação em grande escala das energias renováveis ainda precisam ser aprimoradas em muitas regiões. (STEINBERG, 1998)

No entanto, o uso crescente de energias renováveis é uma parte fundamental da transição para um futuro mais sustentável e livre de carbono, promovendo a preservação do meio ambiente e a mitigação das mudanças climáticas.

2.4 SUSTENTABILIDADE

O termo sustentabilidade está amplamente pulverizado na sociedade e está conquistado maior relevância mundial com o passar dos anos. Basicamente, sua definição consiste na ponderação entre os sistemas ecológicos, econômico e sociais, impondo limites para os impactos a biodiversidade causados pela atividade de desenvolvimento humano. (CAVALCANTI, 2010)

A ONU listou, em 2015, alguns dos principais objetivos focados na sustentabilidade mundial que deverão ser concretizados até 2030, conforme Figura 2.1. Importante ressaltar que alguns dos itens citados visam particularmente o comprometimento com a sustentabilidade.



Figura 2.1 - Objetivos de desenvolvimento sustentável

Fonte: GTSC, 2022.

Pensando exclusivamente no cenário econômico, grande parte das empresas busca o desenvolvimento de tecnologias, serviços e produtos que estejam de acordo com as novas políticas ambientais globais, que possuem uma projeção desafiadora de redução dos gases de efeito estufa em 5 bilhões de toneladas por ano até 2030. A

fim de auxiliar e motivar os países a transformarem suas matrizes energéticas e cadeias produtivas, foi criado o incentivo monetário na Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2021, COP26, que foi a conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, realizada em Glasgow, na Escócia. estabelecendo que os países cuja matriz energética for renovável, compartilhem suas tecnologias com aqueles que não possuem estrutura ambiental equivalente.

O principal objetivo da COP26 foi acelerar os esforços globais para combater as mudanças climáticas e limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, conforme estabelecido no Acordo de Paris. Os participantes buscaram chegar a compromissos e acordos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, aumentar o financiamento para ações climáticas e fortalecer a adaptação e resiliência dos países vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas.

Durante a conferência, foram discutidos temas como o financiamento climático, o papel das energias renováveis, a proteção das florestas, a transição para a mobilidade sustentável e a importância da cooperação internacional. A conferência também destacou a importância da ação individual e coletiva para enfrentar a crise climática, ressaltando a necessidade de todos os setores da sociedade se unirem para implementar soluções sustentáveis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Posteriormente, o Pacto Climático de Glasgow em 2021, reuniu as principais potências mundiais para uma nova discussão ambiental e traçar novas estratégias para viabilizar as metas definidas inicialmente no Acordo de Paris. Dentre os tópicos avaliados, destacam-se principalmente a redução de emissões, viabilização financeira, união dos esforços e assistência aos impactados pelas mudanças.

Uma das formas de combate à poluição está relacionada com a descarbonização das matrizes energéticas. De acordo com dados da “Climate Watch” de 2019, aproximadamente 67% das emissões mundiais de gases poluentes são originados do uso de combustíveis fósseis em processos industriais e nos setores de energia, dos quais 87% dos gases emitidos é CO₂. Baseado neste cenário, descarbonizar significa uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis focada na redução constante de emissão dos gases poluentes.

2.5 ELETRÓLISE

O conceito de eletrólise é conhecido dentro do ambiente da química e define-se pelas reações não espontâneas que são ocasionadas com a aplicação de energia elétrica, movimentando elétrons.

Analizando a molécula da água, a quebra de suas ligações pode ser realizada por meio da aplicação de um potencial elétrico em uma solução aquosa que contenha eletrólitos, conforme ilustrado na Figura 2.2. As reações anódicas e catódicas ocorrem após a passagem de uma corrente elétrica de alta intensidade através de uma salmoura tratada.

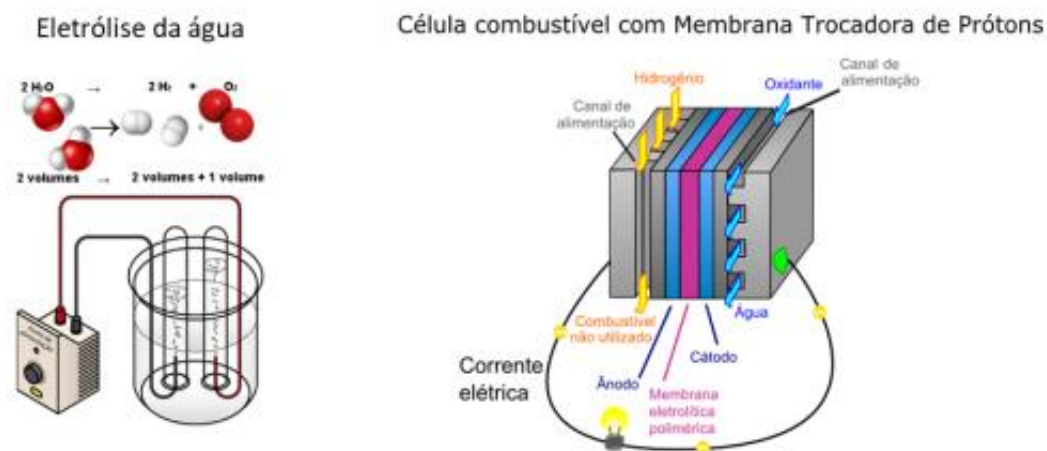


Figura 2.2 - Modelo de eletrólise da água

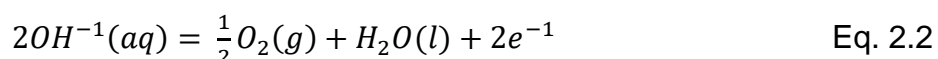
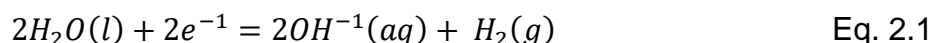
Fonte: Adaptado de PANSERA (2019)

A reação química: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ocorre de maneira forçada, ao se conduzir uma corrente elétrica vinda de eletricidade com origem renovável, na maioria dos casos solar ou eólica, fazendo com que o hidrogênio produzido não esteja relacionado com poluentes em nenhuma de suas etapas. A única ressalva para este processo é a necessidade de um material semiconductor especializado em absorver energia

luminosa, tecnologia responsável pela quebra da molécula, foco principal das pesquisas contemporâneas.

O interesse principal do hidrogênio combustível vai além de sua cadeia produtiva sustentável, mas também está associado ao fato de que sua combustão gera vapor de água como resultado. Células de combustível geralmente utilizam desse fato para efetuar uma oxirredução capaz de transformar o hidrogênio em combustível novamente. A eletrólise por sua vez tem seu funcionamento de maneira contrária, utilizando água e energia para resultar os gases hidrogênio e oxigênio. Esses conceitos associados em série são amplamente usados para realizar o transporte de energia.

O processo de eletrólise para produção de hidrogênio é utilizado desde os anos 60, sendo responsável atualmente por aproximadamente 4% da produção global. Dentre as diversas técnicas possíveis de eletrólise, majoritariamente utiliza-se a solução alcalina de hidróxido de potássio (KOH), com concentração de 30% aproximadamente, como meio condutor. Essa é a forma que apresenta a menor dissipação de eletricidade, com rendimento alcançando valores próximos de 80%. Esse processo ocorre seguindo as equações descritas a seguir:



A eletrólise apresenta uma versatilidade relacionada com as tecnologias capazes de serem empregadas, destacando-se os processos de mercúrio, membrana e diafragma, podendo existir também a chamada eletrólise avançada.

O processo de eletrólise por mercúrio é realizado em uma célula eletrolítica, que consiste em um recipiente dividido por uma barreira porosa ou uma membrana

permeável. O lado anódico é preenchido com eletrólito fundido contendo o sal do metal alcalino, geralmente o cloreto, e o lado catódico contém mercúrio líquido.

Quando uma corrente elétrica é aplicada à célula, íons do metal alcalino (por exemplo, Na^+ ou K^+) migram através da barreira porosa ou membrana permeável para o lado catódico, onde ocorrem as reações de redução. No cátodo de mercúrio, os íons de metal alcalino são reduzidos a átomos metálicos, que se dissolvem no mercúrio formando um amálgama. Este amálgama é separado e reage com água, formando o hidrogênio.

Na eletrólise por diafragma, a célula eletrolítica é dividida em três compartimentos: o compartimento do ânodo, o compartimento do cátodo e um compartimento intermediário separado por um diafragma poroso. O diafragma é um material poroso que permite a passagem de íons, mas impede a mistura das soluções dos dois compartimentos.

No compartimento do ânodo, ocorre a oxidação dos íons ou moléculas presentes na solução, gerando cátions positivos. Esses cátions positivos migram através do diafragma para o compartimento intermediário. No compartimento do cátodo, ocorre a redução de cátions ou a descarga de moléculas, resultando na formação de espécies neutras ou ânions. Essas espécies migram através do diafragma para o compartimento intermediário.

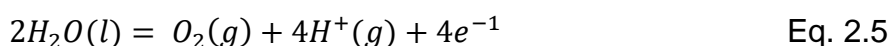
O diafragma poroso atua como uma barreira física entre os compartimentos, permitindo apenas o transporte de íons ou espécies carregadas. Dessa forma, os íons positivos e negativos são mantidos separados e são coletados em compartimentos diferentes. Essa separação permite a obtenção de produtos diferentes em cada compartimento, possibilitando a produção de substâncias quimicamente distintas.

Por fim, a eletrólise por membrana é um processo eletroquímico semelhante à eletrólise por diafragma, porém utiliza uma membrana seletiva de íons em vez de um diafragma poroso para separar os compartimentos da célula eletrolítica. Essa membrana possui propriedades específicas que permitem a passagem seletiva de íons positivos ou negativos, impedindo a mistura entre os compartimentos. A membrana é um material polimérico com propriedades que permitem a passagem de um tipo de íon, enquanto bloqueia a passagem do outro tipo.

No compartimento do ânodo, ocorre a oxidação dos íons ou moléculas presentes na solução, gerando cátions positivos. Esses cátions positivos não podem passar através da membrana seletiva de íons e, portanto, permanecem no compartimento do ânodo. No compartimento do cátodo, ocorre a redução de cátions ou a descarga de moléculas, resultando na formação de espécies neutras ou ânions. Essas espécies também não podem passar através da membrana seletiva de íons e são retidas no compartimento do cátodo.

No processo de eletrólise avançada, caracterizado pelos eletrolisadores compactos de alta densidade de corrente, encontram-se os melhores rendimentos na conversão de energia elétrica em hidrogênio.

Como o eletrólito é sólido, também desempenha papel de membrana separadora, possibilitando uma proximidade dos eletrodos, necessitando apenas da circulação de água para a eletrólise, respeitando as equações descritas abaixo, com ocorrência em meio ácido:



2.6 HIDROGÊNIO

O Hidrogênio (H) é o elemento químico de maior abundância na atmosfera do planeta, porém é encontrado na composição de moléculas, como a água (H₂O), cuja hipótese de utilizá-lo como combustível originou-se após a primeira crise do petróleo. (ETENE, 2021)

No entanto, a obtenção usual do hidrogênio costuma utilizar tecnologias poluentes ou que provêm de fontes fósseis, o que faz com que ocorra maior emissão de CO₂ e menor produção de energia.

Dessa forma, para a obtenção do hidrogênio combustível (H₂), necessita-se de tecnologias capazes de decompor as moléculas a partir de uma grande quantidade de energia. Sendo assim, pode ser produzido por meio de diferentes processos e, a depender da matéria-prima decomposta, pode-se categorizá-lo em grupos distintos, sendo eles verde, cinza, marrom e azul, definidos pela Comissão Europeia de acordo com a sustentabilidade da cadeia produtiva. (ETENE, 2021)

Segundo EPE (2022), o hidrogênio pode ser obtido de diversas formas, cuja representação pode ser feita por meio de uma escala de cores (“arco-íris do hidrogênio” - Figura 2.3). Dentre elas, os 4 principais tipos são cinza, azul, verde musgo e verde, especialmente em razão de serem produzidos a partir de matérias primas diferentes.



Figura 2.3 - Categorias de hidrogênio

Fonte: Adaptação do quadro 2 de GURLIT, GUILLAUMON e COETTO (2021)

O hidrogênio verde ou renovável, representa aquele produzido por eletrólise de água e eletricidade proveniente de fontes renováveis, garantindo que neste processo não haja emissões de gases poluentes. (GURLIT, GUILLAUMON e COETTO, 2021)

Os hidrogênios cinza e marrom são oriundos de combustíveis fósseis, gás natural e carvão mineral respectivamente, sem que ocorra captura ou utilização de carbono durante o processo. Ambos representam a maior parcela produtiva nacional, assim como uma alta emissão de gases causadores do efeito estufa. (GURLIT, GUILLAUMON e COETTO, 2021)

Por fim, o hidrogênio azul também é produzido através do tratamento de combustíveis fósseis (gás natural), porém neste caso ocorre a captura de carbono (CCU). (OSTADI et al., 2020)

Considera-se a utilização deste combustível como fonte energética, como uma das maneiras com melhor relação entre eficiência e sustentabilidade, quando utilizadas para produção de energia elétrica, a partir de células a combustível. Importante ressaltar que tal relação somente é válida para os hidrogênios que se enquadrarem na categoria dos sustentáveis. (GAMBETA, 2010)

Dentro desse cenário que está se formando, o hidrogênio verde tem ganhado favoritismo como uma aposta para a sustentabilidade do setor industrial, consequência da constante discussão que ocorre mundialmente em torno da necessidade de redução das emissões de carbono.

A grande vantagem de usar este tipo de substância está relacionada com sua versatilidade, podendo ser empregado como combustível, transportador ou armazenamento de energia, atingindo diferentes setores e indústrias. Adicionalmente, também não causa poluição do ar quando utilizado, possibilitando a descarbonização de processos industriais que antes pareciam inviáveis de serem alcançados. Sendo assim, a Figura 2.4 abaixo demonstra algumas alternativas para a produção e utilização do hidrogênio.

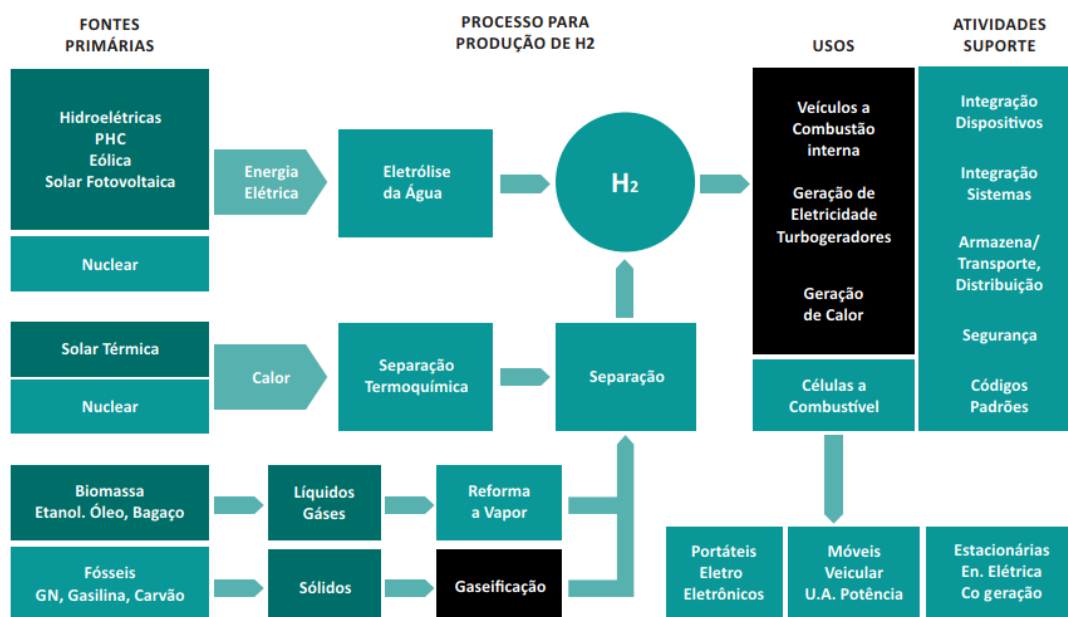


Figura 2.4 - Alternativas para produção de hidrogênio

Fonte: CENEH, citado por CGEE (2010)

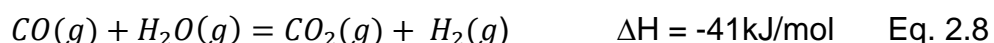
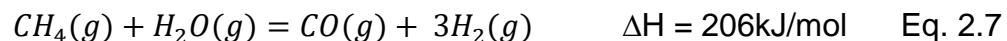
A Figura 2.4 mostra também o emprego de energia nuclear na produção de hidrogênio (denominado hidrogênio rosa).

2.6.1 HIDROGÊNIO CINZA

O hidrogênio cinza provém da reforma a vapor de gás natural (GN) decorrente das unidades de processamento de gás natural (UPGNs). Este é rico em metano (CH_4), além de alguns hidrocarbonetos líquidos, que são levados ao processo de reforma catalítica a vapor, para sua conversão em H_2 e CO_2 . (OSTADI et al., 2020)

Devido à maior produção de H_2 em comparação com o CO_2 no processo, o GN é priorizado em relação a outras fontes primárias. Durante a reforma a vapor, pela reação catalítica entre o GN e o vapor d'água, resulta-se na emissão de aproximadamente $0,42 \text{ m}^3$ de CO_2 para cada $1,0 \text{ m}^3$ de H_2 produzido.

A reação endotérmica correspondente a fase 1, representada pela Equação 2.7 abaixo, e requer altas temperaturas, em torno de 600 e 900 °C, para que a maior quantidade de H₂ seja retirada, com valores próximos de 92%. A reação exotérmica decorrente da purificação dos gases, é representado pela Equação 2.8. (EPE, 2022).



A Figura 2.5 representa o processo de reforma a vapor, cujas etapas estão descritas posteriormente:

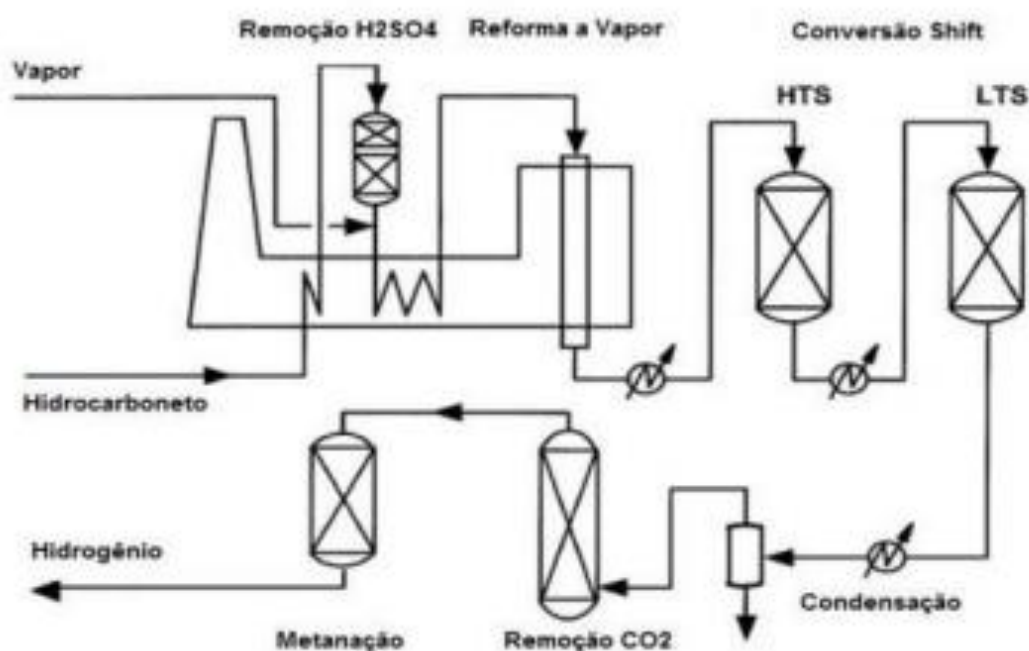


Figura 2.5 - Fluxograma de processo de reforma a vapor

Fonte: BERNDT (2013)

Na etapa de remoção de ácido sulfúrico (H₂SO₄), não é necessário remover demais componentes sulfurados, uma vez que o Gás Natural proveniente das

Unidades de Processamento passou pelo processo de hidrodessulfurização. Simultaneamente ocorre a conversão de hidrocarbonetos pesados (C2 a C5) em metano e vapor d'água. (EPE, 2022)

Na reforma a vapor empregam-se reformadores tubulares com auxílio de catalisadores para a realização da conversão. A carga passa pela tubulação e entra em contato com o catalisador, entretanto a queima do gás ocorre no lado externo do tubo, gerando uma mistura de H_2 , CO e CO_2 na saída do reformador. (EPE, 2022)

A conversão *shift* é caracterizada somente pela conversão de CO em CO_2 por meio do vapor d'água, sendo que o modelo HTS é feito em alta temperatura (*high temperature shift*) e o LTS em baixa temperatura (*low temperature shift*).

Seguindo o fluxo do processo, ocorre a etapa de condensação, responsável pela separação do CO_2 e H_2 , representando percentualmente a maior quantidade de CO_2 do processo, atingindo valores próximos de 60%. (EPE, 2022)

Adiante, conforme ilustrado na Figura 2.5, existe a remoção de CO_2 , feita através de reações de absorção com componentes como carbonato de potássio ou reagentes orgânicos como a monoetanolamina (MEA). (EPE, 2022)

Por fim, na etapa de metanação que ocorre a geração de metanol e hidrogênio purificados. (EPE, 2022)

As plantas de produção de hidrogênio utilizam geralmente o gás natural como fonte energética para suprir as demandas necessárias, produzindo CO_2 . Caso esse CO_2 fosse capturado, conforme será visto no estudo do hidrogênio azul, o processo de reforma a vapor seria 5% menos eficiente quando em termos de relação “consumo de GN/Produção de H_2 ” (EPE, 2022).

2.6.2 HIDROGÊNIO AZUL

A diferença entre a obtenção dos hidrogênios cinza e azul está basicamente associada à captura de CO_2 resultante do processo de reforma a vapor do gás natural.

Na obtenção do hidrogênio azul, utiliza-se a técnica denominada CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage*), pela qual ocorre a captura, utilização e armazenamento de carbono. Sendo assim, essa técnica torna-se menos poluente, pois esse CO_2 que seria resíduo passa a ser um subproduto, podendo ser aproveitado em outros processos. No entanto, a utilização dessa técnica gera gastos adicionais em comparação com a do hidrogênio cinza. (AZIZA; DARMAWAN; JUANGSA, 2021)

Segundo EPE (2022) a obtenção do hidrogênio azul está atrelada à chamada reforma autotérmica do metano (ATR: *autothermal reforming*), enquanto a obtenção de hidrogênio cinza está ligada à reforma de vapor de metano (SMR), já abordada no tópico anterior. Na ATR, que inclusive possui processo bastante similar ao SMR, o GN já chega ao reator aquecido e parcialmente oxidado, não havendo necessidade de uso de altas temperaturas, conforme indicado na Figura 2.6. A técnica ATR corresponde ao hidrogênio azul, visto que o CO_2 gerado no reformador se mantém na corrente principal, facilitando sua captura, podendo atingir concentrações de até 90%, a depender da técnica utilizada.

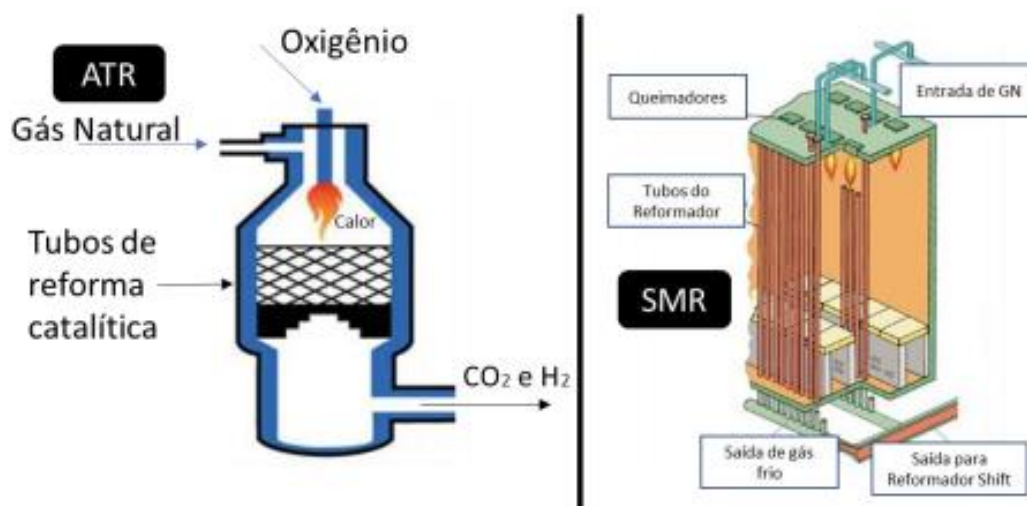


Figura 2.6 - Comparativo ATR & SMR

Fonte: Adaptados de Thyssenkrupp (2022)

Pensando no modelo de captura de CO₂, de acordo com dados da EPE, 2022, existem diferentes possibilidades tecnológicas, sendo elas: pré-combustão, pós-combustão, oxi-combustão e processos industriais.

No primeiro caso, temos a pré-combustão, técnica para a produção de hidrogênio a partir de combustíveis ricos em hidrogênio. Nesse processo, o combustível é submetido a uma reação de reforma, geralmente a vapor, para produzir hidrogênio e dióxido de carbono (CO₂). Em seguida, o hidrogênio é isolado e usado como combustível ou para outras aplicações, enquanto o CO₂ é capturado e separado para evitar a sua emissão na atmosfera. Os modelos SMR e ATR são os maiores exemplos. (AZIZA; DARMAWAN; JUANGSA, 2021)

A pós-combustão, caracterizada pela queima de combustível contendo hidrogênio, em uma atmosfera de oxigênio, apresenta como resultado da reação o vapor de água (H₂O) como único subproduto. No entanto, se outros combustíveis contendo carbono forem queimados em uma atmosfera rica em oxigênio, como no caso da queima de gás natural, o subproduto será CO₂. O processo de pós-combustão visa capturar esse CO₂ gerado após a queima e armazená-lo ou utilizá-lo de forma segura.

Por fim, a oxi-combustão é um processo de combustão que utiliza oxigênio em grandes concentrações em vez do ar atmosférico, para realizar a queimado combustível. Esse processo produz vapor de água como subproduto e permite uma maior concentração de CO₂ nos gases resultantes, o que facilita sua captura.

Outra tecnologia que deve ser destacada está relacionada com a retirada de CO₂, possibilitada a partir de técnicas de captura físico-químicas e adsorções por materiais porosos, podendo-se utilizar alternativamente membranas seletivas e fixações por microalgas. (OSMAN et al., 2021)

No processo de absorção, utilizam-se aminas, cujos parâmetros principais para garantir sua eficiência estão no resfriamento do fluido absorvente e incremento de pressão. (EPE, 2022)

Na adsorção, tem-se um gás retido na superfície de materiais adsorventes, análogo ao método de adsorção física por diferença de pressão, cuja corrente ao

passar pelos leitos causará uma saturação, que por sua vez reduz a pressão havendo assim a regeneração do sólido e separação do CO₂ para armazenamento.

O uso industrial de CO₂ já é observado em plantas de produção de ureia e carbonato de sódio. O primeiro é um fertilizante largamente consumido no Brasil. Dentre as demais alternativas para a utilização de CO₂ destacam-se os sistemas de refrigeração, extintores de incêndio e na indústria alimentícia, para bebidas gaseificadas. (EPE, 2022)

Atualmente, a preferência para utilização nestes processos está voltada para o CO₂ biogênico, aquele produzido por processos biológicos naturais ou industriais. Estes são considerados como biogênicos ou bioquímicos, porque o carbono liberado faz parte do ciclo natural do carbono na Terra. É considerado menos problemático em termos de impacto climático do que o CO₂ de origem fóssil, pois representa uma reciclagem do carbono presente na biosfera.

Novas tecnologias, dentre elas a produção de combustíveis, produtos químicos, materiais de construção civil, têm sido testadas para tornar o CO₂ uma matéria prima, dada a urgência global em descarbonizar a produção mundial. (OSTADI et al., 2020).

2.6.3 HIDROGÊNIO MUSGO

A obtenção do hidrogênio musgo ocorre utilizando-se como matéria prima a biomassa, a qual pode ser definida, segundo a ANEEL (2020), como “todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica que pode ser utilizada na produção de energia”. Para a produção de hidrogênio através de biomassa, utilizam-se as seguintes principais tecnologias: pirólise, gaseificação, gaseificação em leito fixo e gaseificação em leito fluidizado. (FUKUROZAKI, 2011).

A gaseificação vem ganhando visibilidade decorrente da utilização de novas tecnologias de purificação e separação do *syngas* (ou gás de síntese, mistura de CO + H₂). Esse modelo associado à geração de eletricidade, permite alcançar baixos custos de produção e alta eficiência de conversão. A partir da biomassa é possível alcançar uma eficiência de produção de hidrogênio em torno de 60%, utilizando

gaseificadores de leito fluidizado e catalisadores adequados, resultando em uma produção renovável de hidrogênio cada vez mais atrativa. (FUKUROZAKI, 2011).

De acordo com Fukurozaki (2011), um sistema de produção de hidrogênio via gaseificação de biomassa aponta valores de emissão de 14 kg de C/TOC (carbono por toneladas de óleo equivalente), representando menos de 20% das emissões típicas se comparado aos sistemas baseados em combustíveis fósseis.

A gaseificação é a conversão de combustíveis sólidos carbonáceos em uma mistura de gases, em altas temperaturas. Segundo Fukurozaki (2011), é realizada a partir dos processos: aquecimento e secagem do combustível, pirólise do combustível sólido em gases, condensação de vapores e materiais carbonáceos, reações sólido-gás que consomem os materiais carbonáceos e a fase de reações do gás que ajustam a composição química do *syngas*.

A pirólise, por outro lado, converte a biomassa sólida em gases e vapores, por meio da reação de decomposição, empregando-se altas temperaturas. Dentre os gases pirolíticos, estão: CO, CO₂, H₂, H₂O e CH₄, enquanto os vapores condensados incluem uma variedade de hidrocarbonetos e compostos orgânicos oxigenados. As reações sólido-gás produzem CO, H₂ e CH₄, seguindo as reações listadas abaixo pelas Equações 2.9 a 2.14. (FUKUROZAKI, 2011).

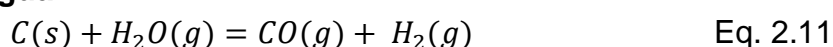
I. Reação carbono-oxigênio



II. Reação redox



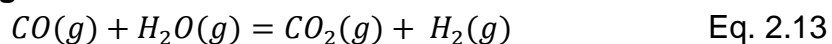
III. Reação carbono-água



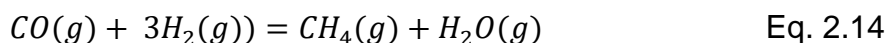
IV. Reação de hidrogenação



V. Reação shift água-gás



VI. Metanização



A composição do gás está diretamente relacionada com a quantidade de oxigênio e vapor admitidos para o reator, o tempo e a temperatura de reação. O balanço estequiométrico ocorre em reações de tempos relativamente longos e os produtos são essencialmente limitados a gases leves como CO, CO₂, H₂ e CH₄ (FUKUROZAKI, 2011).

Para a gaseificação, destacam-se como apropriados os seguintes: gaseificador de leito fixo de fluxo ascendente ou contracorrente; gaseificador de leito fixo de fluxo descendente ou concorrente e gaseificador de leito fluidizado.

Os gaseificadores de leito fixo de fluxo ascendente são caracterizados pelo reator de contracorrente. O combustível flui no sentido da parte superior até a inferior, com sua entrada no silo, percorrendo todo o reator até a grelha de remoção das cinzas (material mineral da biomassa). Nesse caso, o gás apresenta temperatura de saída próximas de 100°C, sendo uma vantagem para a troca de calor interna, possibilitando a utilização de biomassa com alto teor de base úmida, visto que toda a secagem ocorre no topo do equipamento (FUKUROZAKI, 2011). A Figura 2.7 demonstra um modelo de gaseificador de leito fixo de fluxo ascendente.

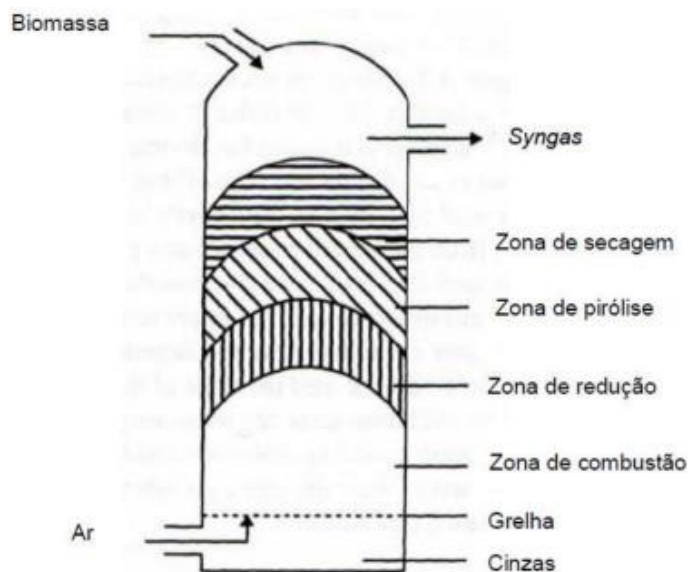


Figura 2.7 - Gaseificador de leito fixo de fluxo ascendente

Fonte: Fukurozaki (2011)

Por outro lado, nos gaseificadores de fluxo descendente o ar e o gás apresentam fluxos na mesma direção que o leito sólido, sendo especificamente utilizados em projetos de redução da formação de alcatrão e óleo. Nesse caso, combustíveis e vapores percorrem da parte superior até a inferior, entretanto, os gases são capazes de atingir temperaturas de saída próximas de 700°C, sendo comumente empregado em motores de combustão interna. (FUKUROZAKI, 2011) (vide Figura 2.8).

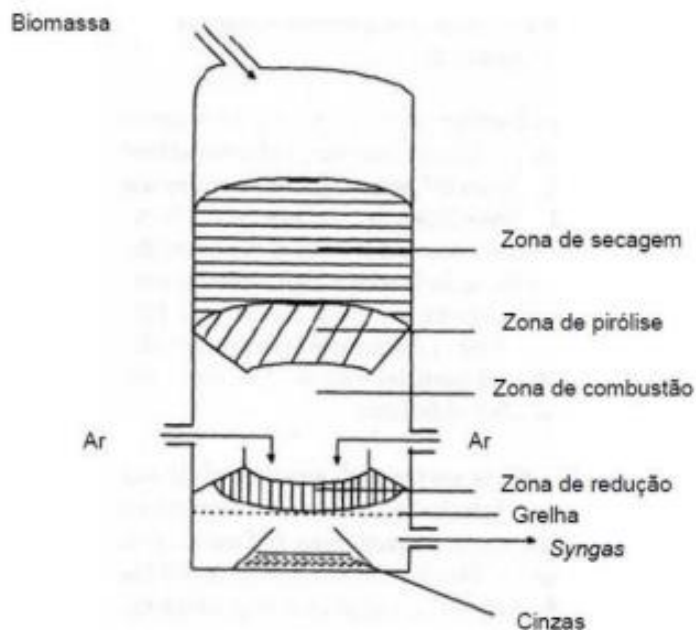


Figura 2.8 - Gaseificador de leito fixo de fluxo descendente

Fonte: Fukurozaki (2011)

Por fim, existem os gaseificadores de leito fluidizado, representados pela Figura 2.9. Neles uma corrente de gás passa no sentido ascendente através de um leito de materiais granulares de fluxo livre, no qual a velocidade do gás é suficientemente alta para que as partículas sólidas sejam separadas entre elas e circulem livremente. Durante toda circulação no leito, as correntes de gases fluem em um sentido ascendente em canais que contêm poucos sólidos, enquanto massas sólidas fluem para baixo (FUKUROZAKI, 2011).

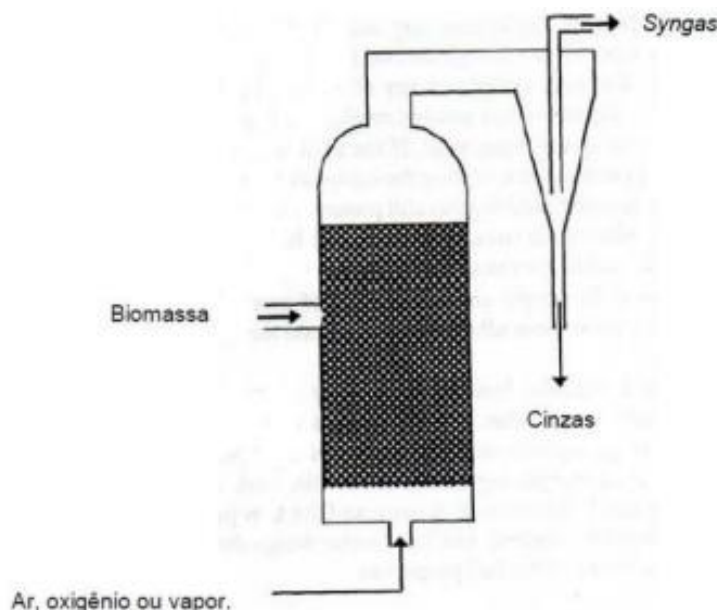


Figura 2.9 - Gaseificador de leito fluidizado

Fonte: Fukurozaki (2011)

Sua vantagem é a alta eficiência de transferência de calor, que resulta em condições muito uniformes no leito. Fukurozaki (2011) relata que este tipo de gaseificador é hábil para processar uma grande variedade de combustíveis e reproduzível para larga escala de produção. As desvantagens incluem a formação moderada de alcatrão, alta carga de particulados e relativamente um grande consumo de energia para promover a velocidade da corrente de ar.

Gás de síntese, também conhecido gás de gaseificação, é um termo geralmente utilizado para se referir a uma mistura de hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO) produzida por meio do processo de gaseificação de combustíveis sólidos ou líquidos. É um precursor importante em várias indústrias, especialmente na produção de hidrogênio e na fabricação de produtos químicos, como amônia, metanol e outros combustíveis sintéticos. (GAMBETA, 2010).

Para a obtenção de hidrogênio musgo, também pode-se utilizar o gás de síntese, submetendo-o à reforma a vapor, reagindo com vapor de água em presença de um catalisador, produzindo uma mistura de hidrogênio e dióxido de carbono, conforme representado na equação 2.15 abaixo:



2.6.4 HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde depende de uma fonte de energia renovável, principalmente hidroelétricas, solar e eólicas, capaz de fornecer corrente elétrica suficiente para que ocorra a quebra das ligações químicas da água, formando H_2 e O_2 . Essas seriam as melhores fontes para que o processo de obtenção de H_2 cause menos prejuízo à saúde humana ou ambiental. (GAMBETA, 2010).

A eletrólise da água com a energia remanescente dessas fontes mencionadas acima, além de viabilizar o armazenamento e transporte do hidrogênio, impedir perdas de energia, também gera o coproduto O_2 , utilizado em diversos processos industriais, como oxirreduções, exemplificadas anteriormente pelos processos de gaseificação.

Estima-se, segundo a EPE, que a energia utilizada pelos eletrolisadores devem ser originados por fontes solares ou fotovoltaicas. Contudo, partindo-se da hipótese de produção do hidrogênio verde, esse montante equivalente a energia deve ser destinada para a eletrólise, em um processo livre de emissão de CO_2 . (OSTADI *et al.*, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada no presente trabalho foi a da Pesquisa Bibliográfica, utilizando fontes de informação já publicadas, como livros, artigos científicos, relatórios técnicos e outras publicações acadêmicas, como base para investigação e aprofundamento no tema especificado.

Uma vez coletadas as fontes bibliográficas, realizou-se a leitura crítica e a síntese das informações, identificando os principais conceitos, argumentos, teorias e evidências apresentadas pelos autores, permitindo analisar o que já foi produzido sobre o tema, identificar as lacunas de conhecimento e sistematizar a informação.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS DE HIDROGÊNIO

Conforme apresentado anteriormente, existem diferentes origens para a sintetização do hidrogênio combustível, que servem como base para as diferentes classificações. Cada maneira de se produzir o combustível possui características oriundas dos processos que devem ser consideradas quando deseja-se compará-los.

Estudos recentes avaliaram os indicadores de maior relevância para gerar o comparativo correto entre os tipos de hidrogênio, considerando principalmente o consumo de energia, eficiência do processo, matéria-prima utilizada e emissão de gases do efeito estufa.

Segundo pesquisas da EPE realizadas em 2022, o hidrogênio verde representa apenas, em valores máximos, 4% do total produzido mundialmente. Justifica-se esta baixa fração com o fato de as empresas utilizarem majoritariamente gás natural e carvão como fontes de energia, combustíveis que representam respectivamente 76% e 23% do total de hidrogênio utilizado no planeta.

Com a exploração do pré-sal e a existência de uma legislação específica para o gás natural, o hidrogênio azul possui uma vantagem de produção em relação ao hidrogênio verde devido ao seu custo ainda considerado elevado. Portanto, ao se comparar essas opções, não se deve limitar apenas ao fator de emissão de poluentes ou ao custo de produção.

Segundo o artigo de Gurlit, Guillaumon e Coetto (2021), a produção de hidrogênio por meio do gás natural ainda se destaca devido a maior disponibilidade desta matéria-prima em território nacional e, também, seu baixo custo. Entretanto, a tendência do cenário é favorável a mudança à medida que houver a expansão prevista para a energia eólica e solar. As Figura 4.10 e Figura 4.11 mostram as matrizes energéticas em 2010 e 2040 respectivamente, para efeito de comparação. Observa-se a maciça participação da energia hídrica em 2010 (Figura 4.10) em comparação com 2040, onde se constata uma participação mais efetiva das energias solar e eólica. A participação da biomassa permanece inalterada.

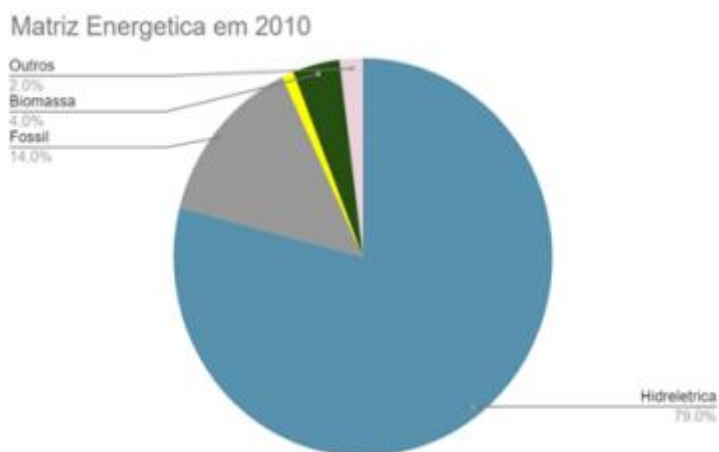


Figura 4.10 - Consumo energético de 2010

Fonte: Adaptado de GURLIT, GUILLAUMON e COETTO, 2021



Figura 4.11 - Previsão de matriz energética em 2040

Fonte: Adaptado de GURLIT, GUILLAUMON e COETTO, 2021

Conforme apresentado ao longo da pesquisa para os diferentes tipos de hidrogênio, a energia utilizada para alimentação do processo possui uma pequena quantidade de emissão de CO₂, segundo resumo descrito na Tabela 4.1.

Processo	Matéria Prima	Temperatura	Emissões COx/kg H ₂	Energia	Rendimento
Reforma Catalítica ^{[1][4]}	Gás Natural	600-900 °C	11,89 kg CO ₂ /kg H ₂	165.600,0 kJ/kg H ₂	80% ou 111,2 kg/dia
Gaseificação (leito fixo ascendente) ^[2]	Biomassa	80-100 °C	7,23 kg COx/ kg H ₂	932,8 kJ/m ³	60% ou 176 kg/dia
Eletrólise com fonte solar ^{[1][3]}	Água Alcalina	35-45 °C	2,41 kg CO ₂ /kg H ₂	33.444,24 kJ/kg H ₂	59-79% ou 160 kg/dia
Eletrólise com fonte eólica ^{[1][3]}	P.E.M.	65 °C	0,97 kg CO ₂ /kg H ₂	9919 kJ/kg H ₂	65-82% ^[3] ou 14 kg/dia

Tabela 4.1 - Tecnologias de produção de hidrogênio

Fonte: [1] Cetinkaya (2012); [2] Zeng e Zhang (2010); [3] Fukurozaki (2011); [4] Gurlit, Guillaumon e Coetto (2021)

Observação: PEM - Proton exchange membrane.

Comparando as diferentes rotas, conclui-se que a reforma catalítica não se mostra sustentável, devido às elevadas temperaturas e kg de CO₂ emitidos. Já a eletrólise com fonte eólica se mostra mais sustentável por ter menos emissões, no entanto, produz menos hidrogênio quando comparada às demais. Assim, é necessário confrontar cada rota a fim de verificar qual é mais benéfica, conforme comparativos descritos a seguir, entre as diferentes tecnologias de produção.

4.1.1 CINZA & AZUL

O hidrogênio azul é um pouco mais sustentável que o hidrogênio cinza. No caso do azul, um valor máximo de 56% do CO₂ desse processo pode ser recuperado, mediante ao uso de sistemas de adsorção com modulação de pressão, descaracterizando-a como totalmente limpa. (GURLIT, GUILLAUMON e COETTO, 2021).

De qualquer modo, o hidrogênio azul possui maior potencial de descarbonização em comparação com o hidrogênio cinza, visto que emite menos CO₂ para a atmosfera (o cinza emite cerca de 40 kg de CO₂ a mais por gigajoule (GJ) gerado, conforme LONGDEN, 2022 - vide Figura 4.13).

4.1.2 MUSGO & VERDE

Neste caso, ambas as fontes possuem baixa emissão de CO₂, uma vez que a gaseificação tem como condição a neutralização do carbono a partir da fotossíntese das plantas (hidrogênio musgo). Já na eletrólise, não ocorrem emissões de carbono nos casos de energias oriundas de fontes renováveis (hidrogênio verde). (GURLIT, GUILLAUMON e COETTO, 2021).

A produção de hidrogênio musgo se mostra mais vantajosa em vista dos valores mais vantajosos de etanol e sua transformação de biomassa para hidrogênio. A partir de 2040, há a perspectiva de que o hidrogênio verde se torne mais vantajoso, considerando a tendência de fortalecimento nos investimentos em tecnologias para utilização em fontes limpas e renováveis, bem como diante do fato de que emite menos CO₂.

4.1.3 AZUL & VERDE

A ideia da comparação do hidrogênio verde com o azul não deve ser pautada apenas pela emissão de CO₂ e no custo de produção. Utopicamente, a solução seria a utilização de hidrogênio azul por alguns anos até o fortalecimento da produção do hidrogênio verde, que se tornará mais viável (seja economicamente ou tecnologicamente) entre os anos de 2030 e 2040.

A Figura 4.12 apresenta um gráfico emissão de CO₂ por categoria de hidrogênio.

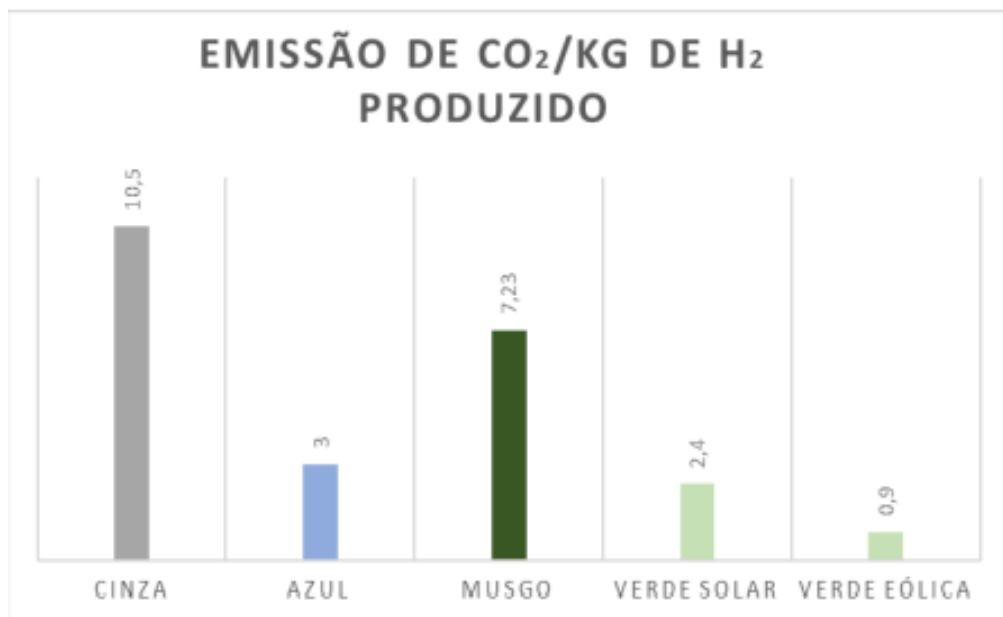


Figura 4.13 - Gráfico emissão de CO₂ por categoria de hidrogênio

Fonte: Dados de Gurlit, Guillaumon E Coetto (2021), Fukurozaki (2011) e Cetinkaya et al. (2012)

5 DISCUSSÕES

5.1 INVESTIMENTOS – BRASIL X MUNDO

Guiada pelas tendências e acordos mundiais, a América Latina apresenta um cenário promissor para a produção de energia limpa, no qual o hidrogênio com baixo teor de carbono será um dos principais vetores desta mudança.

Com base no contexto apresentado, o Chile contabilizou diversas oportunidades de substituição da matriz energética em suas refinarias e aplicações voltadas a transportes de longas distâncias e cargas pesadas, estabelecendo uma meta de 25 GW de capacidade de eletrólise até 2030, acompanhando as metas definidas aos países da União Europeia. (IEA, 2022)

No cenário brasileiro, o foco principal está voltado para os complexos offshore com processos de licenciamento abertos no Ibama, totalizando 46,6 GW de potência instalada. Dessa forma, portos de energia eólica offshore são as principais referências nacionais para o hidrogênio verde, tendo o primeiro projeto anunciado em 2020, no Ceará, com meta pré-definida de produção de 900 mil toneladas de hidrogênio verde anual a partir da eletrólise de 5 GW. Este modelo de produção baseado nas fontes renováveis de energia solar e eólica presentes no Nordeste do Brasil aumenta a competitividade deste produto no mercado, devido aos baixos custos de geração de energia e a oportunidade de desenvolvimento socioeconômico regional. (IEA, 2021)

Segundo artigo publicado pelo IPEA em agosto de 2022, foram anunciados aproximadamente US\$ 27 bilhões de investimento voltados para a construção de usinas produtoras de H₂V, concentrados principalmente nos portos de Pecém, Suape e Açú, localizados respectivamente no Ceará, Pernambuco e Rio de Janeiro. Entre os diversos fatores que justificam o investimento, destacam-se a facilidade logística para exportação, proximidade de polos industriais e fontes de energia renováveis utilizadas na eletrólise.

Segundo pesquisas divulgadas pelo Caderno Setorial ETENE, em 2018 foram utilizadas aproximadamente 75 milhões de toneladas de hidrogênio puro, sendo 40 milhões destinados em indústrias sem separação de gases. A Figura 5.14 representa

a demanda anual global de hidrogênio, categorizada por tipo de indústria cujo produto foi empregado.

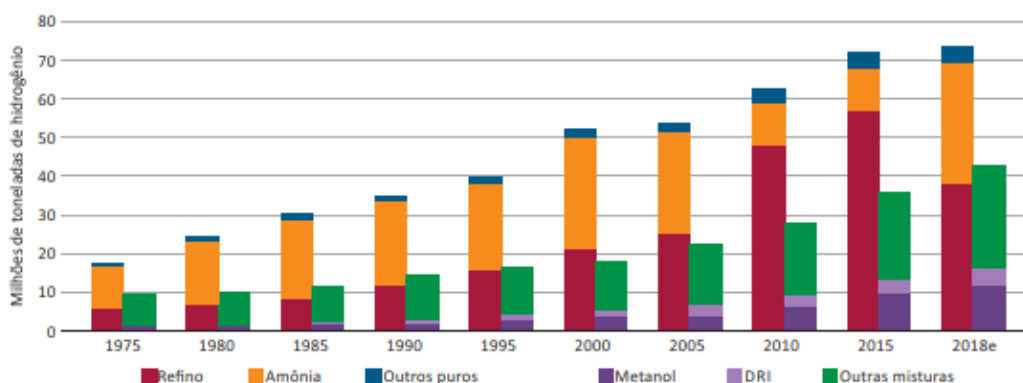


Figura 5.14 - Gráfico da demanda anual global de hidrogênio

Fonte: Adaptado de IEA (2019)

Fica evidente a crescente demanda energética global pelo hidrogênio, alinhada principalmente com as expectativas de sustentabilidade traçadas na COP26. Percebe-se que dentre as diversas aplicações, ganham maior destaque as refinarias e a produção de amônia.

Analisando as diferentes possibilidades de produção do hidrogênio, baseadas principalmente em sua origem, a “International Energy Agency – IEA” realizou um levantamento quantitativo da demanda global de hidrogênio em milhões de toneladas, para cada modelo produtivo, conforme ilustrado na Figura 5.15.

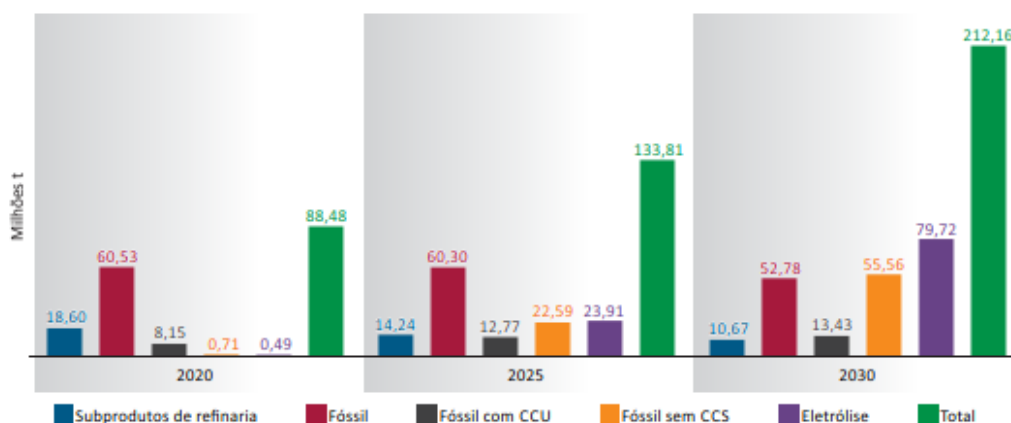


Figura 5.15 - Gráfico da demanda global de hidrogênio por processo produtivo

Fonte: Adaptado de IEA (2021)

Fica evidente ao analisar a Figura 5.15 que a demanda global por energia aumentará, consequência da constante evolução tecnológica. Porém, olhando apenas para os diferentes processos de obtenção do hidrogênio, observa-se a tendência de crescimento dos processos menos poluentes, como a eletrólise. Importante destacar que os combustíveis fósseis continuam representando um percentual elevado na demanda energética total.

Apesar da comprovada eficiência energética e grande impacto na sustentabilidade, existem questões que impedem o avanço acelerado do hidrogênio verde como principal fonte de energia para substituir aquelas não-renováveis comumente empregadas em diversas ocasiões, sendo elas relacionadas com aspectos monetários, distribuição, transporte e armazenamento.

Quando comparado apenas com outras formas de obtenção de hidrogênio, o verde possui orçamento aproximadamente três vezes maior que o azul. Estima-se que a medida cujas tecnologias necessárias forem se desenvolvendo, os custos para produção de hidrogênio verde reduzirão em proporções capazes de aumentar sua competitividade no mercado, atingindo a paridade de custo do cinza até meados de 2030, finalizando 2040 com uma projeção de US\$1 por quilo. (IPEA, 2022)

Estudos focados na viabilidade de sua distribuição e armazenamento enfrentam problemas relacionados com a alta volatilidade e inflamabilidade deste

produto, sendo as alternativas mais seguras a associação juntamente com o gás natural (diluição) ou com a amônia, com extração no destino final. Uma alternativa estudada é a distribuição do hidrogênio diluído em 20% pelos dutos de gás natural. (IPEA, 2022)

A grande questão dos transportes está na incoerência ambiental, pois é o setor responsável por 1/4 do total de emissões de CO₂ global, resultante da queima de combustíveis fósseis. Isso é decorrente da frota de transportes resumidas em carros, caminhões e ônibus. Com isso, transportar um produto verdadeiramente sustentável capaz de eliminar as emissões de gases do efeito estufa em tecnologias ultrapassadas que são causadores destes mesmos gases torna-se incompatível e desinteressante do ponto de vista mundial. (IEA, 2021)

Consequentemente, existem pesquisas avançadas referentes a utilização do hidrogênio como combustível nos setores de aviação e naval. No primeiro caso a ideia fundamental é a substituição do querosene por hidrogênio líquido ou por algum combustível sintético com base no hidrogênio verde. Por outro lado, na frota marítima a ideia é a descarbonização por meio da amônia verde, também sintetizada a partir do hidrogênio verde.

6 CONCLUSÃO

Por tratar-se de um combustível com alto poder calorífico, o hidrogênio tem sido explorado cada vez mais no cenário atual de combate as fontes de energia poluentes. Entretanto, esta tecnologia apresenta dificuldades quanto a sua utilização devido a algumas instabilidades apresentadas, bem como problemas no armazenamento e transporte de energia.

Pensando na cadeia produtiva para se obter o hidrogênio combustível, nota-se uma baixa eficiência nos processos, quando comparados com outros modelos já consolidados no mercado. Dessa forma, a obtenção dessa nova fonte energética torna-se inviável economicamente em um primeiro momento.

Entretanto, analisando puramente os resultados experimentados e concretos da utilização do hidrogênio como vetor para a descarbonização da matriz energética mundial, observam-se resultados satisfatórios a depender do processo produtivo e matéria prima escolhida, ou seja, da categoria de hidrogênio selecionada. Pensando apenas no caso do H₂ verde, verifica-se as baixas emissões de gases causadores do efeito estufa, somando todo o ciclo de vida do combustível, desde a produção até sua queima.

Sendo assim, nota-se que as energias eólica e solar são vantajosas no processo de produção do hidrogênio verde, principalmente como fonte de eletricidade para a eletrólise da água, devido as emissões praticamente nulas de gases poluentes.

Pensando nos objetivos de desenvolvimento sustentável listados no início, nota-se que a exploração deste tipo de energia converge com os planos determinados pela ONU, atendendo em suma as metas de descarbonização mundial, desenvolvimento de energias limpas, além das evidentes consequências positivas causadas na qualidade de vida e variações climáticas oriundas do efeito estufa.

A questão importante que circunda essa tecnologia está no fato da viabilização dos processos, pois ela é inegavelmente positiva sob o aspecto sustentável, foco principal desta pesquisa.

Existe também uma lacuna que iniciou debates recentes entre pesquisadores relacionada com as consequências de usar o hidrogênio como fonte de energia. Basicamente, apesar de não emitir gases causadores do efeito estufa, o resultado de sua combustão gera vapor de água para a atmosfera. Esse vapor pode ser responsável por um incremento significativo na umidade do ar, bem como precipitações.

Esse aumento do vapor de água na atmosfera, devido ao efeito estufa, também contribui para o aquecimento global, levando a mudanças climáticas e efeitos significativos em diferentes regiões do mundo.

Sendo assim, torna-se indispensável um estudo voltado para tópicos ambientais, como a alterações climática em regiões cuja matriz energética seja baseada no hidrogênio, mas também estudos voltados para a saúde dos seres vivos e consequências que podem ser originadas pelo súbito aumento na umidade do ar.

REFERÊNCIAS

Acar, C., Dincer, I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. International journal of hydrogen energy, 39, 1 -12, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.060>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorio-ranking-tarifas>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

ALMEIDA, Rafaela Oliveira de; RODRIGUES, Vinicius Souza. **Avaliação da descarbonização da matriz energética brasileira por meio da produção de hidrogênio verde.**

ASHIK, U.P.M; Wan Daud, W.M.A; HAYASHI, Jun-ichiro. A review on methane transformation to hydrogen and nanocarbon: Relevance of catalyst characteristics and experimental parameters on yield. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 76, 2017, Pages 743-767. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.088>>. Acesso em 06 de março de 2023.

Aziza, M., Darmawan, A., Juangsa, F., B. Hydrogen production from biomasses and wastes: A technological review. International Journal of Hydrogen Energy, v.46, p. 33756- 33781, 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.189>>. Acesso em 06 de março de 2023.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia.** 2021.

BONACIN, Juliano Alves; MONTABONE, Paulo; GONÇALVES, Renato Vitalino. **Hidrogênio verde: como o Brasil pode se tornar polo de produção do combustível do futuro**[Entrevista a Igor Savenhago]. G1: O Portal de Notícias da Globo, 2022.

Caderno Setorial ETENE 2021 – Banco do Nordeste do Brasil S.A. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/etene/caderno-setorial>>. Acesso em 04 fevereiro de 2023

Carvalho, Joaquim Francisco de. **"Combustíveis fósseis e insustentabilidade.** "Ciência e cultura", 2008

CAVALCANTI, Clóvis. **Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental**. Estudos avançados, v. 24, p. 53-67, 2010.

CO2: os gráficos que mostram que mais da metade das emissões ocorreram nos últimos 30 anos. BBC News, Brasil, 8 de novembro de 2021. Disponível em <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>>. Acesso em 06 de julho de 2022. 77.

DA FONSECA, Roberto Giannetti. **A era do hidrogênio verde no século XXI**. Inovação & Desenvolvimento: A Revista da FACEPE, v. 1, n. 8, p. 40-45, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS. Brasília, 2022a. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>>. Acesso em 30 de março de 2023

FUKUROZAKI, S. H. Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa e energia solar fotovoltaica. 2011. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

GAMBETTA, F. Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu. 2010. 163 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_059ac9680a4020bbc9444532ba87b235>. Acesso em 04 fevereiro de 2023

GOEKING, Weruska. **Da máquina a vapor aos softwares de automação**. Portal O setor elétrico, Santa Cecília, SP, 2010.

GONÇALVES, Renato Vitalino. **Crise energética faz nascer o “Hidrogênio Verde”**: IFSC/USP aposta em fotossíntese artificial para gerar combustível renovável.[Depoimento à Rui Sintra]. Portal IFSC, 2022.

GRUPO DE TRABALHO DA SOCIEDADE CIVIL PARA AGENDA 2030 DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – GTSC. Brasil, 2022. Disponível em <<https://gtagenda2030.org.br/ods/>>. Acesso em 04 fevereiro de 2023

GURLIT, W., GUILLAUMON, J. e COETTO, H., Hidrogênio Verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. In: McKinsey & Company, 25 de novembro de 2021. Disponível em <<https://www.mckinsey.com/br/ourinsights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidadepara-o-brasil-e-o-mundo>>. Acesso em 02 de abril de 2023

Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural. Brasília, 2022b. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>>. Acesso em 30 de março de 2023.

HOBBSAWM, Eric J. **Da revolução industrial inglesa ao imperialismo**. Forense-Universitária, 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Hydrogen Project Database. Paris, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>>. Acesso em 20 de março de 2023

LEITE, Alexandre César Cunha; ALVES, Elia Elisa Cia; PICCHI, Livia. **A cooperação multilateral climática e a promoção da agenda da transição energética no Brasil**. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 54, 2020.

LONGDEN, Thomas et al. **‘Clean’hydrogen–Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen**. Applied Energy, v. 306, p. 118145, 2022.

MACKAY, David JC. **Sustainable Energy–without the hot air**”. UIT Cambridge, 2008.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. 2022.

OSTADI, M; PASO, K.G; RODRIGUEZ-FABIA, S; ØI, L.E; MANENTI, F; HILLESTAD, M. Process Integration of Green Hydrogen: Decarbonization of Chemical Industries.

In: Energies, v.13, 2020. Disponível em <<https://doi.org/10.3390/en13184859>>. Acesso em 24 de abril de 2023.

PAIVA, Suelya da Silva Mendonça de. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

STEINBERG, Meyer. **Production of hydrogen and methanol from natural gas with reduced CO2 emission**. International journal of hydrogen energy, v. 23, n. 6, p. 419-425, 1998.

UNITED NATIONS. COP26 Pacto Climático de Glasgow. Glasgow, 2021. Disponível em <https://ukcop26.org/wp-content/uploads/2022/05/PORT-COP26-Presidency-Outcomes-TheClimate-Pact.pdf>. Acesso em 04 fevereiro de 2023

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; SMI – SUSTAINABLE MARKETS INITIATIVE. Hydrogen pledges: sustainable markets initiative. Geneva: WBCSD, Nov. 2021. Disponível em: < <https://bit.ly/3AawDns>>. Acesso em 04 fevereiro de 2023