



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUANNA LIMA DE MORAES

O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse
surgido em indústrias e governos na região

Cabo de Santo Agostinho - PE
2022

LUANNA LIMA DE MORAES

O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse
surgido em indústrias e governos na região

Monografia apresentada à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Orlando Centeno Gonzalez

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M828c Moraes, Luanna Lima de
O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região / Luanna Lima de Moraes. - 2022.
71 f. : il.
- Orientador: Felipe Orlando Centeno Gonzalez.
Inclui referências e anexo(s).
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Cabo de Santo Agostinho, 2022.
1. Hidrogênio. 2. Hidrogênio verde. 3. Transição energética. 4. Descarbonização. 5. Economia do hidrogênio. I. Gonzalez, Felipe Orlando Centeno, orient. II. Título

CDD

LUANNA LIMA DE MORAES

O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ___/___/___

Banca Examinadora

Prof. Dr. Felipe Orlando Centeno Gonzalez (Orientador)
UACSA/UFRPE

Prof. Dr. Gerhard Ett (Examinador externo)
FEI

Prof. Dr. Rogério Soares da Silva (Examinador interno)
UACSA/UFRPE

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ildo e Emanoela, são minha base!

A Max, que é o meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e Nossa Senhora por todas as bênçãos pelo caminho percorrido.

A meu amor, Max, que compartilha comigo essa caminhada. Sem seu amor e apoio eu não teria chegado tão longe.

A meus pais, Ildo e Emanoela, eu não teria chegado até aqui sem vocês. Muito obrigada por todo amor, apoio e compreensão. E aos meus irmãos, Poly, Biel e Micka, muito obrigada por tudo, me ouvirem, apoiarem e pela paciência também. Amo todos vocês, sem vocês nada disso seria possível.

Ao Prof. Dr. Felipe Centeno, com quem muito aprendi, por sua orientação, pela grande paciência com as minhas dificuldades e pela amizade.

A todos que de alguma forma, diretamente e indiretamente me ajudaram para a realização desta monografia.

I believe that water will one day be employed as fuel, that hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light, of an intensity of which coal is not capable.

Julio Verne, 1874.

RESUMO

Com o combate às mudanças climáticas como um dos principais impulsionadores, a busca por soluções que levem à descarbonização econômica está aumentando em todo o mundo. Nesse contexto, o hidrogênio verde, denominado quando produzido a partir de fontes renováveis de energia eólica e solar, é considerado uma das principais alternativas, o que tem mobilizado iniciativas em diversos países para desenvolvê-lo. No entanto, ainda há desafios a serem superados, principalmente relacionados aos custos de produção que ainda são muito superiores aos do hidrogênio obtido a partir de fontes fósseis que emitem gases de efeito estufa (GEE). O Brasil possui vantagem competitiva para a produção de hidrogênio verde, devido ao seu forte potencial de energia eólica e solar, bem como a competitividade da energia gerada a partir dessas fontes em relação a outros países. Nesse sentido, diversas empresas nacionais e internacionais têm manifestado interesse em investir na cadeia produtiva brasileira do Hidrogênio Verde. Assim, nasce uma nova indústria no país, abrindo espaços para a atração de vultosos investimentos, principalmente na região Nordeste, face à sua maior competitividade na geração solar e eólica. Em vista disso, este estudo buscou realizar uma revisão dos conceitos gerais do hidrogênio, abordando suas propriedades e características, seu uso como combustível, uma revisão da economia do hidrogênio, bem como aspectos econômicos. Foram vistas aplicações em projetos piloto, que comprovam o uso do hidrogênio como vetor energético em modelos integrados de produção, armazenamento, transporte. Também é feito um breve histórico das ações e iniciativas no mundo e no Brasil em prol do desenvolvimento da indústria do hidrogênio. Concluindo-se que o Brasil desponta como potencial fornecedor de hidrogênio verde em virtude da grande diversidade de fontes renováveis.

Palavras-chave: hidrogênio; hidrogênio verde; transição energética; descarbonização; economia do hidrogênio.

ABSTRACT

With the fight against climate change as one of the main drivers, the search for solutions that lead to economic decarbonization is increasing around the world. In this context, green hydrogen, called when produced from renewable sources of wind and solar energy, is considered one of the main alternatives, which has mobilized initiatives in several countries to develop it. However, there are still challenges to be overcome, mainly related to production costs that are still much higher than those of hydrogen obtained from fossil sources that emit greenhouse gases (GHG). Brazil has a competitive advantage for the production of green hydrogen, due to its strong potential for wind and solar energy, as well as the competitiveness of the energy generated from these sources in relation to other countries. In this sense, several national and international companies have expressed interest in investing in the Brazilian production chain of Green Hydrogen. Thus, a new industry is born in the country, opening spaces for the attraction of large investments, mainly in the Northeast Region, given its greater competitiveness in solar and wind generation. In view of this, this study sought to carry out a review of the general concepts of hydrogen, addressing its properties and characteristics, its use as a fuel, a review of the Hydrogen Economy, as well as economic aspects. Applications were seen in pilot projects, which prove the use of hydrogen as an energy vector in integrated production, storage and transport models. A brief history of the actions and initiatives in the world and in Brazil in favor of the development of the hydrogen industry is also made. In conclusion, Brazil emerges as a potential supplier of green hydrogen due to the great diversity of renewable sources.

Keywords: hydrogen; green hydrogen; energy transition; decarbonization; hydrogen economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Classes tecnológicas de produção de hidrogênio.....	19
Figura 02 - Representação da reforma a vapor - SMR.....	20
Figura 03 - Classificação do hidrogênio em escala de cores segundo o processo de produção...22	
Figura 04 - Eficiências de conversão em processos de produção de hidrogênio.	23
Figura 05 - Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético	26
Figura 06 – Evolução da demanda mundial por hidrogênio.....	27
Figura 07 – Diagrama Dos Processos de Eletrólise da Água	31
Figura 08 – Faixas de custos da produção de hidrogênio.....	36
Figura 09 – Levantamento de preços do hidrogênio no mercado da Califórnia, Estados Unidos, por processo de produção, no primeiro trimestre de 2020	36
Figura 10 - Projeções das faixas de custo para projetos de grande escala.	37
Figura 11 – Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio	38
Figura 12 – Projeção de redução de custos de produção de hidrogênio a partir de eletrólise.	38
Figura 13 - Competitividade de aplicações do hidrogênio até 2030	40
Figura 14 - A primeira usina de energia eólica e hidrogênio em grande escala do mundo (Utsira, Noruega).....	42
Figura 15 - Demonstração Operacional da Planta em Utsira.	43
Figura 16 - Projeto P&D Wind2H2 em Boulder, Colorado	44
Figura 17 - Projeto BIG HIT Construindo Sistemas Verdes Inovadores de Hidrogênio em um Território Isolado: um Piloto para a Europa.....	46
Figura 18 - Eletrolisador PEM da ITM Power instalado em Orkney.....	46
Figura 19 - Usina de H2V Iberdrola para uso industrial na empresa Fertiberia.....	48
Figura 20 - Investimento anual em pesquisa e desenvolvimento em tecnologias do hidrogênio por país.....	50
Figura 21 - Eixos temáticos do PNH2.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
EQHHPP - Euro Quebec Hydro Hydrogen Pilot
EUA - Estados Unidos da América
FCH JU - Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
FIEC - Federação das Indústrias do Estado do Ceará
GEE - Gases de efeito estufa
H2V - Hidrogênio verde
HUB - Eixo Central de Investimento
IPHE - Parceria Internacional para o Hidrogênio e as Células a Combustível na Economia
MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia
MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDR - Ministério do Desenvolvimento Regional
MEC - Ministério da Educação
MME - Ministério de Minas e Energia
MRE - Ministério das Relações Exteriores
NREL - National Renewable Energy Laboratory
NWTC - National Wind Technology Center
ODS - Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
PEM - Polymer electrolyte membrane
PNE 2050 - Plano Nacional de Energia 2050
PNH2 - Programa Nacional de Hidrogênio
PROCAC - Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível
PROH2 - Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
SMR - Steam methane reforming
SPE - Solid Polymer Electrolyte,
UE - União Europeia
UFC - Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	HIDROGÊNIO	17
4.1	PROPRIEDADES DO HIDROGÊNIO	17
4.2	PROCESSOS DE OBTENÇÃO E A CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO	19
4.3	ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	23
4.4	O HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO	24
4.5	HIDROGÊNIO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	28
5	HIDROGENIO VERDE	30
6	A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO	33
6.1	ASPECTOS ECONÔMICOS	34
7	APLICAÇÕES P&D E INDUSTRIAIS	40
7.1	A USINA DE ENERGIA EÓLICA E HIDROGÊNIO DE UTSIRA	41
7.2	PROJETO WIND2H2	43
7.3	PROJETO BIG HIT	45
7.4	USINA DE HIDROGÊNIO VERDE PARA USO INDUSTRIAL NA EUROPA ...	47
8	PROGRAMAS GOVERNAMENTAIS DE INCENTIVO AO H2V	49
9	HIDROGÊNIO VERDE NA MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL	56
10	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	61
	ANEXO A – TABELA PERIÓDICA	68
	ANEXO B – MASSA MOLAR, CONSTANTE DO GÁS E PROPRIEDADES DO PUNTO CRÍTICO	69
	ANEXO C – CALORES ESPECÍFICOS DE GÁS IDEAL PARA GASES COMUNS	70
	ANEXO D – PROPRIEDADES DE LÍQUIDOS, SÓLIDOS E ALIMENTOS COMUNS	71

1 INTRODUÇÃO

O mundo inteiro está em busca de soluções que levem à descarbonização da economia, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), na atmosfera, principal causa das mudanças climáticas. Nesse sentido, o Acordo de Paris¹, celebrado em 2015, representa um marco importante, uma vez que estabeleceu como meta limitar o aquecimento global abaixo de 1,5 °C, em relação à era pré-industrial (ECYCLE, 2021).

Para reduzir o aquecimento global e garantir um futuro sustentável para o planeta, são necessárias reduções significativas nas emissões de GEE, especialmente CO₂ e CH₄, (OECD, 2021). Para tanto, é necessário substituir os combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis. Uma das formas de viabilizar essa transição energética para alcançar uma economia de baixo carbono é utilizar o hidrogênio (H₂) de fontes limpas e renováveis em processos industriais como combustível alternativo aos recursos fósseis (BEZERRA, 2021).

Após décadas sendo visto como uma fonte de energia inovadora e de alto potencial para o futuro, mas com enormes desafios tecnológicos e comerciais, o hidrogênio tornou-se um alvo estratégico de governos e indústrias em todo o mundo. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Assim, além dos mercados de fertilizantes, refino e outros usos (gás para processos industriais e hospitalares), é provável que novos mercados para o hidrogênio sejam encontrados em transporte, geração de energia, armazenamento de energia, produção de combustível sintético (por exemplo, síntese de metano), em um *blending*² com gás natural e outros processos industriais combinados (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Com destaque para o armazenamento de energia, o hidrogênio pode ser utilizado para garantir a segurança dos sistemas energéticos e para cobrir o déficit de energia nos períodos de menor disponibilidade das energias renováveis variáveis, como a energia eólica e solar (WIDERA, 2020). Métodos adequados de armazenamento de energia podem ajudar a lidar com a intermitência das fontes de energia renovável e, assim, contribuir para a descarbonização de vários setores, especialmente a mobilidade e diminuir a dependência das economias mundiais dos combustíveis fósseis (WIDERA, 2020).

O mercado do hidrogênio que se apresenta é gigantesco. De acordo com o Hydrogen Council³, em 2050 espera-se que o mercado de hidrogênio represente cerca de 20% de toda a

¹ O Acordo de Paris é um tratado internacional contra as mudanças climáticas causadas pelo ser humano. Seu principal objetivo consiste em combater o aumento da temperatura terrestre provocada pelo aquecimento global. Pode ser considerado o principal compromisso assumido para frear o aquecimento global no mundo, já que poucos países cumpriram as metas estabelecidas no documento predecessor, o Protocolo de Kyoto.

² *Blending* significa misturando, nesse contexto trata-se da mistura dos dois gases em proporções adequadas.

³ O Hydrogen Council é uma iniciativa global liderada por CEOs de 132 empresas líderes em energia, transporte, indústria e investimento como uma visão unida e de longo prazo para desenvolver a economia do hidrogênio.

demanda global de energia. Como resultado, o tamanho do mercado de hidrogênio é estimado em US\$ 2,5 trilhões até 2050, o equivalente a metade do mercado de petróleo atual (ALVARENGA, 2021).

Entretanto, para alcançar todo esse potencial é necessário que a produção desse hidrogênio seja livre de carbono. Os meios tradicionais, bem estabelecidos e desenvolvidos de produção de hidrogênio geram grandes volumes de CO₂, comumente chamado de hidrogênio cinza (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). O ideal é a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água utilizando energia elétrica obtida de fonte eólica ou solar (PALHARES, 2016), sendo chamado de hidrogênio verde (H2V).

Nesse sentido, cada vez mais abordado nos fóruns climáticos, o H2V é uma das alternativas mais promissoras para descarbonizar a economia. No entanto, atingir esse objetivo é um grande desafio, principalmente por razões econômicas, pois a produção de H2V ainda é cara em comparação com outras formas utilizadas para obtê-lo. (BEZERRA, 2021).

Portanto, viabilizar a transição energética exigirá: avanços tecnológicos na produção, uso, transporte e armazenamento de H₂; definir os marcos regulatórios apropriados nos países produtores e consumidores e a adoção de políticas e estratégias econômicas que possibilitem e estimulem a criação de novas cadeias produtivas à base de H2V (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). Desse modo, uma vez que se torne real, essa nova indústria constituirá uma enorme janela de oportunidades, podendo beneficiar regiões que possuam elevado potencial para a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, a exemplo o Nordeste brasileiro (BEZERRA, 2021).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sobre a tecnologia do hidrogênio, em particular, o segmento do H2V. É constituída por cinco tópicos, começando por apresenta um breve histórico do hidrogênio, bem como suas propriedades, forma de obtenção e classificação, seu armazenamento e seu uso do como vetor energético. No segundo são apresentados alguns conceitos relacionados ao hidrogênio verde, as formas de geração, a economia do hidrogênio, bem como seus custos e aspectos econômicos. No terceiro, são mostrados projetos piloto do uso de hidrogênio verde como vetor energético, que põe em prática o modelo totalmente integrado de produção, armazenamento, transporte e utilização de hidrogênio, três deles na Europa e um nos Estados Unidos. No quarto discorre-se um breve histórico de ações e iniciativas no mundo e no Brasil em prol do desenvolvimento da indústria do hidrogênio, bem como os projetos em desenvolvimento, finalmente são abordadas as projeções de aplicação do hidrogênio no Brasil e propostas para o contínuo desenvolvimento dessa nova economia.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma revisão das tecnologias ligadas ao hidrogênio verde como suporte ao recente interesse local no assunto.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer uma revisão dos conceitos básicos do hidrogênio verde;
- Fazer um levantamento dos métodos de geração e armazenamento de H₂V considerando todos os níveis de maturidade tecnológica, também como seus custos e impacto ambiental;
- Apresentar a aplicação de hidrogênio em sistemas combinados de geração, transporte e armazenamento já implementados ou em construção;
- Identificar os principais fabricantes de soluções de aplicações combinadas de hidrogênio, no Brasil e no mundo;
- Fazer um levantamento dos programas governamentais de incentivo ao hidrogênio no Brasil e no mundo, assim como apresentar a relação entre o hidrogênio verde e as metas de descarbonização;
- Analisar as possibilidades de aplicação do hidrogênio verde no Brasil.

3 JUSTIFICATIVA

Para limitar as mudanças climáticas causadas pelo aumento global das emissões de CO₂, devem ser encontradas soluções para a geração de energia que sejam neutros em carbono e sustentáveis. Devido a isso, é previsto que a cota de energia renováveis na matriz energética mundial cresça consideravelmente, a parcela prevista de produção deve atingir cerca de 36% até 2020, 45-60% até 2030 e mais de 80% em 2050, sendo as principais fontes solar e eólica (WIDERA, 2020). Essas fontes de energia renováveis apresentam uma variabilidade significativa, ou seja, são intermitentes, com períodos de alta produção e períodos com nenhuma produção. Portanto, é necessário desenvolver estratégias e ferramentas adequadas para garantir a segurança e flexibilidade do sistema elétrico proporcionar uma integração efetiva à rede elétrica, assim, é necessária gestão da demanda e armazenamento de energia.

Em virtude disso, o hidrogênio, terceiro elemento mais abundante e o primeiro mais leve do mundo, que possui uma gama de aplicações industriais, desde o refino até a petroquímica e a fabricação de aço, se mostra protagonista nesse cenário, por ser uma fonte rica de energia, muito mais eficiente do que outros combustíveis, tais como a gasolina e o diesel, além de extremamente versátil, podendo ser aplicado para descarbonizar os segmentos de transporte (marítimo e transporte pesado), geração elétrica, atuar no armazenamento de energia, etc. Entretanto essa descarbonização só é completa quando o hidrogênio é produzido a partir de fontes renováveis, tais como eólica e solar, o chamado hidrogênio verde (H2V).

Sistemas de armazenamento de energia de hidrogênio criam inúmeros benefícios potenciais em relação à descarbonização e resiliência da rede de fornecimento de energia. Desde o final da década de 90 é sabido que o hidrogênio pode ser usado com sucesso para armazenar a energia e que pode ser novamente transformada em eletricidade (OGDEN, 1999). Isso é particularmente importante no caso de geração de energia excedente a partir de fontes renováveis (JOUHARA, 2018).

Com o contínuo avanço da tecnologia e a queda do custo da energia renovável, começa a se tornar possível a produção em massa de H2V, ambientalmente sustentável e protagonista na transição energética. Atualmente, o Brasil ainda não produz H2V em escala comercial (FERNANDES, 2022), mas conta com vários projetos assinados e em andamento,

principalmente no Nordeste, e à medida que esses projetos ganham forma, é possível que o país possa virar um grande protagonista no mercado.

Estados como Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia têm recebido especial interesse tanto do governo como de multinacionais, como a Neoenergia e Qair, devido ao seu potencial de produção de H2V, principalmente das fontes solar e eólica, potencializadas pela sua localização geográfica extremamente favorável a exportação. Assim, com essa nova atividade econômica em pleno desenvolvimento a necessidade por profissionais locais que entendam o assunto e a própria participação das instituições de ensino e pesquisa se torna cada vez maior.

4 HIDROGÊNIO

O hidrogênio foi descoberto em 1766, pelo físico-químico Henry Cavendish, quando em um experimento colocou ácido em ferro, ele observou a formação de bolhas, que queimavam e provocavam explosões com o ar, ele o chamou de “ar inflamável”. Mais tarde, Lavoisier decidiu nomear esse elemento com o nome de hidrogênio, do latim *Hydrogenium*, que em grego significa formação de água, pois do produto dessas explosões havia a formação de água. (SIBLERUD, 2001).

É um dos elementos mais comuns na natureza, com características únicas, isto é, não se assemelha a nenhum outro elemento químico conhecido pelo homem, não sendo nem metal nem ametal. Está presente em aproximadamente 76% da massa do universo e 93% dos átomos (ESTÊVÃO, 2008), mesmo assim é raramente encontrado em sua forma pura, o H_2 , estando sempre combinado com outros elementos, tais como oxigênio, carbono, nitrogênio etc. (LAMEIRAS, 2019). Devido a isso, não pode ser considerado como uma fonte de energia primária, tal como combustíveis fósseis ou nuclear, mas sim como um importante vetor de energia (SANTOS, 2004), sendo obtido a partir da energia solar, eólica, de combustíveis fósseis (petróleo ou gás natural) ou energia nuclear, podendo ser armazenado como um líquido, gás ou composto químico, e por sua vez convertido em energia quando acontece a sua combustão em motores, fornos ou turbinas, por processos eletroquímicos, etc.

4.1 PROPRIEDADES DO HIDROGÊNIO

O átomo de hidrogênio, símbolo químico H, é composto por apenas um próton e um elétron, o que o diferencia entre os outros elementos. Como o hidrogênio não se encaixa em nenhum dos grupos da tabela periódica, é complicado definir sua posição (Ver Anexo I). Devido a sua natureza eletropositiva, costuma ser colocado no início do grupo I (metais alcalinos), contudo, em algumas ocasiões seu comportamento se assemelha aos halogênios, onde aceitam um segundo elétron formando um íon mono negativo.

O hidrogênio é o elemento mais leve, sendo o núcleo do seu isótopo mais comum constituído apenas por um próton. O hidrogênio molecular/puro (H_2) existe como dois átomos

ligados que compartilham entre si os seus dois únicos elétrons através de uma ligação covalente⁴.

A temperatura e pressão normais, 0 °C e 1 atm, ele se apresenta como um gás extremamente inflamável, inodoro, insípido, incolor, insolúvel em água e extremamente mais leve que o ar. No estado líquido, o hidrogênio tem que estar armazenado numa temperatura de - 253 °C, em sistemas de armazenamento conhecidos como sistemas criogênicos. Para temperaturas acima, o hidrogênio é armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão.

O hidrogênio é extremamente inflamável no ar, entre 4% e 75% por volume de ar. A energia necessária para inflamá-lo é muito pequena e, em algumas condições, pode ocorrer auto inflamação (LARMINIE, DICKS, 2003). A energia necessária para a ignição de uma mistura hidrogênio/ar é de apenas 0,04 mJ, contra 0,25 mJ dos hidrocarbonetos. A chama do hidrogênio é muito quente, sendo a sua densidade energética de 38 kWh/kg contra a densidade da gasolina que é de apenas 14 kWh/Kg (LINARDI, 2008). É fato que todas essas características colocam o hidrogênio como um combustível bastante eficiente, entretanto, também traz grandes implicações para seu uso, devido a sensibilidade na ignição (ESTÊVÃO, 2008).

A quantidade de energia por unidade de massa que o hidrogênio possui, é maior do que qualquer outro combustível conhecido 120,7 kJ/gr. A energia contida em 1,0 kg de hidrogênio corresponde à energia de 2,75 kg de gasolina (LINARDI, 2008). Quando resfriado, até o estado líquido, o hidrogênio, ocupa um espaço equivalente a 1/700 do que ocuparia no estado gasoso, a sua densidade é de 0,08967 kg/m³, ou seja, o ar é 14,4 vezes mais denso, já que a $\rho_{\text{ar}} = 1,2928$ kg/m³. A temperatura de mudança de fase de líquido para gasoso é de -252,88 °C e de fusão é -259,20°C (AZEVEDO, 2021). Quando submetido a uma pressão muito baixa, o hidrogênio tende a existir na forma de átomos individuais, no entanto quando submetidas a alta pressão, as moléculas mudam a sua natureza e o hidrogênio torna-se espécie de líquido metálico. Ver Anexos II, III, IV e V.

⁴ Ligação covalente é caracterizada pelo compartilhar de um ou mais pares de elétrons entre átomos, causando uma atração mútua entre eles. A força dessas ligações é maior que a das interações intermoleculares, normalmente ocorrem entre átomos com eletronegatividade similar e alta, dos quais remover completamente um elétron requer muita energia.

4.2 PROCESSOS DE OBTENÇÃO E A CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO

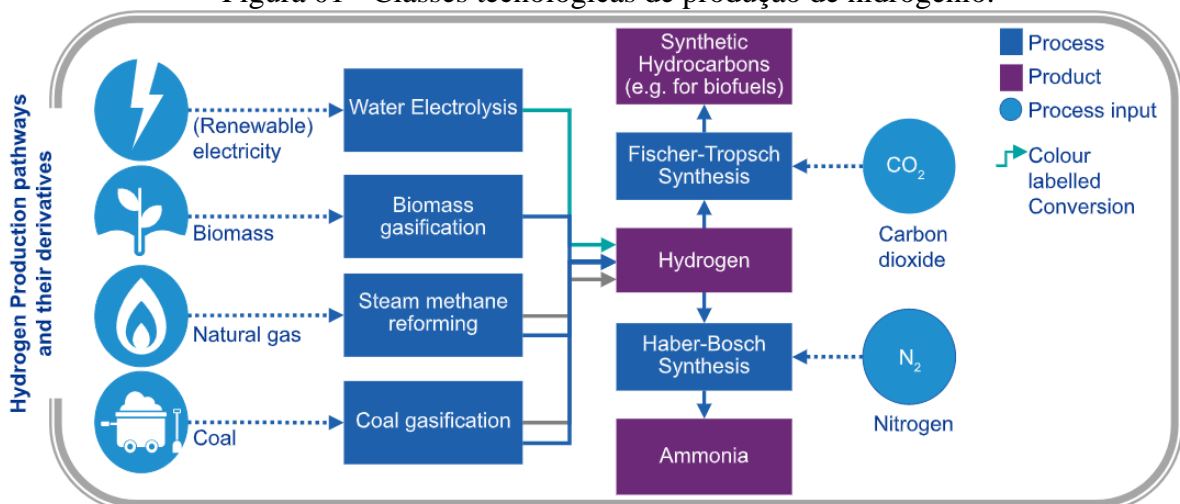
Sendo quimicamente ativo, o hidrogênio raramente permanece sozinho como um único elemento (H_2), estando associado ao petróleo, carvão, metano, água, gás natural, proteínas, hidratos de carbono e em todo o tipo de vegetação. Assim, é necessária uma separação dos átomos de hidrogênio dos restantes elementos aos quais se encontra associado, mediante consumo de energia. Essa separação pode ser obtida em processos específicos ou como subproduto, onde o H_2 é coletado em diferentes processos industriais.

Para a separação do hidrogênio estão disponíveis diversos processos. Em laboratório é obtido pela reação de ácidos com metais (MOREIRA, 2018):

- Reação de hidretos metálicos
- Reação de liga de ferro - titânio
- Cloroplastos artificiais (Melvin Klain)
- Reação de liga de níquel - magnésio
- Reações de metais com ácidos

Industrialmente, a obtenção de hidrogênio pode ser feita a partir de uma vasta gama de matérias-primas, de modo que os processos para a sua obtenção são divididos em quatro classes, que podem ser observados na Figura 01:

Figura 01 - Classes tecnológicas de produção de hidrogênio.



Fonte: KPMG, 2021.

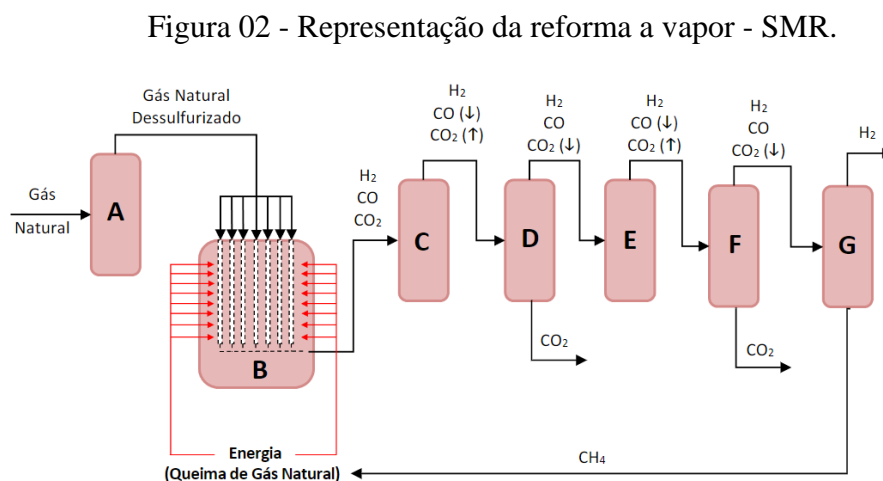
O processo de produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis é considerado o principal processo para obtê-lo. O gás natural é a principal fonte utilizada, respondendo por

cerca de 75% da produção global de hidrogênio, seguido pelo carvão, que responde por 23%. O restante da produção de hidrogênio (cerca de 2%) vem de petróleo, eletricidade e, em alguns lugares, biomassa. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019; SOUZA, 2018).

Dentre os combustíveis citados, o gás natural se apresenta como o de maior destaque na produção de H_2 , já que é a fonte mais utilizada, justificada pela maior razão hidrogênio/carbono dentre os combustíveis fósseis, ou seja, há uma menor liberação de CO_2 durante o processo de produção do H_2 , quando comparado à gaseificação do carvão, por exemplo.

Os processos de produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis utilizam hidrocarbonetos líquidos, carvão ou gás natural como alternativas de matérias primas, tendo como subproduto do processo o CO_2 . A produção a partir destas matérias-primas é realizada principalmente através de tecnologias de reforma para o gás natural (*steam methane reforming* (SMR)), e por gaseificação nos casos de óleos ou carvão

A SMR é um processo contínuo de reação catalítica do gás natural com vapor d'água, formando H_2 , além de CO , CO_2 e, de forma indesejada, C , na forma de fuligem. A Figura 2, mostra de forma esquemática, uma planta de geração de hidrogênio. O gás natural a ser utilizado no processo é purificado (A), sendo em seguida reformado (B). Os gases produzidos são então enviados para as etapas de conversão adicionais, nas quais são produzidos volumes adicionais de H_2 a partir da conversão do CO a CO_2 para posterior remoção. Em seguida esta corrente é enviada para mais uma etapa de conversão final com o intuito de converter o CO e o CO_2 residuais a CH_4 , que é retornado para ser queimado e fornecer energia ao sistema. Ao final destas etapas, obtêm-se o hidrogênio de alta pureza (SOUZA, 2018).



Fonte: SOUZA, 2018.

A produção a partir de biomassa se refere à obtenção de hidrogênio a partir de processos nos quais são utilizados sistemas biológicos, ou processos nos quais são empregados, como matéria-prima, qualquer tipo de matéria orgânica renovável de origem vegetal, animal ou procedente da transformação natural ou artificial dela. Os processos biológicos envolvem a utilização de microrganismos capazes de produzir o H₂ durante seus processos metabólicos. Já os processos que se utilizam da biomassa como matéria-prima envolvem transformações químicas e/ou termoquímicas deste material, produzindo H₂ além de diversos outros produtos, tais como: CO, carbono sólido (C), CO₂, dentre outros (SOUZA, 2018), no caso da gaseificação da biomassa, o produto também é rico em monóxido de carbono, requerendo uma etapa de separação para se obter hidrogênio puro.

A reforma de biocombustíveis é outra opção para produção de hidrogênio. Em específico, a reforma a vapor do etanol que é bastante desenvolvida, e relevante para o setor de transportes, já que evita as dificuldades associadas ao armazenamento do hidrogênio (MARIN NETO et al., 2004).

A produção de hidrogênio a partir da água abrange uma série de tecnologias disponíveis, sendo a eletrólise da água a mais comum e de utilização mais difundida; o processo de eletrólise da água consiste na decomposição química da água nos elementos que a constituem, o hidrogênio e oxigênio, utilizando eletricidade, proveniente de fontes renováveis, mais especificamente a energia solar ou eólica, fazendo com que o processo seja neutro em carbono.

Tanto a utilização de combustíveis fósseis quanto de biomassa para a obtenção de hidrogênio gera emissões de dióxido de carbono (CO₂). Entretanto, nos processos a partir de biomassa, o CO₂ é capturado pelas plantas para seu crescimento e produção da mesma, tornando o processo neutro em carbono, diferente dos processos utilizando combustíveis fósseis (SOUZA, 2018). Outra possibilidade para neutralização do CO₂ gerado é sua captura e armazenamento, o que no caso da biomassa possibilitaria que o processo fosse negativo em carbono (captura de CO₂ maior do que a geração ao longo do ciclo de vida).











Além dos processos de obtenção de hidrogênio citados, cabe comentar também a descoberta de reservatórios geológicos de hidrogênio natural em Mali (PRINZHOFER et al., 2018). Na natureza, diversos processos naturais podem resultar na produção geológica de hidrogênio, entre eles a radiólise da água⁵, a serpentinização e a oxidação do minério de ferro

⁵A radiólise da água é processo de obtenção de H₂ a partir da incidência de radiação ionizante.

(ZGONNIK, 2020). Ainda que já haja uma importante literatura científica sobre o tema, essa opção é pouco conhecida, devido ao seu baixo aproveitamento econômico.

As diferentes formas de produção/obtenção do hidrogênio podem ser classificadas de acordo com a principal matéria-prima, com o processo de produção e com a quantidade de emissões de CO₂ de acordo com um esquema de cores (Figura 03), utilizado para facilitar a referência ao tipo de hidrogênio em estudos.

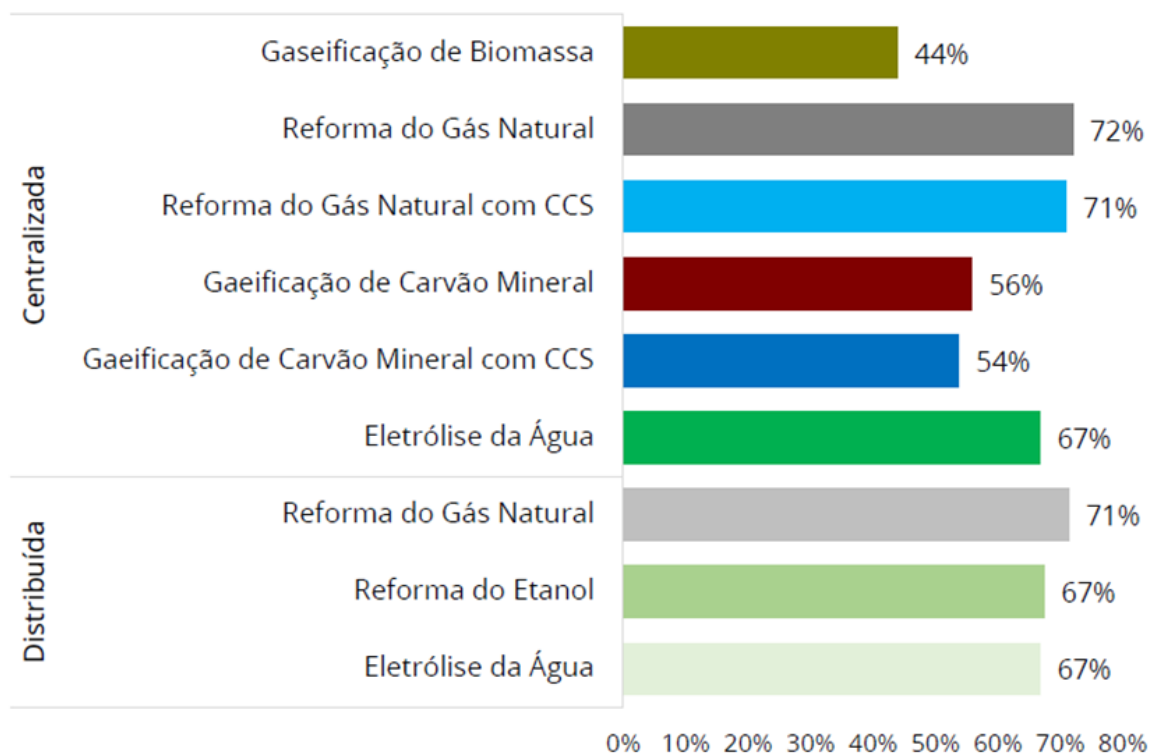
Figura 03 - Classificação do hidrogênio em escala de cores segundo o processo de produção.

	Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS
	Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha) sem CCUS
	Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
	Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
	Turquesa	Pirólise do metano sem gerar CO ₂
	Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
	Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
	Rosa	Fonte de energia nuclear
	Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
	Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

Fonte: Adaptado de EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021.

Além da classificação por cores, todos esses processos de obtenção do hidrogênio podem ser distinguidos de acordo com sua eficiência de conversão em hidrogênio, os valores de eficiência são mostrados na Figura 04 para os principais processos de produção de hidrogênio. Os processos centralizados referem-se à produção centralizada do gás, para seguir para distribuição e uso, enquanto os processos distribuídos referem-se aos processos descentralizados de hidrogênio, em que ele é produzido no local de uso.

Figura 04 - Eficiências de conversão em processos de produção de hidrogênio.



Fonte: PNNL (2020)

4.3 ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO

O hidrogênio pode ser armazenado como um gás comprimido, na sua forma líquida ou como hidretos metálicos (AMOS, 1998).

Para armazenar o hidrogênio no estado gasoso a forma mais comumente usada, é como gás comprimido, é a mais simples, já que os únicos equipamentos necessários são o compressor e um vaso de pressão. A maior deficiência dessa forma de armazenamento é sua baixa densidade de armazenamento, que depende totalmente da pressão (AMOS, 1998). É uma questão proporção: quanto maior a pressão de armazenamento, mais elevados os investimentos de capital, em específico os compressores, e maiores os custos operacionais.

O armazenamento em gasodutos também pode ser uma opção para o H₂ gasoso. Conforme sinalizado por Silva, 1991, gases são comumente transportados através de gasodutos. Uma rede de gasodutos funciona como um grande reservatório que opera em pressões intermediárias entre os gasômetros e os cilindros pressurizados. A temperatura do gás varia com a temperatura ambiente e o volume corresponde à extensão e ao diâmetro da tubulação. Considerando um gasoduto de 1.000 km de extensão, 0,50 m de diâmetro e operando com uma pressão de 20 atm, tem-se um total de 325 toneladas de H₂ (SANTOS, 2004).

Entretanto, o volume de gás armazenado varia praticamente na mesma proporção da variação da pressão de operação, assim considerando sua extensão e volume, uma pequena variação na pressão de operação resultaria em uma grande alteração na quantidade de gás acumulado no sistema. Como desvantagens da utilização de gasodutos para o armazenamento de hidrogênio enumera-se além da sua longa extensão, problemas com a manutenção da rede de dutos.

O armazenamento como hidrogênio líquido, é necessária a liquefação do hidrogênio, os processos de liquefação utilizam uma combinação de compressores, trocadores de calor, expansores e válvulas para obter o resfriamento desejável (SANTOS, 2004). A maior preocupação no armazenamento de hidrogênio líquido é diminuir perdas por vaporização. Como o hidrogênio é armazenado como um fluido criogênico que está na sua temperatura de ebulição, qualquer transferência de calor para o fluido faz com que o hidrogênio evapore. Os tanques para armazenamento de hidrogênio líquido, em sua maior parte, são esféricos, pois este formato representa a menor superfície para troca de calor por unidade de volume (AMOS, 1998).

Tanques cilíndricos também podem ser utilizados devido à maior facilidade e ao menor preço para sua construção, quando comparados aos tanques esféricos. Além disso, a relação entre volume e superfície dos tanques cilíndricos é quase a mesma dos tanques esféricos (AMOS, 1998). O volume típico de tanques de hidrogênio varia entre 110 a 5.300 kg. As plantas industriais para liquefação de hidrogênio têm taxas de produção que variam entre 380 a 2.300 kg/h (AMOS, 1998).

4.4 O HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO

Segundo Silva (1991), mesmo já tendo sido usado como combustível para motores no século XIX, o hidrogênio ainda é pouco explorado como fonte de energia. Apenas no início do século XX há os primeiros registros de uso prático do hidrogênio no setor de transportes. Como exemplos cita-se o seu uso em motores ou como preenchimento para balões e dirigíveis, caso do LZ de Ferdinand Von Zeppelin, foi no pós Segunda Guerra mundial, com o avanço tecnológico e a redução de custos obtidos é que o hidrogênio passou a ser utilizado em larga escala no setor industrial. Logo depois, com a corrida espacial e o intenso investimento em tecnologia e em pesquisas científicas foram desenvolvidas as modernas tecnologias de geração energética.

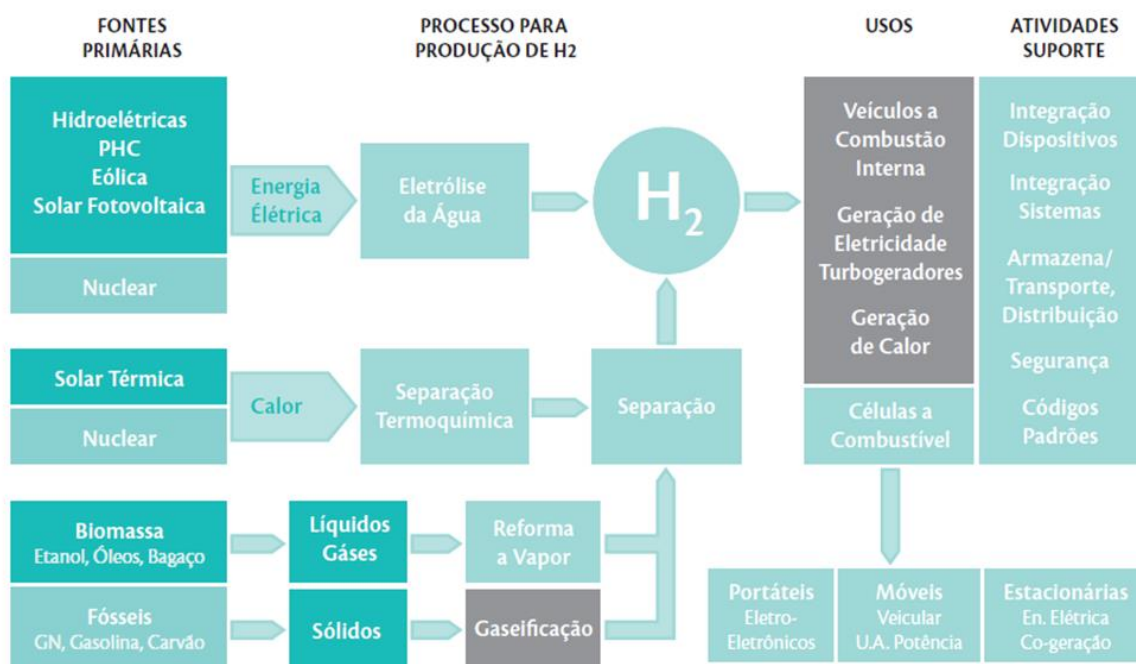
Quando queimado com oxigênio puro (O_2), os únicos produtos são calor e água (H_2O). Quando queimado com ar, constituído por cerca de 68% de nitrogênio (N_2), alguns óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis, num sistema de célula a combustível ⁶, a utilização do H_2 traz vantagens, entre elas a não necessidade de reformadores (equipamento utilizado para extrair o hidrogênio de uma fonte deste combustível, tal como o gás natural), diminuindo o tamanho e custo do sistema (SILVA, 1991).

Siblerud (2001) cita exemplos do uso energético do hidrogênio pelo mundo, tais como a Austrália, que pesquisa o uso do hidrogênio em transportes desde 1970; a Bélgica, que sedia o projeto Euro Quebec Hydro Hydrogen Pilot (EQHHPP), com o objetivo de mostrar como o hidrogênio pode ser versátil; o Canadá, sede da *Ballard Power System*, desenvolvedora e fabricante de células de combustível, o Brasil com as pesquisas da Unicamp usando um Toyota e uma Kombi movidos a hidrogênio; a Alemanha, por meio da Mercedes Benz, com o uso de hidrogênio em automóveis; e o Japão, um dos países mais prósperos na tecnologia do hidrogênio.

Quando é considerado a associação do hidrogênio para conversão em energia elétrica, por meio de células a combustível o coloca como um elemento de integração entre diversas tecnologias, como pode ser observado na Figura 05 (CGEE, 2010).

⁶ Célula combustível é uma célula eletroquímica; basicamente uma bateria em que é consumido um combustível e é liberada energia. É considerada uma bateria em que os reagentes são alimentados continuamente. Os reagentes típicos são o hidrogênio e o oxigênio. O hidrogênio é fornecido do lado do anodo e o oxigênio do lado do catodo.

Figura 05 - Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético



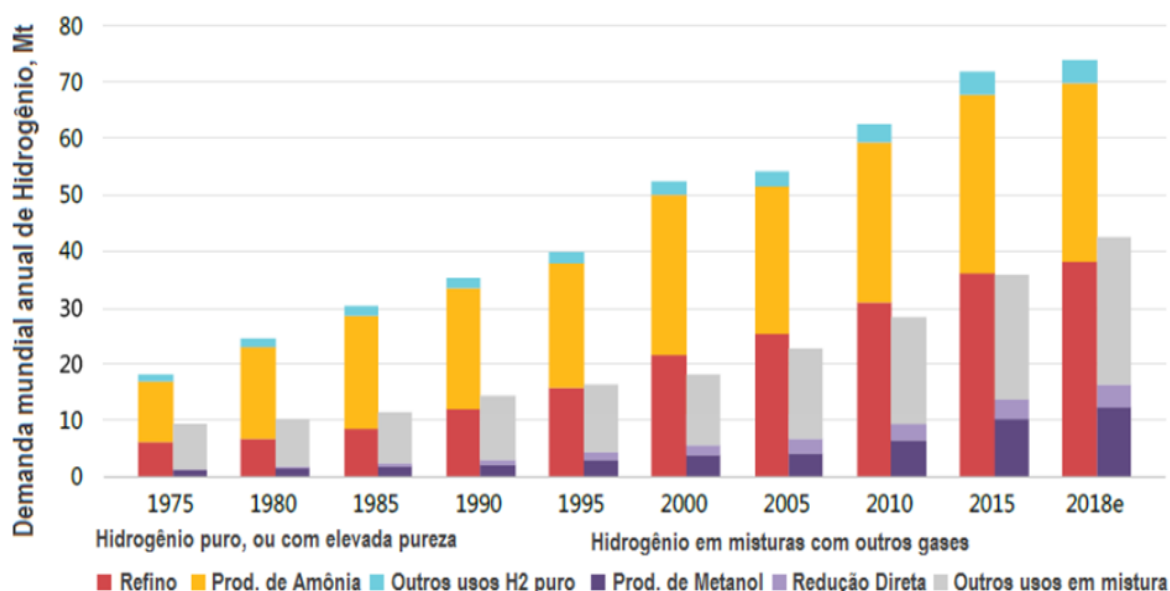
Fonte: CENEH, citado por CGEE (2010).

Sendo assim, o hidrogênio pode ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo ou nulo carbono, a depender de seu processo de produção, em setores de difícil eletrificação e como vetor para armazenamento de energia, viabilizando maior entrada de renováveis variáveis como a eólica, solar, e outras na matriz energética mundial. Analisando desse ponto de vista, o hidrogênio é visto como um recurso com plena capacidade de promover o engate dos mercados de combustíveis, elétrico, industrial e outros (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). Assim, o hidrogênio poderá não apenas contribuir para a descarbonização profunda da economia mundial, mas também promover uma maior dinâmica competitiva ampla e descentralizada ao acoplar os diferentes segmentos de mercado.

Atualmente há um grande interesse nas aplicações veiculares e na geração distribuída de eletricidade. A tecnologia de células a combustível para uso veicular apresenta destacada vantagem, tendo em vista as maiores eficiências desses sistemas, alcançadas pelo conjunto célula a combustível e motor elétrico e, sobretudo, emissões locais praticamente nulas. Células a combustível podem utilizar hidrogênio, metano, gás natural ou álcoois (como metanol e etanol) para geração de potência na ordem de watts. Mesmo para quilowatts, células a combustível ainda são mais eficientes que os motores de combustão interna.

É necessário destacar que antes mesmo da perspectiva comercial de aplicação energética do hidrogênio, já são produzidos mundialmente cerca de 40 milhões de toneladas do gás hidrogênio por ano; número que tende a dobrar a cada década (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2005) (Ver Figura 06). Os maiores responsáveis por este crescimento são as refinarias de petróleo, que utilizam o hidrogênio para produzir combustíveis a partir do hidrocraqueamento do petróleo⁷, a utilização do hidrogênio na fabricação de fertilizantes, na indústria alimentícia, no processo de fabricação de semicondutores, dentre outras; sendo que 95% deste hidrogênio é produzido a partir de fontes fósseis (CGEE, 2010).

Figura 06 – Evolução da demanda mundial por hidrogênio.



Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2019a).

Devido às perspectivas de crescimento do mercado de hidrogênio para uso como vetor energético, espera-se também um significativo aumento do comércio internacional do mesmo. Os principais países da Europa, já anunciaram políticas para financiar investimentos em plantas de hidrogênio em outros países a fim de contribuir para a consolidação de mercado mundial de hidrogênio para fins energéticos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Por fim, vale ressaltar que as aplicações energéticas ainda são muito limitadas, por diversos fatores, como desafios tecnológicos de fontes de geração de hidrogênio de baixo carbono,

⁷ O hidrocraqueamento é um processo de conversão que consiste na quebra de moléculas existentes na carga por ação de catalisadores a altas temperaturas e pressão e na presença de grandes volumes de hidrogênio. Simultaneamente as quebras, ocorre as reações de hidrogenação (PETROBRÁS, 2003).

custos de produção, custos dos equipamentos para uso energético do hidrogênio (inclusive aspectos relacionados à segurança), a dificuldade de transporte e armazenamento, necessidade de desenvolvimento de arcabouços institucionais, legais e regulatórios (desenho de mercado, normatização etc.), entre outros.

4.5 HIDROGÊNIO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Semelhanças e diferenças entre hidrogênio e eletricidade como portadores de energia são descritas em diversos estudos desde a década de 90 (YANG, 2008; WIDERA, 2020). A características do hidrogênio de poder armazenar energia e depois ser convertida novamente em eletricidade, é uma das responsáveis por destacar esse gás.

Como já citado anteriormente existe uma grande necessidade de armazenar energia, devido a intermitência das fontes renováveis ou à necessidade de transportar grandes quantidades de energia por grandes distâncias. Em resumo, sistemas de armazenamento tem a finalidade de carregar, armazenar e descarregar energia (FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING, 2015). Em vista disso, os principais tipos de tecnologias de armazenamento que são levados em consideração:

- Power to Power (P2P) (por exemplo, hidrelétricas bombeadas, baterias como Li-ion, produção de hidrogênio eletrolítico e reconversão em eletricidade) - Este método é baseado no conceito de produção de eletricidade, a partir de energias renováveis, durante o período de alta oferta e baixa demanda, então armazenar energia e usá-la quando a eletricidade é necessária em momentos de baixa oferta e alta demanda.
- Power to Heat (P2H) (armazenamento e consumo de calor) - O conceito principal deste método está na conversão de eletricidade para outros portadores de energia. Durante os períodos de alta oferta e baixa demanda, a eletricidade é transformada em outra forma de energia, como calor ou hidrogênio. Esta energia é armazenada e utilizada em outros setores, incluindo construção, mobilidade e indústria, etc.
- Power to Gás (P2G) (energia para hidrogênio) - Esta ideia se baseia na conversão de eletricidade em hidrogênio e utilizá-lo em outros setores (por exemplo, mobilidade) e assim contribuir para a sua descarbonização.

Sob essa perspectiva, a possibilidade da combinação dessas três opções de armazenamento de energia com o uso de hidrogênio parece realmente promissora.

A principal característica que distingue os sistemas de armazenamento de energia de hidrogênio de outras formas de armazenamento de energia (por exemplo, baterias ou sistemas de armazenamento de energia de ar comprimido) é sua flexibilidade e a possibilidade de

fornecer vários serviços. Essas características são cruciais para os operadores da rede para garantir a confiabilidade do sistema e a integração das fontes de energia renovável em vários usuários finais de energia dentro do sistema de energia, aquecimento e transporte (MALINAUSKAITE et al, 2019).

Com sistemas de armazenamento de energia de hidrogênio, a energia pode ser armazenada em grande escala, ou seja, 1 GWh a 1 TWh, enquanto as baterias normalmente variam de 10 kWh a 10 MWh, e armazenamento de ar comprimido e hidrelétricas bombeadas variam de 10 MWh a 10 GWh (MELAINA, 2015).

O grau em que os sistemas de armazenamento de energia de hidrogênio podem penetrar nos mercados de armazenamento de energia dependerá de vários fatores, incluindo barreiras não tecnológicas, como políticas, segurança e questões econômicas (GARCIA, 2017).

5 HIDROGENIO VERDE

O hidrogênio renovável, é o produzido através de fontes renováveis, as emissões de GEE do ciclo de vida completo da produção do hidrogênio nessas condições de produção é praticamente zero, o que aumenta ainda mais o potencial do hidrogênio como vetor energético no futuro. Entre as matérias-primas renováveis de onde podemos obter hidrogênio, podem ser utilizadas a água (H₂O), a biomassa e os biocombustíveis líquidos e gasosos, tais como o etanol e o biogás/biometano, por exemplo.

Considerando que a classificação do hidrogênio em cores apresenta definições diferentes, como citado anteriormente, é válido ressaltar que o hidrogênio obtido por outras rotas renováveis não tem sido considerado no conceito de “hidrogênio verde” como, por exemplo, a eletrólise da água a partir de hidrelétricas e a pirólise ou a gaseificação e biodigestão da biomassa. O mesmo ocorre com o hidrogênio gerado por rotas a partir da energia nuclear.

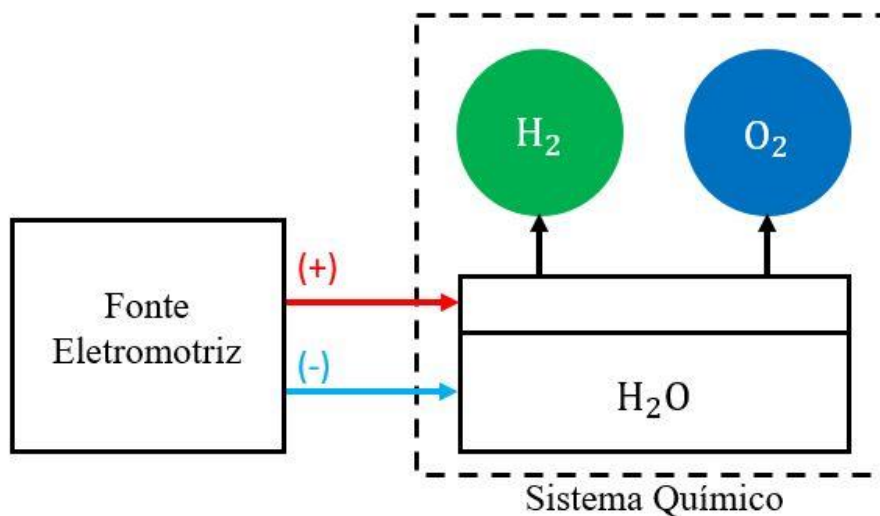
Como este estudo tem como foco o hidrogênio verde, ou seja, produzido a partir da eletrólise utilizando energia eólica ou solar, focaremos nos principais aspectos técnicos, econômicos, logísticos e de segurança do mesmo.

Como já comentado, a produção de hidrogênio a partir da água se dá pelo processo de eletrolise, sendo a utilização mais comum e difundida. Que consiste na decomposição química da água nos elementos que a constituem, o hidrogênio e oxigênio, utilizando eletricidade, proveniente de fontes renováveis, mais especificamente a energia solar ou eólica.

Quando uma corrente elétrica atravessa a água, a ligação entre os elementos se rompe, o que gera dois átomos de hidrogênio carregados positivamente e um átomo de oxigênio carregado negativamente. Os íons negativos do oxigênio migram para o eletrodo positivo (anodo) e os íons positivos de hidrogênio migram para o eletrodo negativo (catodo) (PALHARES, 2016). Um diafragma ou separador deve ser utilizado para evitar a mistura dos gases gerados nos eletrodos. Os eletrodos, o diafragma e o eletrólito são elementos que compõem uma célula eletrolítica (URSÚA et al, 2012).

Uma breve representação do processo pode ser observada na Figura 07. O processo de produção do hidrogênio a partir da eletrólise já é conhecido há mais de cinco décadas, porém ganhou um grande impulso nos anos 60 a partir da corrida espacial. Duas tecnologias de eletrólise se destacam: a Alcalina Clássica e a de Membrana Polimérica Eletrolítica (PEM).

Figura 07 – Diagrama Dos Processos de Eletrólise da Água



Fonte: Elaborado pela autora baseado em PALHARES, 2016.

Os eletrolisadores alcalinos utilizam uma solução alcalina como eletrólito, geralmente hidróxido de potássio. As temperaturas de operação variam de 65 a 100 °C; a pressão é usualmente em torno de 25 a 30 bar (URSÚA et al., 2012). A densidade de corrente de eletrolisadores alcalinos industriais encontra-se na faixa de 1000-3000 A/m, entretanto deve-se ser cuidadoso com densidades de corrente muito altas, pois reduzem a eficiência da eletrólise devido a transformação de energia elétrica em calor (ZENG; ZHANG, 2010).

Os eletrolisadores de membrana polimérica (PEM), ou membrana de troca de prótons ou também chamados de polímero de eletrólito sólido (*Solid Polymer Electrolyte*, SPE) tem como principal característica ter um eletrólito sólido. O eletrólito é feito de uma fina membrana polimérica (de espessura inferior a 0,2 mm) à prova de gás e com forte caráter ácido devido à presença de grupos de ácido sulfônico. Esses grupos são responsáveis pela condução dos íons H^+ por meio de um mecanismo de troca iônica. A membrana geralmente utilizada é feita de Nafion, um polímero sulfonado semelhante ao Teflon e os eletrodos são usualmente feitos de metais nobres como a platina e o irídio (URSÚA et al., 2012).

Segundo Zeng e Zhang (2010), a produção de hidrogênio por eletrólise da água necessita de melhorias em eficiência energética, segurança, durabilidade, operabilidade, portabilidade e redução dos custos de instalação e operação. Comparativamente aos eletrolisadores alcalinos, os eletrolisadores PEM possuem como vantagens maiores eficiências energéticas e maiores taxas de produção, além de serem mais compactos. Contudo têm custos altos de investimento,

principalmente no que se refere aos tipos de membrana e de eletrodos e apresentam menores tempos de vida (URSÚA et al., 2012; ZENG; ZHANG, 2010).

Trabalhando no desenvolvimento e melhora desses eletrolisadores temos diversas fabricantes, com merecido destaque a Cummins, ITM Power, Areva, Siemens, Nel, Mcphy, etc.

Alguns ciclos termoquímicos também podem ser utilizados para quebrar a molécula da água e produzir hidrogênio, essas tecnologias exigem elevadas temperaturas e uso de substâncias intermediárias que podem ser regeneradas. As fontes de altas temperaturas cogitadas para esta aplicação são, até agora, a nuclear e a solar concentrada (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2013; GUBAN et al., 2020), entretanto o processo ainda está em fase de desenvolvimento e não é comercial.

Em vista do alto potencial do hidrogênio, já descritos anteriormente, várias iniciativas foram criadas para viabilizar o hidrogênio verde, com um objetivo duplo: recuperação da economia pós pandemia do Covid-19 e aceleração da transição energética em segmentos de mercado de difícil descarbonização, especificamente, os transportes pesados, aviação, aquaviário, siderurgia, fertilizantes, entre outros (MME, 2021). Vários países lançaram estratégias assertivas para o desenvolvimento de mercados para o hidrogênio verde, com a expectativa de acelerar as reduções de custos dessa rota tecnológica.

6 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

O termo "economia do hidrogênio" tem sido utilizado para descrever um novo modelo econômico baseado no hidrogênio como vetor energético e não mais baseado em uma economia dependente quase exclusivamente de recursos não renováveis, como o petróleo e seus derivados. (CGEE, 2010).

O hidrogênio pode ser usado como matéria-prima, combustível ou transporte e armazenamento de energia, tem muitas aplicações possíveis nos setores industrial, de transporte, energia. Mais importante, não emite CO₂ e quase não produz poluição do ar quando usado. Portanto, oferece uma solução para a descarbonização em processos industriais e em setores econômicos onde as reduções de emissões de carbono são difíceis de alcançar.

O hidrogênio verde é a maior aposta para uma produção industrial mais sustentável, principalmente com o aumento das discussões acerca da necessidade de redução das emissões de carbono (BATAGLIOTTI, 2021).

O CGEE (2010) relata que:

Segurança energética e a redução dos impactos ambientais constituem os principais motivadores para a mudança de paradigma do setor energético. A segurança energética é evidenciada uma vez que a possibilidade de obtenção de hidrogênio de várias fontes permite privilegiar as fontes locais de cada país, diminuindo ou evitando a importação de energia. Os impactos ambientais diminuem, já que a utilização do hidrogênio para geração de energia elétrica através de célula a combustível não produz gás de efeito estufa, gerando apenas água como subproduto. As emissões também são significativamente reduzidas na queima do hidrogênio em motores de combustão interna ou queimadores para a geração de calor.

A introdução dessa nova economia possibilita um melhor aproveitamento dos recursos energéticos locais e, também, a identificação de novos nichos de mercado. Em vista disso, vários países têm executado as ações abaixo para possibilitar esse novo cenário (CCGE, 2010):

- Atuação conjunta de entidades governamentais e empresas privadas para o desenvolvimento da economia do hidrogênio;
- Investimento público e privado contínuo nas diversas áreas (pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento, demonstração e mercado) e nas diversas tecnologias de hidrogênio;
- Execução de inúmeros projetos de demonstração das tecnologias de hidrogênio patrocinados pelos governos centrais com o intuito de se verificar a viabilidade técnica, ambiental e econômica, além de dar visibilidade pública às tecnologias e incentivar a demanda por produtos e pela criação da infraestrutura necessária;

- Criação de políticas e programas nacionais e internacionais para a introdução da economia do hidrogênio em escala global;
- Criação e harmonização de códigos, normas e padrões para as tecnologias e a infraestrutura de hidrogênio.

Segundo Mantovani (2021), o hidrogênio como combustível já se tornou uma realidade em países como Estados Unidos, Rússia, China, França e Alemanha. Outros, como o Japão, foram ainda mais longe e aspiram a se tornar uma economia do hidrogênio.

Em dezembro de 2020, o Chile deu o pontapé inicial na América Latina e anunciou a meta de em duas décadas de se tornar um dos três maiores exportadores de hidrogênio verde do planeta, com o produto mais barato entre seus concorrentes. A Colômbia também quer desenvolver sua indústria de gás e busca potenciais mercados de exportação. O Brasil começa com a vantagem de ter um litoral favorável, sol o ano todo e ventos abundantes.

Como o Brasil tem um dos menores custos marginais de produção de energia renovável, isso é fundamental para baratear a eletrólise. Os investimentos anunciados para a construção de plantas de produção de hidrogênio verde no Brasil somam mais de 22 bilhões de dólares, todos concentrados nos portos - Pecém, no Ceará; Suape, em Pernambuco; e Açu, Rio de Janeiro. Há também investimentos na Bahia e no Rio Grande do Norte.

Os principais países que demonstram interesse na implantação dessa nova economia são aqueles que apresentam demanda energética e, por consequência, os maiores níveis de emissões de GEE. A economia do hidrogênio também é uma solução para a questão de segurança energética causada pela grande dependência energética desses países por combustíveis fósseis importados, além de ser uma alternativa estratégica em países que possuem outras fontes de energia (CGEE, 2010).

6.1 ASPECTOS ECONÔMICOS

Ao se procurar informações sobre custos e competitividade por rota tecnológica do hidrogênio, percebe-se a existência de uma escolha estratégica para o desenvolvimento de mercado.

Por um lado, a rota tecnológica que teria maior facilidade de desenvolver novos mercados por ser dominante e mais competitiva atualmente é a reforma a vapor do metano de gás natural (hidrogênio cinza). Contudo, essa rota enfrentará riscos no futuro relacionados a eventuais restrições em um cenário de descarbonização profunda e de queda acelerada nos custos da eletrólise da água baseada em renováveis variáveis com eólica e solar, do “hidrogênio verde”.

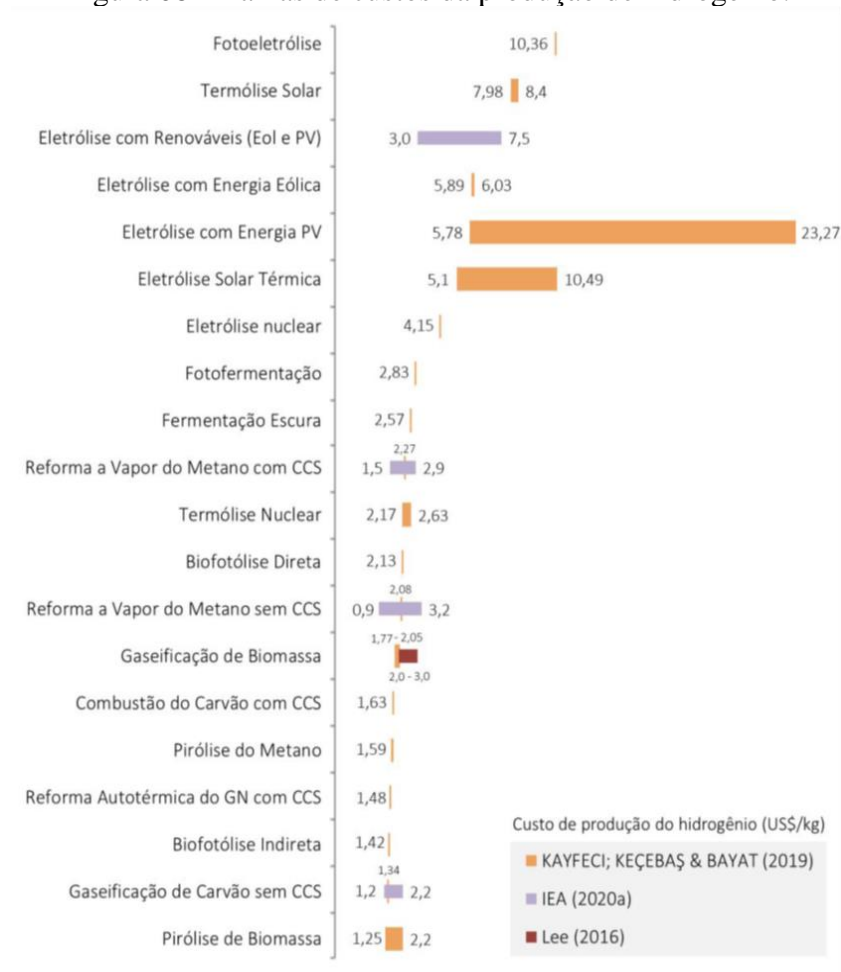
Por outro lado, a rota tecnológica do hidrogênio verde ainda é menos competitiva. Contudo, essa rota apresenta grandes oportunidades no futuro em um cenário de aceleração de redução de custos de investimento da eletrólise e de geração elétrica com renováveis variáveis (eólica e solar, particularmente). Os compromissos de descarbonização profunda das economias contribuem para este cenário.

De fato, os menores custos de produção do hidrogênio, atualmente, são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão, as quais consistem em rotas tecnológicas baseadas em fontes energéticas fósseis. A eletrólise da água usando fontes renováveis (eólica e solar) é, em geral, a rota tecnológica mais cara dentre as já disponíveis no mercado. Obviamente, projetos em condições e locais específicos podem ser competitivos atualmente, explorando nichos específicos.

Os custos de produção das principais tecnologias, dados pela INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2020a), mostram que as fontes fósseis, atualmente, têm custo menor que a eletrólise com geração elétrica renovável. A gaseificação da biomassa ainda não é uma tecnologia madura, mas Lee (2016) estima que em 2040 esta rota permita custos de produção de hidrogênio competitivos. A Figura 08 apresenta faixas de custo de produção de hidrogênio. E a Figura 09 mostra a curva de preços do hidrogênio, na Califórnia, comparando as tecnologias de Eletrólise PEM e Reforma a vapor do metano sem CCUS⁸.

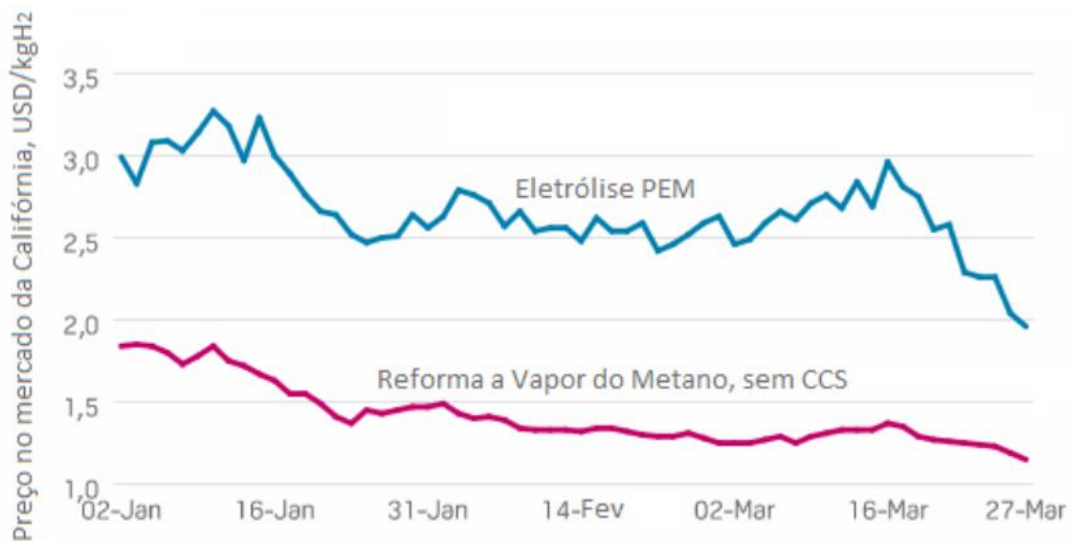
⁸ CCUS da sigla em inglês *Carbon capture, utilisation and storage*, que em português podemos traduzir para a captura, utilização e armazenamento de carbono.

Figura 08 – Faixas de custos da produção de hidrogênio.



Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021

Figura 09 – Levantamento de preços do hidrogênio no mercado da Califórnia, Estados Unidos, por processo de produção, no primeiro trimestre de 2020

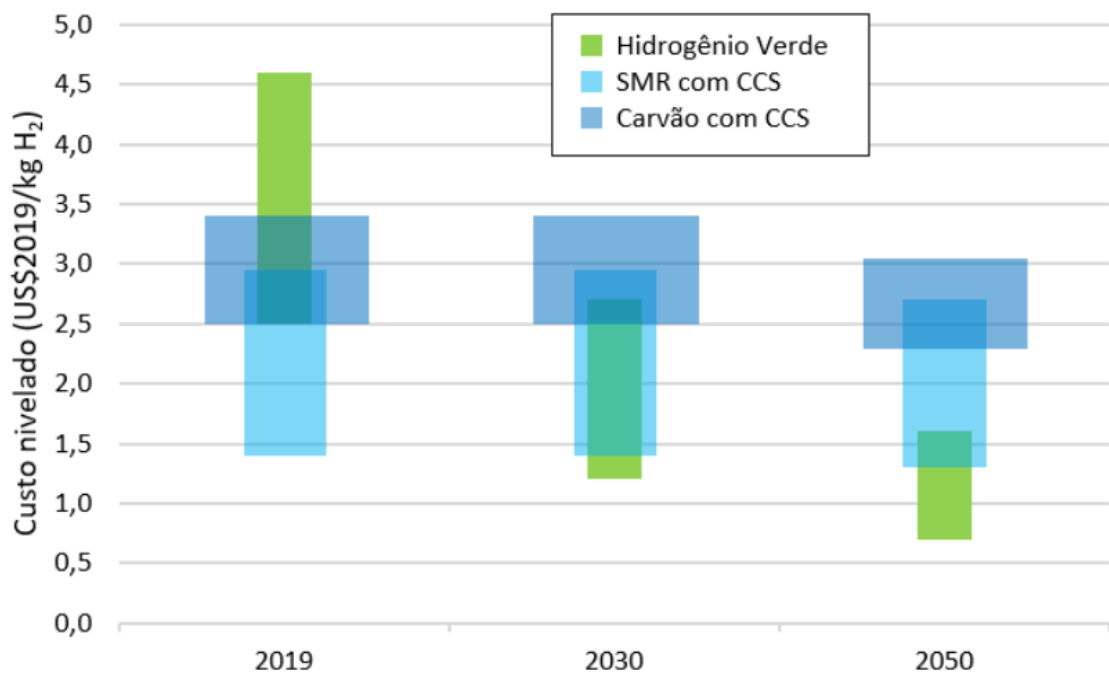


Fonte: S&P GLOBAL PLATTS (2020b)

É visto um estreitamento do diferencial de preços entre o H₂ obtido por eletrólise e aquele gerado por reforma a vapor do metano no final de março de 2020. De acordo com os dados econômicos levantados pela S&P GLOBAL PLATTS, é, provavelmente, um efeito conjunto relacionado a influências da pandemia no mercado e o início de um efeito mais estrutural relacionado à queda de custos da eletrólise.

Segundo a Bloomberg New Energy Finance (BNEF, 2020), estima-se que a produção de hidrogênio verde deva se tornar mais competitiva até 2030, devido aos maiores investimentos e as restrições mais rígidas a emissão de GEE, ampliando sua vantagem sobre o hidrogênio de fontes fósseis até 2050, conforme apresentado na Figura 10.

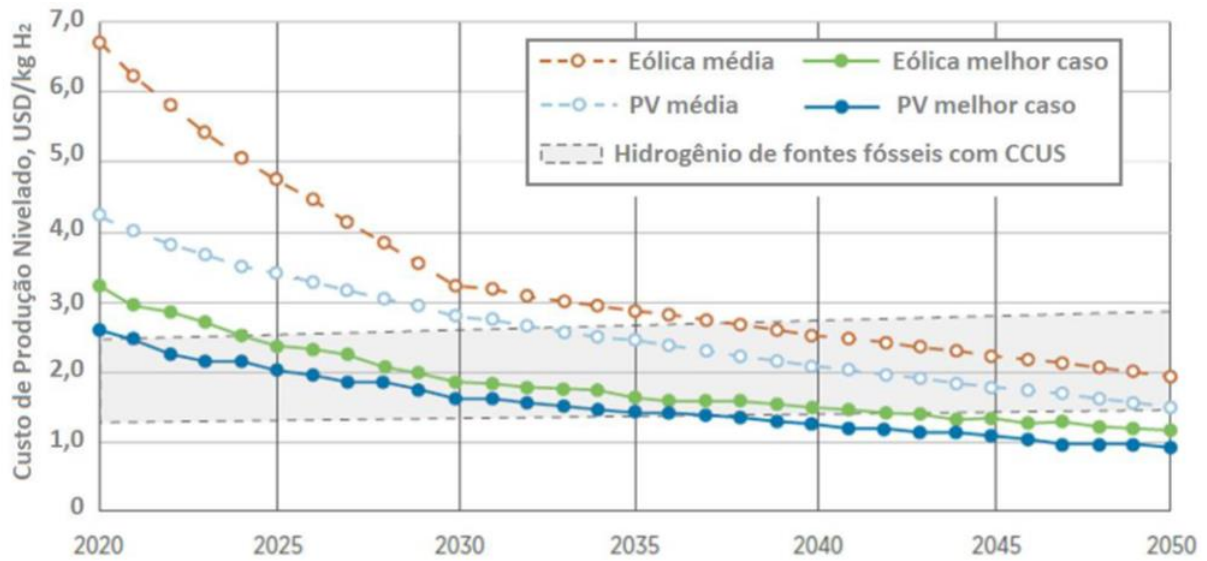
Figura 10 - Projeções das faixas de custo para projetos de grande escala.



Fonte: BNEF (2020)

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2019 aponta a expectativa de que hidrogênio verde possa se tornar competitivo, em relação ao hidrogênio cinza, antes de 2025, no melhor cenário possível, tanto a partir da energia eólica, como da energia solar (PV). Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade real seria alcançada entre 2030 e 2040. As curvas de projeção da evolução de custos são mostradas na Figura 11.

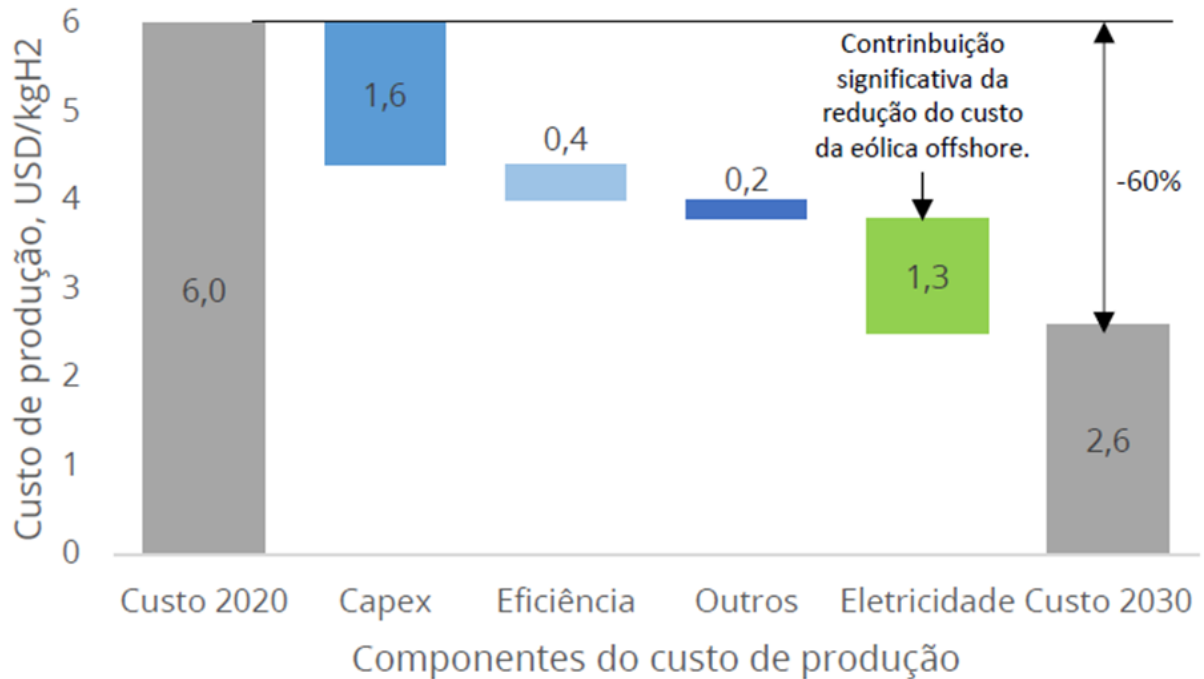
Figura 11 – Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio



Fonte: INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2019.

Segundo o Hydrogen Council, em 2020 havia um potencial de redução de custo de produção de hidrogênio verde de quase 60%, até 2030. As componentes de custo Capex (investimento) e eletricidade renovável representam as maiores oportunidades de redução.

Figura 12 – Projeção de redução de custos de produção de hidrogênio a partir de eletrólise.



Fonte: HYDROGEN COUNCIL, 2020

Em 2021, o HYDROGEN COUNCIL reafirmou o potencial de redução do custo apontado em seu relatório de 2020, e adicionou que ao se introduzir os custos de carbono (USD 50/tCO₂e em 2030, USD 150/tCO₂e em 2040 e USD 300/tCO₂e em 2050), o preço de indiferença (*breakeven*⁹) entre o hidrogênio verde e o cinza pode ocorrer entre 2028 e 2034.

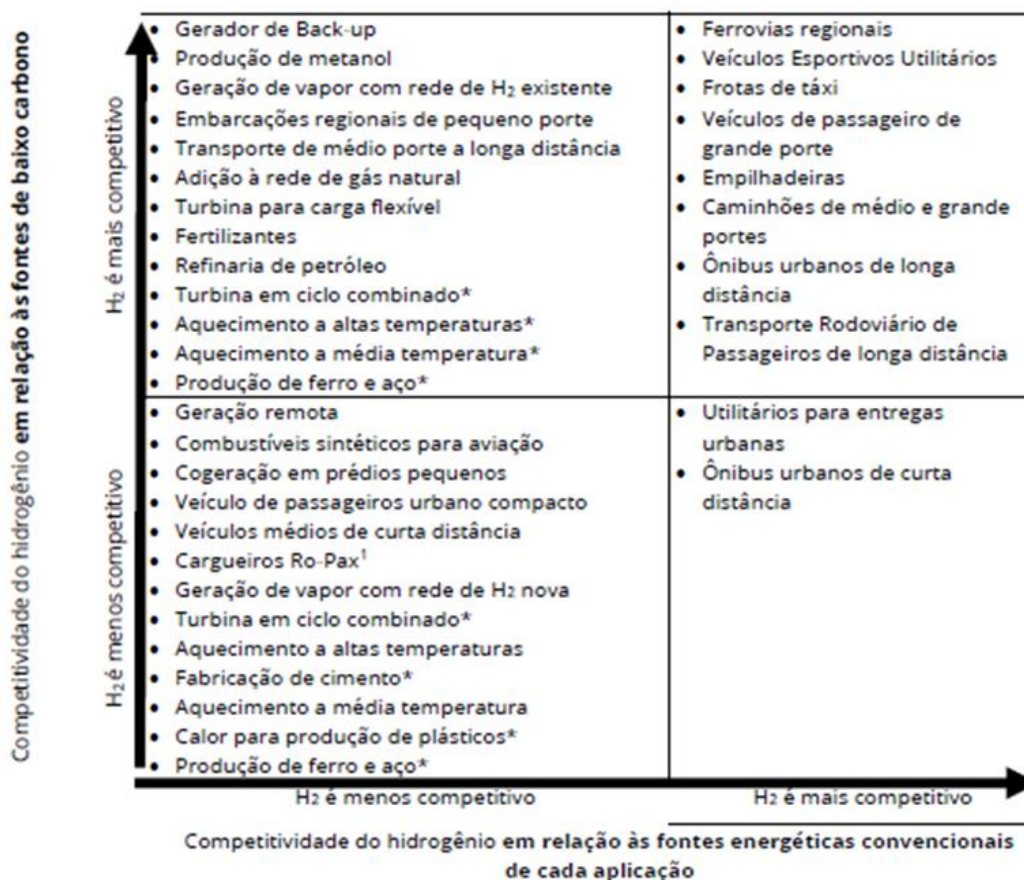
⁹ De maneira literal, *breakeven* significa empatar ou igualar, no ponto de vista econômico, é o ponto no qual um investimento não dá prejuízo, mas ainda não oferece lucro.

7 APLICAÇÕES P&D E INDUSTRIAIS

Segundo Hydrogen Council, 2020, para acelerar a penetração do hidrogênio no mercado são necessárias ações governamentais, tais como desenvolvimento de estratégias nacionais, coordenação dos agentes do mercado para capturar oportunidades, promover uma regulação que elimine barreiras, padronização, investimento em infraestrutura e incentivos.

Analisando a competitividade do hidrogênio em 35 aplicações no horizonte de 20, seu uso, em condições favoráveis (específicas de cada aplicação e de cada região, e incluem um preço de carbono, a disponibilidade de outras fontes renováveis e a possibilidade de captura e sequestro de carbono), se mostra competitivo em 22 aplicações. A Figura 13 apresenta as 35 aplicações consideradas no estudo, agrupadas em mais ou menos competitivas, em relação a outras fontes de baixo carbono e em relação às fontes de energia convencionais utilizadas em cada aplicação

Figura 13 - Competitividade de aplicações do hidrogênio até 2030



Fonte: Adaptado de HYDROGEN COUNCIL, 2020

A oportunidade de alcançar maior eficiência e custo-benefício na transição energética é apresentada no exemplo de quatro aplicações abaixo. A seleção dessas quatro aplicações para análise baseou-se no papel particular desses projetos no desenvolvimento de sistemas de produção e armazenamento de hidrogênio verde. Em todos os cenários analisados o hidrogênio é produzido nas proximidades do ponto de uso.

7.1 A USINA DE ENERGIA EÓLICA E HIDROGÊNIO DE UTSIRA

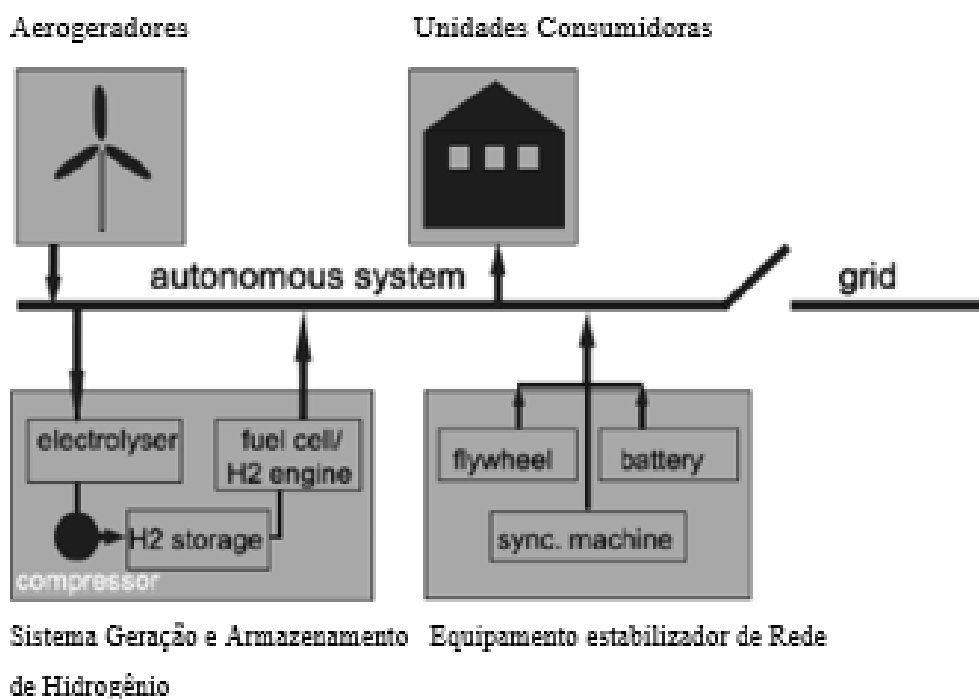
A ilha norueguesa, Utsira, situada a cerca de 20 km da costa oeste de Haugesund, foi selecionada para a primeira usina combinada de energia eólica e hidrogênio em grande escala do mundo, esteve em operação de 2004 à 2008. A ilha, habitada por cerca de 200 pessoas, tem ligação por barcas para o continente, possui condições climáticas difíceis, que atrapalham o transporte, incluindo a entrega de combustível e outros insumos. Todos esses fatores contribuem para o aumento do custo de produção de energia. No entanto, os ventos fortes, característicos da ilha, contribuem para as condições favoráveis à produção de energia eólica.

A Usina de Energia Eólica e Hidrogênio de Utsira foi financiada pela Statoil ASA e operada em conjunto com a fabricante de turbinas eólicas Enercon. O projeto de pesquisa e desenvolvimento foi focado no fornecimento seguro, contínuo e eficiente de energia ao testar um sistema de energia eólica-hidrogênio em escala real (INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY, 2011).

O projeto teve como objetivo demonstrar a produção de hidrogênio a partir da energia eólica através da eletrólise da água doce. O segundo objetivo foi verificar as possibilidades de redução de custos e otimização de soluções para comercialização desse método de produção. A energia era gerada por duas turbinas eólicas Enercon E40 (600 kWh cada), instaladas em Utsira, segundo os resultados atendeu totalmente a demanda de eletricidade de 10 residências (INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY, 2011).

A usina era operada a partir do centro de controle localizado no continente e a energia de reserva estava disponível através de um cabo submarino de 1 MW. De acordo com o conceito de teste, a primeira turbina produziria eletricidade diretamente para a rede externa e a outra seria conectada a um sistema autônomo por meio de um inversor unidirecional de 300 kW (Figura 14). Foi possível redirecionar o excedente de energia (acima de 300 kW) do sistema autônomo para a rede local.

Figura 14 - A primeira usina de energia eólica e hidrogênio em grande escala do mundo (Utsira, Noruega)

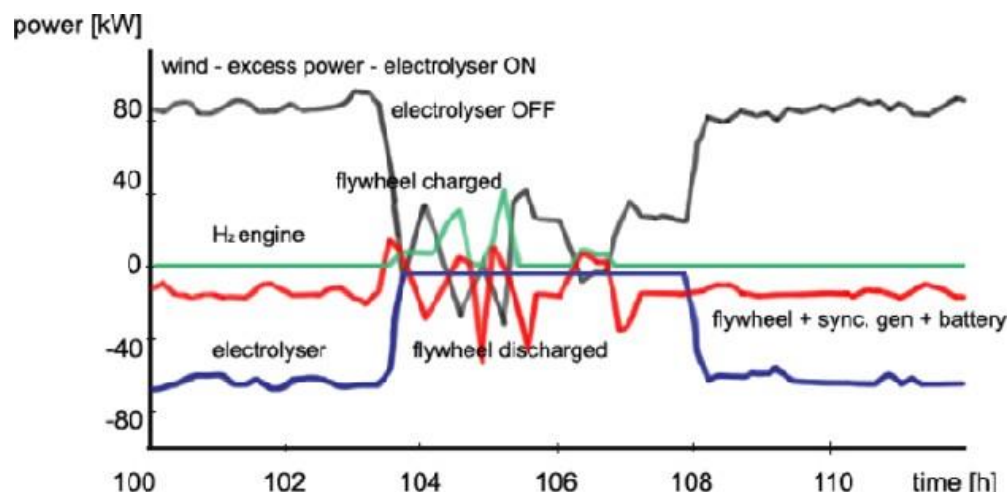


Fonte: WIDERA, 2020 adaptado de INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY, 2011.

Em dias de vento, em que a produção de energia das turbinas eólicas excedia as demandas das residências, o eletrolisador, que possuía capacidade de 10 Nm³/h, 50 kW, era ligado. O hidrogênio produzido é comprimido pelo compressor de 5 kW e armazenado em um tanque padrão de 200 bar, com capacidade 2400 Nm³. Quando as condições meteorológicas impedem o funcionamento das turbinas eólicas (com vento muito fraco), o eletrolisador é desligado e as células a combustível eram acionadas.

O fornecimento contínuo de energia foi possibilitado por um motor de combustão interna de hidrogênio de 55 kW e uma célula de combustível de 10 kW, usando o hidrogênio armazenado para a produção de eletricidade. No período prolongado de excesso de geração eólica, quando o sistema de hidrogênio estava totalmente carregado, o eletrolisador era ligado e o motor a hidrogênio era desligado. Além do sistema de hidrogênio, uma bateria Ni-Cd foi adicionada para redundância extra. Durante os quatro anos de período de teste, a planta esteve em operação contínua, enquanto por mais de 50% do tempo funcionava em modo autônomo. Na Figura 15, pode ser observado um demonstrativo de como se dava esse processo operacional da planta.

Figura 15 - Demonstração Operacional da Planta em Utsira.



Fonte: WIDERA, 2020 adaptado de INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY, 2011.

7.2 PROJETO WIND2H2

O projeto Wind2H2 (2008-2009) foi orientado para a otimização multidimensional da produção de hidrogênio com energia de turbinas eólicas e armazenamento de energia no hidrogênio. Este projeto foi desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) como parte de uma pesquisa no National Wind Technology Center (NWTC) em Boulder (Colorado, EUA). Os principais objetivos do projeto foram:

- Reduzir os custos de capital do sistema de eletrólise através de design aprimorado e materiais de custo mais baixo.
- Desenvolver a produção de hidrogênio de baixo custo por eletrólise por meio da integração com fontes renováveis de eletricidade.
- Desenvolver estratégias para produção de hidrogênio de baixo custo a partir de eletrólise por meio de coordenação de serviços públicos.

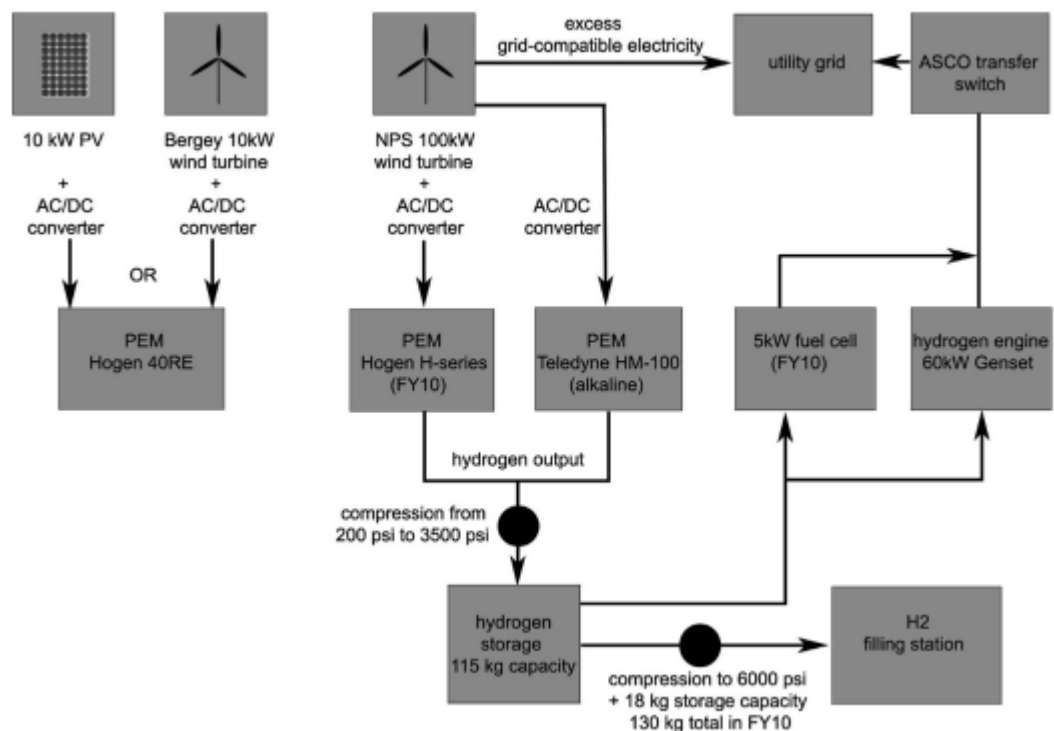
A pesquisa abrangeu a análise de custo e capacidade de energia eólica e fotovoltaica de "deslocamento no tempo" por meio de armazenamento de energia baseado em hidrogênio verde, bem como avaliação de como se comportava a co-produção de eletricidade e hidrogênio. Outras atividades envolveram a comparação de resposta e desempenho de tecnologias de eletrolisador alcalino e PEM e avaliação de ganhos de eficiência por meio de controladores de energia simplificados e integrados.

Vários esforços foram realizados para otimizar a conversão da energia eólica em hidrogênio, incluindo a simplificação de controles comuns do eletrolisador PEM (RAMSDEN et al, 2009). O problema identificado foi a necessidade de encontrar um equilíbrio entre o dispositivo ser capaz de lidar com um excesso de capacidade além da potência de entrada nominal (por exemplo, 2 MW) e o custo adicional subsequente associado ao equilíbrio da planta necessário para facilitar um excesso de potência. (SCHILLER, 2014).

O eletrolisador requereu um superdimensionamento da fonte de alimentação e sistemas de gerenciamento térmico que geram custos extras e complexidade do sistema. Com o objetivo de tornar um gerador de grande porte econômico, foram avaliadas novas tecnologias de membranas que aumentam a condutividade e reduzem a espessura do eletrolisador. Consequentemente, foi identificado o material de membrana fluorado que maximiza a condutividade na espessura desejada.

Outra conclusão abordou a troca de metais do grupo da platina, atualmente usados como catalisadores em eletrolisadores, desenvolvidas em cooperação com a 3M e o Brookhaven National Laboratory. O uso de nanoestruturas e catalisadores de células nucleares permitiu reduzir a quantidade de platina em um catalisador de trabalho em mais de 50% (SCHILLER, 2014).

Figura 16 - Projeto P&D Wind2H2 em Boulder, Colorado.



Fonte: RAMSDEN et al, 2009

A análise da eficiência do sistema na corrente nominal da pilha mostrou que o sistema eletrolisador PEM teve eficiência de 57% enquanto a eficiência máxima do sistema alcalino atingiu 41%. Também foi observado que a produção de hidrogênio foi cerca de 20% menor do que a vazão nominal do fabricante e se a vazão nominal fosse alcançada, a eficiência do sistema seria de 50% (RAMSDEN et al, 2009). Além disso, a melhoria da transferência de energia foi possível devido à implementação do sistema de eletrônica de potência, que capturou entre 10% e 20% a mais de energia.

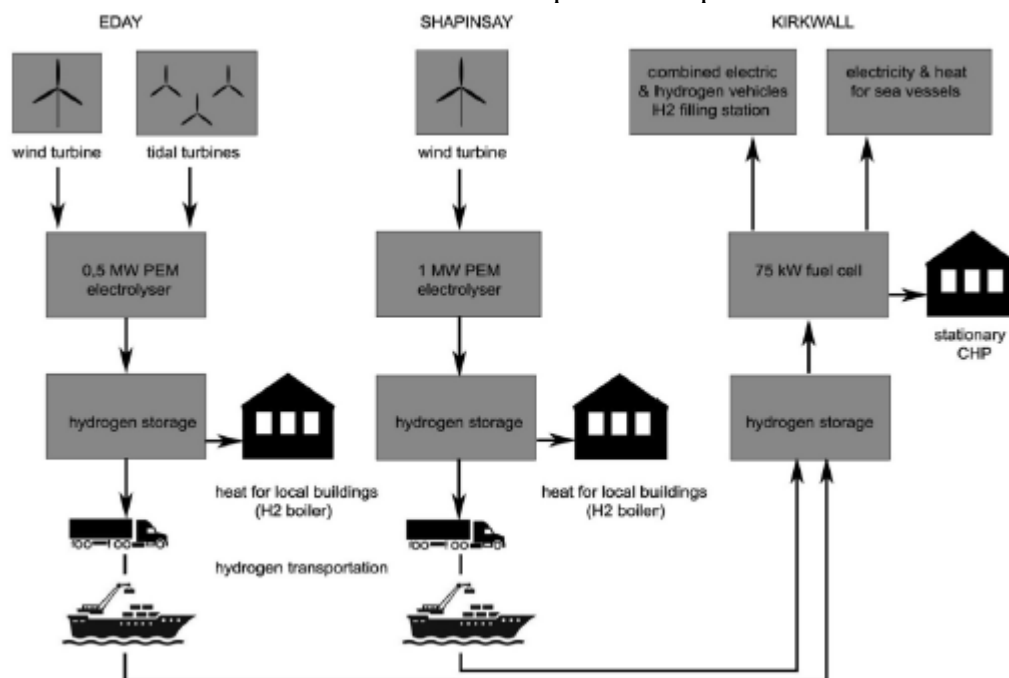
A principal conclusão do projeto Wind2H2 é que o hidrogênio fornece uma solução completa de armazenamento de energia eólica e solar, mas tem que ser realizadas observações minuciosas das variáveis que influenciam na eficiência do sistema (exemplo: eletrolisador PEM ou alcalino, Gestão de demanda, Condições ambientais favoráveis).

7.3 PROJETO BIG HIT

O projeto BIG HIT Construindo Sistemas Verdes Inovadores de Hidrogênio em um Território Isolado: um Piloto para a Europa foi apresentado no âmbito do Horizons 2020 e selecionado pela FCH JU. BIG HIT, como o projeto piloto e de demonstração mundial, é projetado para criar e implementar um modelo totalmente integrado de produção, armazenamento, transporte e utilização de hidrogênio para calor, energia e mobilidade de baixo carbono, ver Figura 17. BIG HIT tem doze participantes de seis países da União Europeia, UE, e foi integrado em maio de 2018 (FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN, 2019).

No entanto, as bases para este projeto foram desenvolvidas no âmbito do programa Orkney Surf 'n' Turf que iniciou a produção de hidrogênio através do processo de eletrólise da água alimentado pela energia eólica e das marés no arquipélago de Orkney, especificamente nas ilhas Eday e Shapinsay. O lado de teste de maré possui 8 berços de teste de maré, situados perto de Eday, na faixa de profundidades de 12 a 50 m, em uma área de fortes correntes marinhas (até 4 m/s). Este lado de teste é conectado através de cabos submarinos de 11 kV à subestação em Caldale (Eday). A subestação está equipada com o quadro principal e gerador reserva com o objetivo de fornecer conexão à rede e controlar o fornecimento de dispositivos de maré.

Figura 17 - Projeto BIG HIT Construindo Sistemas Verdes Inovadores de Hidrogênio em um Território Isolado: um Piloto para a Europa



Fonte: FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN, 2019.

A ideia principal do BIG HIT é combinar a energia renovável das turbinas eólicas Enercon E44, de 900 kW cada, localizadas em Shapinsay e Eday, com produção e armazenamento de hidrogênio. Os dois eletrolisadores PEM ITM Power, têm capacidade de 1 MW e o outro de 0,5 MW. Suas características envolvem resposta rápida, alta eficiência operacional e capacidade de saída de alta pressão, bem como o tamanho compacto (Ver Figura 18).

Figura 18 - Eletrolisador PEM da ITM Power instalado em Orkney.



Fonte: FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN, 2019.

Os eletrolisadores usam sua capacidade para produzir a cada ano cerca de 50 toneladas de hidrogênio com elevados índices de pureza, que será usado para o armazenamento de energia, para que possa ser convertido em eletricidade e calor (FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN, 2019).

A maior parte do hidrogênio será transportada em cinco carretas para Kirkwall, exceto pela pequena quantidade que está planejada para ser usada em duas caldeiras abastecida a hidrogênio que fornecerão calor livre de emissões para os edifícios locais (ZHAO et al, 2019).

Em Kirkwall, uma célula a combustível de hidrogênio de 75 KW, instalada em 2017 como parte do projeto Surf 'n' Turf”, utiliza o hidrogênio e o oxigênio para a produção de eletricidade. Um posto de abastecimento de hidrogênio em Kirkwall fornece combustível para o veículo de hidrogênio de emissão zero. Epera-se aumentar a frota da ilha em 10 veículos híbridos Vans Symbio baseadas no Renault Kangoo ZE Maxi. Os carros estão equipados com uma bateria de íons de lítio de 22 kWh e um extensor de autonomia de célula de combustível de hidrogênio de 5 kW. O sistema extensor dobrará o alcance operacional e, além disso, não haverá impacto do aquecimento do motor (FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN, 2019).

As 3 pilhas de células de combustível Proton Motor PM 400, com potência elétrica nominal de 4,0-30,0 kW cada, são adequadas para aplicações estacionárias marítimas. A eletricidade é utilizada pelas instalações locais e embarcações no porto, enquanto o calor, como subproduto da reação química na célula de combustível, é enviado para os edifícios próximos (FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN, 2019).

O projeto já produziu substancial impacto social, ambiental e econômico e contribui significativamente para o desenvolvimento de um modelo integrado de produção, armazenamento, transporte e utilização de hidrogênio para calor, energia e mobilidade de baixo carbono.

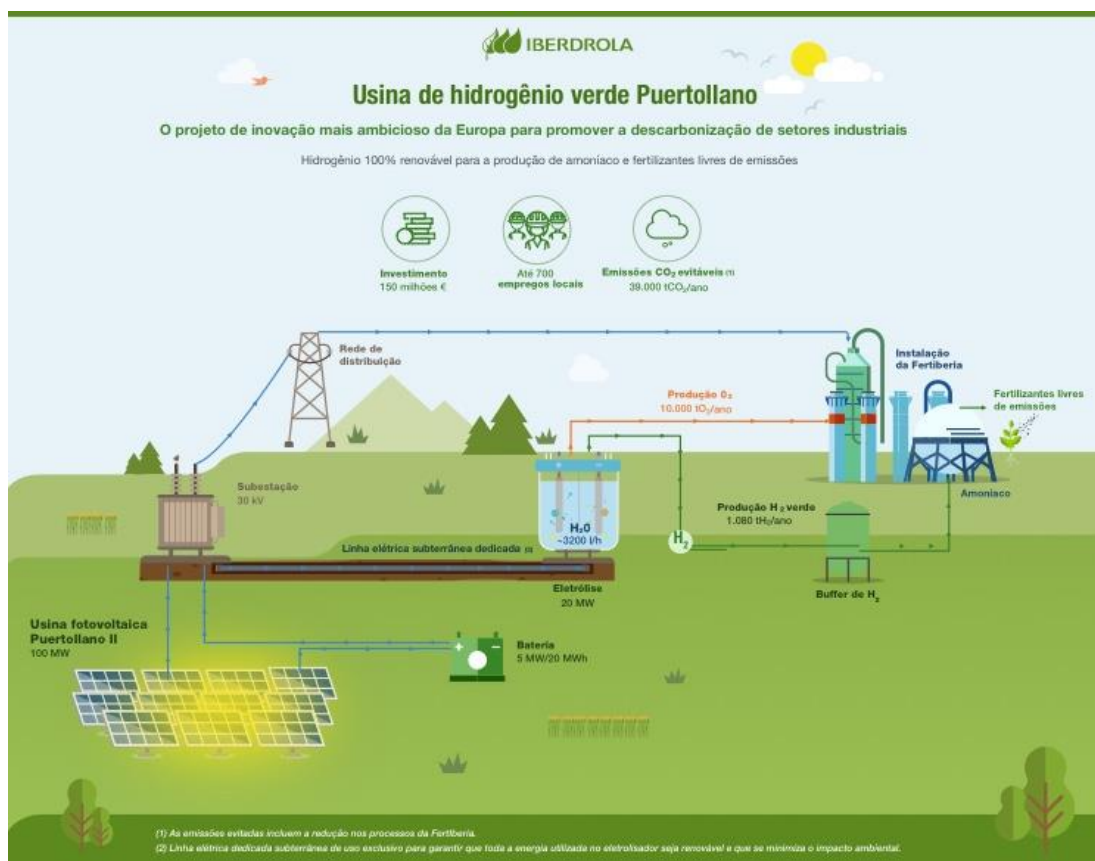
7.4 USINA DE HIDROGÊNIO VERDE PARA USO INDUSTRIAL NA EUROPA

As multinacionais Iberdrola, empresa espanhola do ramo energético, e a Fertiberia, empresa líder no setor de fertilizantes na UE, se aliam em uma aposta na sustentabilidade do setor industrial. As empresas investiram cerca 150 milhões de euros para a construção da maior usina de H₂V para uso industrial na Europa, localizadas em Puertollano, Espanha e que estará em funcionamento em 2022.

A Iberdrola será responsável pela produção do hidrogênio verde a partir de fontes 100% renováveis. A solução é composta por uma usina solar fotovoltaica de 100 MW, um sistema de baterias de íon-lítio com capacidade de armazenamento de 20 MWh e um sistema de produção de hidrogênio com eletrólise (IBERDROLA, 2022).

O hidrogênio verde produzido será usado na fábrica de amoníaco da Fertiberia. As instalações são uma das mais eficientes da União Europeia com uma capacidade de produção superior a 200.000 t/ano. A Fertiberia atualizará e modificará as instalações para poder utilizar a produção do hidrogênio verde e, dessa forma, fabricar fertilizantes verdes.

Figura 19 - Usina de H2V Iberdrola para uso industrial na empresa Fertiberia.



Fonte: IBERDROLA, 2022.

Dados da Fertiberia apontam que será possível reduzir em mais de 10 % as necessidades de gás natural nas instalações e será a primeira empresa europeia do setor que desenvolve uma experiência em larga escala de geração de amoníaco verde. O oxigênio obtido como coproduto da eletrólise da água será destinado integralmente à unidade de ácido nítrico da Fertiberia, reduzindo assim suas emissões.

O projeto é desenvolvido no município de Puertollano (Ciudad Real, Espanha), uma localização privilegiada, com um importante polo industrial e onde está situado o Centro Nacional do Hidrogênio que presta assessoria durante sua criação. Seu desenvolvimento e construção gerará 700 postos de trabalho e, assim que estiver totalmente operacional, evitará a emissão de 39.000 tCO₂/ano.

8 PROGRAMAS GOVERNAMENTAIS DE INCENTIVO AO H₂V

O mercado de hidrogênio, como já mencionado anteriormente, tem ganhado *momentum* a partir de políticas energéticas pós-pandemia para a retomada da economia e para acelerar a transição energética em diversos países (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b). Vários governos nacionais anunciaram ou reforçaram estratégias e políticas para o hidrogênio (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019b).

Os EUA, que já tinham lançado sua visão (*A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy—to 2030 and Beyond*), seu *roadmap* (*The National Hydrogen Energy Roadmap*), em 2002, e seus planos (*Hydrogen Posture Plan*, em 2006, e *The Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program Plan*, em 2011), atualizaram e ampliaram sua estratégia em 2020, lançando o documento *The Department of Energy Hydrogen Program Plan*. O plano de 2020 definiu metas para que o hidrogênio e suas tecnologias relacionadas se tornem competitivas no mercado frente a seus concorrentes a partir dos avanços técnicos necessários para tal ao longo do horizonte 2050.

O Japão organizou o primeiro encontro Ministerial sobre Hidrogênio Energético, que resultou na Declaração de Tóquio definindo quatro áreas principais para acelerar o progresso da tecnologia do hidrogênio. Em março de 2019, o Japão alterou seu Mapa Tecnológico para Células a Combustível e Hidrogênio, definindo metas de custo mais quantitativas. A Austrália publicou um Mapa Tecnológico do Hidrogênio em agosto de 2018, e anunciou planos de lançar sua Estratégia para o Hidrogênio em dezembro de 2019.

A China lançou programas para automóveis elétricos em 10 cidades, que pode ser replicado para o transporte público baseado em hidrogênio em Pequim, Xangai e Chengdu, além da intenção de construir a primeira cidade do hidrogênio chinesa, com primeira cidade do hidrogênio chinesa, com previstos 300 postos de 300 postos de abastecimento até 2025.

A França anunciou o Plano de Desenvolvimento do Hidrogênio para a Transição Energética em junho de 2018. O plano francês inclui metas de 20% a 40% de uso de hidrogênio de baixo carbono em aplicações industriais do hidrogênio, e uma redução no custo da eletrólise para entre 2 a 3 euros/kg H₂ em 2028.

A Alemanha, que consolidou sua Estratégia Nacional do Hidrogênio em junho de 2020, reforçou o financiamento de mais de € 1 bilhão a ser aplicado em hidrogênio no âmbito do

Programa de Descarbonização da Alemanha, entre 2020 e 2023, com adicionais € 7 bilhões para acelerar o desenvolvimento do mercado alemão e € 2 bilhões para dar suporte às parcerias internacionais, reconhecendo que o país necessitará de importações de grandes volumes para alcançar as metas estabelecidas de redução de emissões de carbono de sua economia (GERMANY, 2020).

Portugal aprovou o Plano Nacional de Hidrogênio em agosto de 2020 que exhibe o hidrogênio verde como vetor relevante para a transição energética no país (PORTUGAL, 2020). Entre os objetivos até 2030 citados no documento estão: injeção entre 10 a 15% de hidrogênio verde na rede de gás natural; construção de 50 a 100 postos de abastecimento de hidrogênio; 2-2,5GW de capacidade instalada de eletrolisadores.

A Figura 20, apresenta o total de gastos anuais de países com pesquisa e desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio. Estados Unidos, Japão e Canadá despontam como os três maiores investidores em pesquisa e desenvolvimento, onde só sua parcela representa cerca de 64% do investimento total.

Figura 20 - Investimento anual em pesquisa e desenvolvimento em tecnologias do hidrogênio por país.

Pesquisa em C&T: Valores expresso em milhares de dólares americanos.																	
País	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	somatório
Austrália	0.321	0	0.195	0.612	0.295	1.073	1.993	2.037	0.182	1.477	3.271	3.341	3.018	4.174	21.989
Áustria	0	2.767	9.355	1.653	3.305	3.622	4.79	2.89	4.921	5.014	10.338	2.087	3.843	5.551	60.136
Bélgica	0.825	..	..	0	1.851	0.275	0	3.96	1.506	1.525	2.294	12.236
Canadá	38.016	40.582	52.21	35.857	63.177	48.771	46.197	41.124	21.582	14.121	10.795	10.198	17.048	16.984	456.662
República Tcheca	0	0.256	0.255	0.246	0.319	0.28	0.186	1.389	1.725	1.849	0.89	0.928	0.604	..	6.927
Dinamarca	12.695	23.796	27.438	37.66	23.91	20.487	40.509	36.662	30.915	16.356	32.95	17.55	10.27	11.586	342.784
Estônia	1.446	0	0.872	1.08	1.118	0.774	0.72	6.01
Finlândia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
França	30.393	36.749	31.924	61.469	68.257	75.172	73.922	67.214	58.195	62.558	43.652	44.728	45.845	37.475	34.144	33.413	805.11
Alemanha	37.398	31.321	36.102	43.07	33.226	32.336	34.379	36.679	24.667	34.463	28.464	24.421	18.806	26.342	441.674
Grécia	0	0	0	0	0	0	0.697	0.587	..	..	..	..	..	1.284
Hungria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.069	0	0.008	0	0.692	0.769
Irlanda	0	0	0	0	0	0	0.776	0.261	0.136	0.19	0.116	0.052	..	..	1.531
Itália	0	0	27.595	37.028	32.836	21.903	31.98	29.945	19.336	15.675	11.92	22.15	11.436	11.577	273.381
Japão	206.941	218.361	219.174	191.956	198.472	143.345	113.79	96.031	130.188	107.517	114.378	125.928	126.347	132.821	2.125.249
Coreia	32.939	28.89	45.618	47.462	81.928	60.716	55.337	50.531	38.562	37.457	31.335	29.671	38.776	38.533	617.755
Luxemburgo	0	3.914	..	..	..	..	..	3.914
México	0	0	0.433	0	0.11	0.663	0.757	1.963
Países Baixos	9.809	9.156	9.372	10.959	14.54	5.669	0	0	1.851	0.033	0.933	0.352	4.006	66.68
Nova Zelândia	2.208	2.07	1.655	1.582	1.14	1.134	1.093	1.488	1.495	0	0	0.099	0	0	13.964
Noruega	4.53	11.043	11.543	11.452	7.485	14.507	15.069	14.177	7.623	6.175	6.218	7.114	8.705	6.555	132.196
Polónia	0.729	3.274	2.24	7.131	6.719	6.867	2.218	0.79	0.89	0.754	..	31.612
Portugal	0	0.086	0	0.07	0.035	0.053	0.226	0	0.038	0.765	0.73	0.626	..	..	2.629
República Eslovaca	1.528	1.634	1.708	0	0	0.097	0	0.02	0.066	0.011	5.064
Espanha	0	0	2.877	4.798	7.851	5.339	13.292	9.482	8.109	1.293	5.12	7.235	2.81	1.784	69.999
Suécia	3.525	3.219	2.77	2.458	3.748	3.395	2.678	2.478	3.696	3.572	3.794	1.58	1.127	0	38.04
Suíça	10.347	10.189	15.698	14.455	17.115	17.137	16.465	25.692	25.247	28.025	31.003	28.48	30.031	30.109	299.993
Turquia	0.043	0.565	1.379	2.116	0.86	1.048	..	..	..	..	2.824	1.714	3.179	3.019	16.747
Reino Unido	4.709	4.125	11.908	14.76	17.368	18.919	30.257	24.979	20.043	32.127	17.589	18.433	18.707	14.52	248.444
Estados Unidos	194.947	397.742	398.226	383.149	375.996	414.012	382.617	292.285	130.69	156.305	152.86	130.983	105.255	103.338	3.618.405
TOTAL	30.393	36.749	580.543	846.29	941.411	915.753	956.204	894.739	860.143	741.703	523.715	517.298	517.731	474.55	438.376	449.54	9.725.138

Fonte: LAMEIRAS, 2019.

O Brasil também tem demonstrado interesse no desenvolvimento do hidrogênio. Em 2002, o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) lançou o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível (inicialmente denominado PROCAC). Posteriormente, em

2005, este programa passou a ter nova denominação, passando a se chamar Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio, com a sigla PROH2 (LINARDI, 2008).

Também em 2005, o Ministério de Minas e Energia coordenou o chamado “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, um amplo estudo juntamente com o Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT, (CGEE, 2010).

Ressalte-se também que, no país, a ABNT vem discutindo a normatização de tecnologias de hidrogênio, da produção ao uso final, no âmbito da Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio - ABNT/CEE-067 (ABNT, 2021).

Em complemento às ações governamentais anteriormente citadas, podem ainda ser destacadas iniciativas de parcerias internacionais e projetos, visando acelerar a formalização da estratégia nacional de hidrogênio (MME, 2021):

- Participação do Brasil na Parceria Internacional para o Hidrogênio e as Células a Combustível na Economia (INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY, na sigla em inglês), tendo sido o MME o primeiro representante do Brasil na parceria e sendo esta representação atualmente exercida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI);
- A partir da divulgação da Estratégia Alemã para o Hidrogênio em 2020, as parcerias desenvolvidas pelo MME com a Alemanha começaram a incorporar atividades voltadas para a identificação de possibilidades de cooperação com a Alemanha em hidrogênio, especialmente no que se refere à oferta de hidrogênio verde para suprimento da demanda futura da Alemanha, tais como:
 - No âmbito da Parceria Energética Brasil-Alemanha, o Estudo de Mapeamento Setorial do Hidrogênio Verde no Brasil, o qual pretende identificar os principais agentes envolvidos hoje na cadeia de valor do hidrogênio no Brasil e oferecer uma visão geral sobre as principais tecnologias para produção de hidrogênio verde e “Power-to-X” em desenvolvimento no país;
 - No âmbito do Projeto de Cooperação em Tecnologias para Armazenamento de Energia, está sendo desenvolvido um estudo para o levantamento do potencial de produção de hidrogênio verde no Brasil, a fim de subsidiar o desenvolvimento de um novo roteiro para a economia do hidrogênio no Brasil.

- Composição de Grupo de Trabalho Brasil-Chile para realização de trabalho técnico exploratório sobre o potencial de cooperação bilateral em hidrogênio, destacando-se que o interesse daquele país na produção local do denominado “hidrogênio verde”, com intenções de investimento nesse campo, da ordem de US\$ 200 bilhões nos próximos 20 anos.

Todas essas iniciativas simultâneas têm gerado um ambiente de negócios extremamente favorável, aderindo diversos agentes para o desenvolvimento do mercado do hidrogênio. Em particular, face a significativa competitividade das renováveis eólica e solar no Brasil, tem havido especial interesse em desenvolver o H2V no país por parceiros estrangeiros (destaque para a Alemanha) e empreendedores nacionais e internacionais. Boa parte do foco é no desenvolvimento de projetos para exportação do hidrogênio, tanto na forma pura como na forma de amônia e metanol

No final de 2020, foi aprovado pelo Ministério de Minas e Energia, MME, o Plano Nacional de Energia 2050, PNE 20250, tornando o H2V uma tecnologia de interesse estratégico no âmbito da descarbonização da matriz energética, inserindo fontes de energia dissociativas, distribuídas, ampliando o estudo da flexibilidade na forma armazenamento e gerenciamento. Para o setor de transporte e apetrechamento de veículos elétricos, o Plano Diretor define a aplicação de células de combustível do ponto de vista tecnológico. Outro ponto levantado no PNE 2050 é a perspectiva de misturar hidrogênio na malha de gasodutos de gás natural por porcentagem e com pressão limitada para fins de transporte e armazenamento, como uma melhor forma de aproveitamento de gasodutos e de grandes volumes de hidrogênio para fins energéticos.

Como parte do processo de descarbonização e da perspectiva de inserção abrupta do hidrogênio, o PNE 2050 oferece como recomendação de política energética: Estimular as possibilidades de que o uso do hidrogênio possa ajudar a descarbonizar setores em áreas como: transporte, indústria química, áreas residenciais, bem como como criar matérias-primas “limpas” para a indústria, como produção de aço, entre outras; Projetar melhorias regulatórias relacionadas à qualidade, segurança, infraestrutura de transporte, armazenamento, provisão, promoção e uso de novas tecnologias; Cooperar com outras organizações internacionais com iniciativas no campo do hidrogênio.

Em 2021, o MME apresentou ao Conselho Nacional de Política Energética, CNPE, a proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio, PNH2, no Brasil. O estudo foi realizado em cooperação com os MCTI, Ministério do Desenvolvimento Regional, MDR, e contou com o apoio da Empresa de Pesquisa Energética, EPE, em atendimento à Resolução nº 6/2021 do CNPE. O programa se desdobra em 6 eixos temáticos, conforme mostrado na Figura 21, sendo que diversas ações já tiveram início, incluindo a cooperação internacional e estudos de planejamento energético com foco no papel do hidrogênio no Brasil, como citado anteriormente.

Figura 21 - Eixos temáticos do PNH2



Fonte: MME, 2021.

Em 2021, também foi lançado o Pacto Energético para o Hidrogênio, um compromisso voluntário de promoção do desenvolvimento desse mercado, como forma de acelerar a redução de emissões de GEE. A elaboração do Pacto Energético para o Hidrogênio aconteceu devido uma colaboração mútua do MME, Ministério das Relações Exteriores (MRE) e da EPE, com apoio do MCTI e do Ministérios da Educação (MEC). No Pacto apresentado, o governo brasileiro se comprometeu a criar uma base de conhecimento sobre o H₂ no Brasil baseada em 3 pilares: P&D, capacitação e a uma plataforma colaborativa chamada H2+Brasil. O pacto foi apresentado no âmbito no Diálogo em Alto Nível de Energia das Nações Unidas, esse diálogo tem objetivo acelerar o cumprimento das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 – ODS 7.

Nesse contexto, destacam-se também a parceria do Governo do Ceará com a Federação das Indústrias do Estado Ceará (FIEC), com a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Complexo do Pecém (CIPP S/A), onde foi assinado, em fevereiro de 2021, um Decreto para constituir o Grupo de Trabalho com a finalidade de desenvolver políticas públicas de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável e para a configuração do Eixo Central de Investimento, HUB, de Hidrogênio Verde no Estado do Ceará.

Desde então, já foram assinados cinco memorandos de cooperação – com as empresas Enegix, White Martins, Quair, Fortscue e Neoenergia – todos com o objetivo de produzir hidrogênio verde, e assim transformar o Ceará na maior referência de energia limpa no Brasil e do Mundo (HERCULANO, 2021).

Fortescue Future Industries Pty Ltd (FFI), com investimento de US\$ 6 bilhões, a planta de hidrogênio verde será instalada no complexo de Pecém com a expectativa de gerar 2.500 empregos durante a instalação e cerca de 800 empregos, quando a empresa entrar em operação a partir de 2025.

A Qair Brasil está desenvolvendo uma planta de produção de hidrogênio verde elétrico produzida pelo complexo eólico offshore Dragão do Mar e um parque eólico offshore (dentro do mar). O investimento total previsto é de US\$ 6,95 bilhões, com a criação de 2.000 empregos durante a construção da usina e 600 empregos diretos quando os projetos entrarem em pleno funcionamento (QAIR, 2021). Com isso, a multinacional instalada no Ceará está envolvida no projeto que, a partir de 2023, vai produzir, armazenar, transportar e comercializar hidrogênio verde.

A White Martins pretende estabelecer e desenvolver as potencialidades da produção local, voltada prioritariamente à exportação para a Europa. A Neoenergia irá realizar a análise de viabilidade de um projeto de mobilidade urbana com utilização de veículos para transporte público movidos à hidrogênio verde.

Em Pernambuco, foi firmado, em junho de 2021, um Memorando de Entendimento, entre o Governo do Estado, por meio do Complexo Industrial Portuário de Suape, e a Neoenergia para a criação do projeto piloto de uma usina de produção de hidrogênio verde (H2V). A ideia é mobilizar agentes para viabilizar a planta, com objetivo de iniciar a produção, torná-la viável a partir de clientes locais, como Programa Noronha Carbono Neutro de Fernando de Noronha.

A Qair Brasil também demonstrou interesse no investimento em Porto de Suape, em março de 2022 foi aberta a chamada pública para que a multinacional francesa pudesse apresentar oficialmente o projeto de instalação de uma usina produtora de hidrogênio verde no estado, com investimentos da ordem de R\$ 20 bilhões. O investimento é planejado em quatro fases, até chegar a uma produção de 480 mil toneladas de hidrogênio verde ao ano, para atender parte da demanda do mercado europeu.

Além disso, Suape também vem estreitando as relações com o Porto de Hamburgo, na Alemanha, para criação de um corredor de hidrogênio verde ligando o Brasil à Europa (CHIAPPINI, 2022).

Além do Ceará e Pernambuco, Rio Grande do Norte, Bahia e Piauí também possuem memorandos de entendimento com a iniciativa privada para possível produção de H₂V (MACHADO, 2022).

9 HIDROGÊNIO VERDE NA MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL

Como já amplamente abordado, para atender aos compromissos de descarbonização demandados pela sociedade, a melhor situação é buscar a produção do hidrogênio verde, o que representa valer-se ao mesmo tempo de uma fonte renovável para suprimento do hidrogênio e usar energias alternativas como a eólica ou a solar para a obtenção do hidrogênio puro.

Felizmente, o Brasil encontra-se numa posição coringa, já que dispõe dessas fontes em abundância. Conforme demonstrado no decorrer deste trabalho, há ações para o fomento do uso energético do hidrogênio e a sua inclusão nas matrizes energéticas em diferentes países em plena implementação. O Brasil tem uma oportunidade de dar um passo nessa mesma direção, principalmente após inserir o hidrogênio no Plano Nacional de Energia.

Contudo, para que o hidrogênio seja significativo como fonte de energia para a matriz energética nacional ainda será preciso percorrer uma jornada longa. Olhando os caminhos trilhados por outros países chega-se à conclusão de que essa marcha não pode ser conduzida apenas por um órgão específico. Os ministérios da Economia, Infraestrutura, Transportes, Defesa, Meio Ambiente e Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações têm óbvias ligações com o assunto e precisam trabalhar em conjunto, mas a pasta de Minas e Energia é líder das iniciativas e da gerência estratégica das ações.

Considerando toda a análise, abaixo encontram-se propostas baseadas em Lameiras, 2019 e suas considerações sobre as oportunidades para o hidrogênio e o papel dos agentes responsáveis do governo nessa transição energética. Todas procuram viabilizar a inclusão do hidrogênio na matriz energética nacional.

- Aumentar o investimento nas atividades de pesquisa científica, tecnológica e de inovação dos laboratórios de hidrogênio e linhas de pesquisa ligadas à produção de tecnologias e equipamentos destinados à produção de hidrogênio puro e de células a combustível em instituições de ensino superior. Paralelo a isso, a Aumentar o número de bolsas de Mestrado e Doutorado em linhas de pesquisa ligadas às tecnologias necessárias ao desenvolvimento do uso energético do hidrogênio

Agentes responsáveis: MEC/CAPES; MCTIC/FINEP/CNPQ

- Avaliar a participação dos órgãos de Ciência e Tecnologia das Forças Armadas no desenvolvimento de tecnologias atinentes ao uso do hidrogênio como fonte de energia.

Agente responsável: Ministério da Defesa

- Incluir nos leilões de energia a oferta de um empreendimento piloto de geração híbrida que contemple o uso do hidrogênio para o armazenamento de energia.

Agente responsável: ANEEL

- Avaliar se é possível a inclusão nos leilões específicos de energia eólica a geração *offshore* com a possibilidade de transmissão convencional de energia ou por meio do hidrogênio como vetor energético.

Agente responsável: EPE

- Estudar a possibilidade de redução de impostos na produção de equipamentos e componentes de eletrolisadores; células a combustível; e de veículos movidos a hidrogênio, como empilhadeiras, ônibus e automóveis. Como incentivo fiscal aos setores.

Agente responsável: Ministério da Economia

10 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou realizar uma revisão da indústria do hidrogênio, seus desafios e oportunidades, incluindo estudos sobre evolução tecnológica, de custos e das estratégias nacionais, bem como do levantamento do histórico de iniciativas mundiais e no Brasil relativas ao Hidrogênio.

Neste cenário de transição energética para uma matriz energética mais limpa, o hidrogênio ascende como portador de futuro. Apesar de ser um velho conhecido, mas agora sob a ótica ecológica de hidrogênio verde, o hidrogênio se apresenta como uma solução extremamente útil na busca da energia limpa e sustentável. A versatilidade de possíveis aplicações do hidrogênio armazenado é a razão pela qual a pesquisa sobre essa tecnologia ocupa um lugar importante entre os trabalhos de P&D relacionados à infraestrutura de energia renovável.

A classificação das tecnologias para produção de H₂ em cores diferentes permite observar que as rotas tecnológicas podem ser divididas em 3 grandes origens de produção: decomposição da água, fontes renováveis e combustíveis fósseis. Mundialmente, a produção de H₂ é realizada majoritariamente a partir de gás natural, é um processo de elevada eficiência e bastante maduro, o hidrogênio cinza. Quando comparada às técnicas de produção de hidrogênio verde, a rota tecnológica do hidrogênio cinza ainda é competitiva, entretanto é um cenário em mudança devido ao contínuo investimento no setor, o avanço tecnológico dos eletrolisadores e as metas de descarbonização mundiais.

A oportunidade de alcançar maior eficiência e custo-benefício. na transição energética foi apresentada nos quatro exemplos de aplicações. O primeiro plano mundial de energia eólica e hidrogênio em escala real, o projeto líder americano orientado para a otimização multidimensional da produção de hidrogênio com energia eólica e armazenamento de energia no hidrogênio, o projeto europeu em andamento mais atualizado que visa implementar um modelo totalmente integrado de produção, armazenamento, transporte e utilização de hidrogênio para calor, energia e mobilidade de baixo carbono e a primeira usina de H₂V totalmente dedicada para uso industrial e produção de amoníaco verde.

Com a análise dessas aplicações, é possível concluir que o uso de hidrogênio verde, representa vantagens ambientais e econômicas substanciais como meio de armazenamento de

energia, podendo contribuir significativamente para sistemas de energia mais estáveis, eficientes e sustentáveis.

E, para aproveitar ao máximo os benefícios do hidrogênio, os locais de produção e armazenamento devem oferecer a oportunidade de implementações de hidrogênio, especialmente transporte e aplicações estacionárias, como exemplo, instalar estações de reabastecimento de hidrogênio para veículos e embarcações marítimas. Ao pesquisar sistemas híbridos de armazenamento energético e geração distribuída, seus projetos têm potencial para contribuir significativamente na produção de soluções para acumulação energética das fontes intermitentes de energia e para a mobilidade

As últimas barreiras tecnológicas para o uso do hidrogênio estão sendo vencidas nos setores de produção, transporte e armazenamento, tornando essa fonte energética cada vez mais acessível. As políticas globais que têm sido implementadas para diminuir os custos de produção, distribuição e aplicação do hidrogênio verde são grandes responsáveis pelas travessias dessas barreiras tecnológicas.

O Brasil desponta como potencial fornecedor de hidrogênio verde em virtude de uma invejável diversidade de fontes renováveis presentes em abundância em seu território. Tendo um relevante histórico de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de produção e uso de hidrogênio. Mais do que estabelecer uma estratégia brasileira de hidrogênio, que já existe na prática desde 2002-2005, cabe consolidar ainda mais a estratégia nacional, com PNH₂, no âmbito do MME e do MCTI. O aproveitamento mais amplo de projetos energéticos baseados em hidrogênio demandará um aporte mais continuado de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação para que o país seja um ator relevante na Economia do Hidrogênio que se apresenta.

Na estratégia brasileira do hidrogênio, inicialmente, todas as cores devem importar, consistindo em uma estratégia de hidrogênio “arco-íris”, isso permitirá ao país aproveitar ao máximo suas vantagens competitivas existentes e construir novas vantagens competitivas em benefício de sua sociedade, contudo é necessário manter o hidrogênio verde, obtido a partir da energia eólica e solar, como protagonista, e de forma gradual erradicar o hidrogênio cinza.

Na prática, isso significa que o Brasil deve abraçar as oportunidades de desenvolvimento das diversas tecnologias de produção e uso do hidrogênio. Essa abordagem se mostra como a mais consistente e promissora para viabilizar uma trajetória de descarbonização profunda dos

sistemas energéticos, acelerando a formação de mercados, evitando trancamentos tecnológicos e tirando proveito da diversidade de recursos energéticos do país.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT/CEE-067**: Comissão de estudo especial de tecnologias de hidrogênio. 2021. Disponível em: <https://www.abnt.org.br/normalizacao/comites-tecnicos>. Acesso em: 15 abr. 2022.
- ALVARENGA, P. O Hidrogênio verde e a transição para uma economia de baixo carbono. **Revista Brasil-Alemanha**, Brasil, ano 29, n. 01, p. 42-45, 1 out. 2021. Disponível em: <https://www.ahkbrasilien.com.br/publicacoes/revista-brasilalemanha>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- AMOS, W. A. **Costs of storing and transporting hydrogen**. Golden, Colorado: NREL, nov. 1998. 216 p. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25106.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.
- AZEVEDO, J. **O que é hidrogênio e quais suas características?** [S. l.]: ECYCLE, 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio/>. Acesso em: 18 mar. 2022
- BATAGLIOTTI, J. ABC do Hidrogênio Verde. **Revista Brasil-Alemanha**, Brasil, ano 29, n. 01, p. 18-25, 1 out. 2021. Disponível em: <https://www.ahkbrasilien.com.br/publicacoes/revista-brasilalemanha>. Acesso em: 27 mar. 2022.
- BEZERRA, F. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**. Fortaleza, ano 6, n. 212, p. 1-13, dez. 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 24 mar. 2022.
- BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. **Hydrogen economy outlook: key messages**. [S. l.]: BNFE, 2020. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2022.
- CGEE. **Hidrogênio energético no brasil**: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025. Brasília, 2010. (Documentos Técnicos Agosto 2010 – N° 07). Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5. Acesso em: 20 de mar. de 2022.
- CHIAPPINI, G. **Suape e Qair avançam com projeto de R\$ 20 bi para hidrogênio verde**. [S. l.]: EPBR, 18 mar. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/suape-e-qair-avancam-com-projeto-r-20-bi-para-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 16 abr. 2022.
- DODGSHUN, J. Hydrogen: clearing up the colours. **H2 View**. 02 out. 2020. Disponível em: <https://www.h2-view.com/story/hydrogen-clearing-up-the-colours/>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**, Brasil, 14 jun. 2021. Nota técnica EPE-DEA-NT-003/2021 rev01. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogenio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogenio_rev01%20(1).pdf). Acesso em: 24 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio cinza**: produção a partir da reforma a vapor do gás natural, Brasil, 2022. Nota técnica EPE/DPG/SPG/01/2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogênio%20Cinza.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ESTEVÃO, T. E. R. **O Hidrogênio como combustível**. Orientador: Prof. António Tomé Ribeiro. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008. p. 89. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2022.

FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING. **Commercialization of energy storage in Europe**: a fact-based analysis of the implications of projected development of the European electric power system towards 2030 and beyond for the role and commercial viability of energy storage. Europa: FCH JU, mar. 2015. Disponível em: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/CommercializationofEnergyStorageFinal_3.pdf. Acesso em: 28 mar. 2022

FERNANDES, M. **Brasil pode ser líder na exportação do combustível do futuro.**, 3 jan. 2022. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/brasil-pode-ser-lider-na-exportacao-do-combustivel-do-futuro/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

FUNDACIÓN HIDRÓGENO ARAGÓN (Espanha). **Building innovative green hydrogen systems on isolated territories**, 2019. Disponível em: <https://www.bighit.eu/about>. Acesso em: 13 de abr. de 2022.

GARCIA, D. A. Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01>. Acesso em: 26 mar 2022.

GASES do efeito estufa: Dióxido de Carbono (CO₂) e Metano (CH₄). Dicionário Ambiental. **OECD**, Rio de Janeiro, abr. 2014. Disponível em: <http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28261-gases-do-efeito-estufa-dioxido-de-carbono-co2-e-metano-ch4/>. Acesso em: 19 mar. 2022.

GERMANY. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Public Relations Division. **The National Hydrogen Strategy**. Berlin, 2020. Disponível em: https://www.bmbf.de/files/bmwi_Nationale%20Wasserstoffstrategie_Eng_s01.pdf. Acesso em 20 abr. 2022.

GUBAN, D.; MURITALA, I. K.; ROEB, M.; SATTLER C. Assessment of sustainable high temperature hydrogen production technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, 2020. Disponível em: <https://elib.dlr.de/137976/1/1-s2.0-S0360319919331635-main.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2022

HERCULANO, D. **Governo do Ceará e Neoenergia assinam memorando para estudos de viabilidade para projeto de transporte público movido a hidrogênio verde**. Céara, 20 set.

2021. (Texto retirado do site do Governo do Estado do Ceará, seção Ceará Inovador). Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2021/09/20/governo-do-ceara-e-neoenergia-assinam-memorando-para-projeto-de-transporte-publico-movido-a-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 16 abr. 2022.

HYDROGEN COUNCIL. **Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective**. 20 jan. 2020. Disponível em: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen insights: a perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness**. 20 jan. 2021. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf>. Acesso em: 20 de mar. 2022.

HYDROGEN production using nuclear energy. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. (IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807; no. NP-T-4.2). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/8855/hydrogen-production-using-nuclear-energy>. Acesso em: 24 mar. 2022.

IBERDROLA coloca em funcionamento, junto à Fertiberia, a maior usina de hidrogênio verde para uso industrial na Europa. IBERDROLA. 2020. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacao/noticia/detalhe/iberdrola-coloca-funcionamento-junto-fertiberia-maior-usina-hidrogenio-verde-para-industrial-europa>. Acesso em: 18 abr 2022.

IBERDROLA constrói a maior usina de hidrogênio verde para uso industrial da Europa. IBERDROLA. 2022. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/linhas-negocio/projetos-emblematicos/usina-hidrogenio-verde-puertollano>. Acesso em: 18 abr. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Hydrogen production costs by production source, 2018**. [S. l.]: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018>. Acesso em: 01 abr. 2022

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Prospects for hydrogen and fuel cells**. [S. l.]: IEA, 2005. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/>. Acesso em: 28 mar. 2022

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The future of hydrogen: seizing today's opportunities**. [S. l.]: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 24 mar. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking energy integration**. [S. l.]: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2020>. Acesso em: 01 abr. 2022.

INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY. **Utsira wind power and hydrogen plant**. [S. l.], 2011. Disponível em: http://www.newenergysystems.no/files/H2_Utsira.pdf. Acesso em: 11 de abr. de 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Hydrogen: a renewable energy perspective**. [S. l.]: IRENA, 2019. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf. Acesso em: 17 mar. 2022

JOUHARA, H., SAYEGH, M.A. Energy efficient thermal systems and processes. **Therm Sci. Enginier Progress**, ano 7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.07.016>. Acesso em: 22 mar. 2022.

KPMG. **The hydrogen trajectory**. Estados Unidos, 2020. Disponível em: <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/11/the-hydrogen-trajectory.html>. Acesso em: 03 abr. 2022.

LAMEIRAS, F. L. **O hidrogênio como vetor de energia**. Orientador: Prof Dr Fernanda das Graças Corrêa. 2019. 90 p. Monografia (Diploma em Altos Estudos de Política e Estratégia.) - Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.

LARMINIE, J.; DICKS, A. **Fuel cell systems explained**. 02. ed. Reino Unido: Jon Wiley & Son Ltd, 2003. 433 p.

LEE, D. Cost-benefit analysis, LCOE and evaluation of financial feasibility of full commercialization of biohydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**. v 42. 2016. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915023575>. Acesso em: 01 abr. 2022.

LINARDI, M. **Hidrogênio e Células a Combustível**. ECEN - Economia & Energia, São Paulo, ano 09, n. 66, p. 01-06, 8 mar. 2008. Disponível em: https://ecen.com/eee66/eee66p/hidrogenio_e_celulas_a_combustivel.htm. Acesso em: 24 mar. 2022.

MACHADO, N. **Cinco estados no Nordeste têm projetos para hidrogênio verde**. [S. l.]: EPBR, 26 nov. 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/cinco-estados-no-nordeste-tem-projetos-para-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 16 abr. 2022.

MALINAUSKAITE, J. et al. Energy efficiency in industry: UE and national policies in Italy and the UK. **Revista Energy**, ano 172, 2019. Disponível em: <https://doi:10.1016/j.energy.2019.01.130>. Acesso em: 26 mar. 2022.

MANTOVANI, P. Hidrogênio verde: Brasil abre as portas para a energia do futuro. **Revista Cobertura**, 10 ago. 2021. Disponível em: <https://www.revistacobertura.com.br/noticias/artigos/hidrogenio-verde-brasil-abre-as-portas-para-a-energia-do-futuro/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MARIN, A. et al. Produção de hidrogênio através da reforma-vapor do etanol para aplicações em células a combustível: protótipo de primeira geração. In: AGRENER GD - ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 5., 2004, São Paulo. **Artigo**. São Paulo: USP, 2004. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/AGRENER2004/Fscommand/PDF/Wicac/13-%20AntonioJMarinNeto.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2022.

MELAINA, M.; EICHMAN, J. **Hydrogen energy storage: grid and transportation services**. National Renewable Energy Laboratorie. Denver, Estados Unidos. 2015. (Relatório técnico NREL/TP-5400-62518). Disponível em: <https://doi.org/10.2172/1170355>. Acesso em: 26 mar. 2022.

MOREIRA, J. **Análise teórica e experimental da redução de consumo de um motor de combustão interna do BAJA com uso de mistura gasolina-hidrogênio**. 2018. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1569>. Acesso em: 10 abr. 2022.

OGDEN, J. M. Prospects for building a hydrogen energy infrastructure. **Revista Energy Environ**, ano 24, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.24>. Acesso em: 22 mar. 2022.

PALHARES, D. **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Minas Gerais, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21286>. Acesso em 30 mar. 2022.

PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY. **Hydrogen Production energy conversion efficiencies**. [S. l.]: PNNL, 2020. Disponível em: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-production-energy-conversion-efficiencies>. Acesso em: 27 mar. 2022.

PORTUGAL. Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, de 14 de agosto de 2020. (Dispõe sobre o Plano Nacional do Hidrogénio). **Diário da República Portuguesa**: 1.ª série: n. 158, p. 7, 14 ago. 2020. Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/documento?i=plano-nacional-do-hidrogenio>. Acesso em: 10 abr. 2022.

PROCESSO de refino. [Adaptado do material original de Elie Abadie]. Curitiba: PETROBRAS, 2003

PRINZHOFER, A.; CISSÉ, C.; DIALLO, A. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918327861>. Acesso em: 23 mar. 2022.

RAMSDEN; HARRISON, T. K.; STEWARD, D. **Wind to Hydrogen Project: renewable hydrogen production for energy storage & transportation**. NREL Hydrogen Technologies and Systems Center, U. S. Department Of Energy (EUA), 2009. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47432.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2022.

S&P GLOBAL PLATTS. **Hydrogen Price Assessments**. [S. l.]: 2020. Disponível em: https://www.spglobal.com/platts/plattscontent/_assets/_files/en/our-methodology/methodology-specifications/hydrogen-factsheet.pdf. Acesso em: 02 abr 2022.

SANTOS, A. C. F. **Análise da Viabilidade Econômica da Produção de Hidrogênio em Usinas Hidrelétricas**: estudo de caso em Itaipu. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87403>. Acesso em: 01 abr. 2022.

SCHILLER, M. Hydrogen energy storage: a new solution to the renewable energy intermittency problem. **Renewable Energy World**. 16 jul. 2014. Disponível em: <https://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/07/hydrogen-energy-storage-a-new-solution-to-the-renewableenergy-intermittency-problem>. Acesso em: 12 abr. 2022.

SIBLERUD, R. **Our future is hydrogen! Energy, environmental and economy**. 1. ed. Wellington, Colorado: New Science Publications, 2001. 173 p.

SILVA, E. P. **Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio**. 1 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1991. 204 p.

SOUZA, M. **Hidrogênio e células a combustível**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2018. 240 p.

TUDO o que você precisa saber sobre o Acordo de Paris. [S. l]: **ECYCLE**. 08 abr. 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/acordo-de-paris/>. Acesso em: 19 de mar. de 2022.

URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers**, v. 100, n. 2, 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5898382>. Acesso em: 02 abr. 2022

WIDERA, B. Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 16, 2020. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100460>. Acesso em: 23 mar. 2022.

YANG, C. Hydrogen and electricity: parallels, interactions and convergence. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2008. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/0p14s1cg>. Acesso em: 26 mar. 2022.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, 2010. Disponível em: https://www.epfl.ch/labs/tic/wp-content/uploads/2018/10/Art11_Alkaline-water-electrolysis.pdf. Acesso em: 29 mar. 2022.

ZHAO et al. Life cycle cost analysis: A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 19, 12 abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.015>. Acesso em: 15 abr. 2022.

ZGONNIK, V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. **Earth-Science Reviews**, v. 203, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825219304787>. Acesso em: 23 mar. 2022.

ANEXOS

ANEXO A – TABELA PERIÓDICA

1		2A (2)		3A (13)		4A (14)		5A (15)		6A (16)		7A (17)		8A (18)	
Hidrogênio 1 H 1,0079		Lítio 3 Li 6,941		Boro 5 B 10,811		Carbono 6 C 12,011		Nitrogênio 7 N 14,0067		Oxigênio 8 O 15,9994		Flúor 9 F 18,9984		Hélio 2 He 4,0026	
2		3		4		5		6		7		8		9	
Lítio 3 Li 6,941		Berílio 4 Be 9,0122		Boro 5 B 10,811		Carbono 6 C 12,011		Nitrogênio 7 N 14,0067		Oxigênio 8 O 15,9994		Flúor 9 F 18,9984		Hélio 2 He 4,0026	
3		4		5		6		7		8		9		10	
Sódio 11 Na 22,9898		Magnésio 12 Mg 24,3050		Alumínio 13 Al 26,9815		Silício 14 Si 28,0855		Fósforo 15 P 30,9738		Enxofre 16 S 32,066		Cloro 17 Cl 35,4527		Argônio 18 Ar 39,948	
4		5		6		7		8		9		10		11	
Potássio 19 K 39,0983		Cálcio 20 Ca 40,078		Escândio 21 Sc 44,9559		Titânio 22 Ti 47,867		Vanádio 23 V 50,9415		Cromo 24 Cr 51,9961		Manganês 25 Mn 54,9380		Zinco 30 Zn 65,39	
5		6		7		8		9		10		11		12	
Rubídio 37 Rb 85,4678		Estrôncio 38 Sr 87,62		Ítrio 39 Y 88,9059		Zircônio 40 Zr 91,224		Nióbio 41 Nb 92,9064		Molibdênio 42 Mo 95,94		Tecnécio 43 Tc (97,907)		Cádmio 48 Cd 112,411	
6		7		8		9		10		11		12		13	
Césio 55 Cs 132,9054		Bário 56 Ba 137,327		Lantânio 57 La 138,9055		Háfânio 72 Hf 178,49		Tântalo 73 Ta 180,9479		Tungstênio 74 W 183,84		Rênio 75 Re 186,207		Estanho 50 Sn 118,710	
7		8		9		10		11		12		13		14	
Frâncio 87 Fr (223,02)		Rádio 88 Ra (226,0254)		Actínio 89 Ac (227,0278)		Rutherfordio 104 Rf (261,11)		Dúbnio 105 Db (262,11)		Seabórgio 106 Sg (263,12)		Bohrio 107 Bh (262,12)		Chumbo 82 Pb 207,2	
8		9		10		11		12		13		14		15	
Polônio 84 Po (209,98)		Astatínio 85 At (209,99)		Telúrio 52 Te 127,60		Iodo 53 I 126,9045		Xenônio 54 Xe 131,29		Radônio 86 Rn (222,02)		Hólmio 67 Ho 164,9303		Íterbio 70 Yb 174,967	
9		10		11		12		13		14		15		16	
Bismuto 83 Bi 208,9804		Poloônio 84 Po (209,98)		Antimônio 51 Sb 121,760		Telúrio 52 Te 127,60		Iodo 53 I 126,9045		Xenônio 54 Xe 131,29		Radônio 86 Rn (222,02)		Lutécio 71 Lu 174,967	
10		11		12		13		14		15		16		17	
Tálio 81 Tl 204,3833		Chumbo 82 Pb 207,2		Estanho 50 Sn 118,710		Índio 49 In 114,818		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934	
11		12		13		14		15		16		17		18	
Mercúrio 80 Hg 200,59		Tálio 81 Tl 204,3833		Chumbo 82 Pb 207,2		Estanho 50 Sn 118,710		Índio 49 In 114,818		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332	
12		13		14		15		16		17		18		19	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
13		14		15		16		17		18		19		20	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
14		15		16		17		18		19		20		21	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
15		16		17		18		19		20		21		22	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
16		17		18		19		20		21		22		23	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
17		18		19		20		21		22		23		24	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
18		19		20		21		22		23		24		25	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
19		20		21		22		23		24		25		26	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
20		21		22		23		24		25		26		27	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
21		22		23		24		25		26		27		28	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
22		23		24		25		26		27		28		29	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
23		24		25		26		27		28		29		30	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
24		25		26		27		28		29		30		31	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
25		26		27		28		29		30		31		32	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
26		27		28		29		30		31		32		33	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
27		28		29		30		31		32		33		34	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
28		29		30		31		32		33		34		35	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
29		30		31		32		33		34		35		36	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
30		31		32		33		34		35		36		37	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
31		32		33		34		35		36		37		38	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
32		33		34		35		36		37		38		39	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
33		34		35		36		37		38		39		40	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
34		35		36		37		38		39		40		41	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
35		36		37		38		39		40		41		42	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
36		37		38		39		40		41		42		43	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
37		38		39		40		41		42		43		44	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39	
38		39		40		41		42		43		44		45	
Cobalto 27 Co 58,9332		Níquel 28 Ni 58,6934		Cádmio 48 Cd 112,411		Zinco 30 Zn 65,39		Cobalto 27 Co 58							

ANEXO B – MASSA MOLAR, CONSTANTE DO GÁS E PROPRIEDADES DO PONTO CRÍTICO

Massa molar, constante do gás e propriedades do ponto crítico

Substância	Fórmula	Massa molar, M kg/kmol	Constante do gás, R kJ/kg K*	Propriedades do ponto crítico		
				Temperatura, K	Pressão, MPa	Volume, m ³ /kmol
Ar	—	28,97	0,2870	132,5	3,77	0,0883
Amônia	NH ₃	17,03	0,4882	405,5	11,28	0,0724
Argônio	Ar	39,948	0,2081	151	4,86	0,0749
Benzeno	C ₆ H ₆	78,115	0,1064	562	4,92	0,2603
Bromo	Br ₂	159,808	0,0520	584	10,34	0,1355
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430	425,2	3,80	0,2547
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	0,1889	304,2	7,39	0,0943
Monóxido de carbono	CO	28,011	0,2968	133	3,50	0,0930
Tetracloro de carbono	CCl ₄	153,82	0,05405	556,4	4,56	0,2759
Cloro	Cl ₂	70,906	0,1173	417	7,71	0,1242
Clorofórmio	CHCl ₃	119,38	0,06964	536,6	5,47	0,2403
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120,91	0,06876	384,7	4,01	0,2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102,92	0,08078	451,7	5,17	0,1973
Etano	C ₂ H ₆	30,070	0,2765	305,5	4,48	0,1480
Álcool etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,1805	516	6,38	0,1673
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964	282,4	5,12	0,1242
Hélio	He	4,003	2,0769	5,3	0,23	0,0578
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	86,179	0,09647	507,9	3,03	0,3677
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1240	33,3	1,30	0,0649
Kriptônio	Kr	83,80	0,09921	209,4	5,50	0,0924
Metano	CH ₄	16,043	0,5182	191,1	4,64	0,0993
Álcool metílico	CH ₃ OH	32,042	0,2595	513,2	7,95	0,1180
Clorometano	CH ₃ Cl	50,488	0,1647	416,3	6,68	0,1430
Neônio	Ne	20,183	0,4119	44,5	2,73	0,0417
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968	126,2	3,39	0,0899
Óxido nítrico	N ₂ O	44,013	0,1889	309,7	7,27	0,0961
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598	154,8	5,08	0,0780
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,1885	370	4,26	0,1998
Propileno	C ₃ H ₆	42,081	0,1976	365	4,62	0,1810
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,063	0,1298	430,7	7,88	0,1217
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,08149	374,2	4,059	0,1993
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137,37	0,06052	471,2	4,38	0,2478
Água	H ₂ O	18,015	0,4615	647,1	22,06	0,0560
Xenônio	Xe	131,30	0,06332	289,8	5,88	0,1186

*A unidade kJ/kg·K equivale a kPa·m³/kg·K. A constante do gás é calculada por $R = R_u/M$, onde $R_u = 8,31447$ kJ/kmol·K e M é a massa molar.

Fonte: K. A. Kobe e R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117-236; e ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 e 36.1.

Fonte: ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013. 1018 p.

ANEXO C – CALORES ESPECÍFICOS DE GÁS IDEAL PARA GASES COMUNS

Calores específicos de gás ideal para diversos gases comuns

(a) A 300K

Gás	Fórmula	Constante do gás, R kJ/kg-K	c_p kJ/kg-K	c_v kJ/kg-K	k
Ar	—	0,2870	1,005	0,718	1,400
Argônio	Ar	0,2081	0,5203	0,3122	1,667
Butano	C ₄ H ₁₀	0,1433	1,7164	1,5734	1,091
Dióxido de carbono	CO ₂	0,1889	0,846	0,657	1,289
Monóxido de carbono	CO	0,2968	1,040	0,744	1,400
Etano	C ₂ H ₆	0,2765	1,7662	1,4897	1,186
Etileno	C ₂ H ₄	0,2964	1,5482	1,2518	1,237
Hélio	He	2,0769	5,1926	3,1156	1,667
Hidrogênio	H ₂	4,1240	14,307	10,183	1,405
Metano	CH ₄	0,5182	2,2537	1,7354	1,299
Neônio	Ne	0,4119	1,0299	0,6179	1,667
Nitrogênio	N ₂	0,2968	1,039	0,743	1,400
Octano	C ₈ H ₁₈	0,0729	1,7113	1,6385	1,044
Oxigênio	O ₂	0,2598	0,918	0,658	1,395
Propano	C ₃ H ₈	0,1885	1,6794	1,4909	1,126
Vapor de água	H ₂ O	0,4615	1,8723	1,4108	1,327

Nota: A unidade kJ/kg-K é equivalente a kJ/kg-°C.

Fonte: Kyle, B. G., *Chemical and Process Thermodynamics 3/E* by Kyle, B. G. © 2000. Adaptado com a permissão de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

Fonte: ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinâmica*. 7. ed. Porto Alegre, RS:

AMGH, 2013. 1018 p.

ANEXO D – PROPRIEDADES DE LÍQUIDOS, SÓLIDOS E ALIMENTOS COMUNS

Propriedades de líquidos, sólidos e alimentos comuns

(a) Líquidos

Substância	Dados de ebulição a 1 atm		Dados de solidificação		Propriedades dos líquidos		
	Ponto normal de ebulição, °C	Calor latente de vaporização h_{fg} , kJ/kg	Ponto de solidificação, °C	Calor latente de fusão h_{if} , kJ/kg	Temperatura, °C	Densidade ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , kJ/kg·K
Amônia	-33,3	1.357	-77,7	322,4	-33,3	682	4,43
					-20	665	4,52
					0	639	4,60
					25	602	4,80
Argônio	-185,9	161,6	-189,3	28	-185,6	1.394	1,14
Benzeno	80,2	394	5,5	126	20	879	1,72
Salmoura (20% de cloreto de sódio em massa)	103,9	—	-17,4	—	20	1.150	3,11
n-Butano	-0,5	385,2	-138,5	80,3	-0,5	601	2,31
Dióxido de carbono	-78,4*	230,5 (em 0 °C)	-56,6	—	0	298	0,59
Etanol	78,2	838,3	-114,2	109	25	783	2,46
Alcool etílico	78,6	855	-156	108	20	789	2,84
Etilenoglicol	198,1	800,1	-10,8	181,1	20	1.109	2,84
Glicerina	179,9	974	18,9	200,6	20	1.261	2,32
Hélio	-268,9	22,8	—	—	-268,9	146,2	22,8
Hidrogênio	-252,8	445,7	-259,2	59,5	-252,8	70,7	10,0
Isobutano	-11,7	367,1	-160	105,7	-11,7	593,8	2,28
Querosene	204–293	251	-24,9	—	20	820	2,00
Mercúrio	356,7	294,7	-38,9	11,4	25	13.560	0,139
Metano	-161,5	510,4	-182,2	58,4	-161,5	423	3,49
					-100	301	5,79
Metanol	64,5	1.100	-97,7	99,2	25	787	2,55
Nitrogênio	-195,8	198,6	-210	25,3	-195,8	809	2,06
					-160	596	2,97
Octano	124,8	306,3	-57,5	180,7	20	708	2,10
Óleo (leve)	—	—	—	—	25	910	1,80
Oxigênio	-183	212,7	-218,8	13,7	-183	1.141	1,71
Petróleo	—	230–384	—	—	20	640	2,0
Propano	-42,1	427,8	-187,7	80,0	-42,1	581	2,25
					0	529	2,53
					50	449	3,13
					100	313	3,13
Refrigerante-134a	-26,1	217,0	-96,6	—	-50	1.443	1,23
					-26,1	1.374	1,27
					0	1.295	1,34
					25	1.207	1,43
Água	100	2.257	0,0	333,7	0	1.000	4,22
					25	997	4,18
					50	988	4,18
					75	975	4,19
					100	958	4,22

* Temperatura de sublimação. (A pressões abaixo da pressão do ponto triplo de 518 kPa, o dióxido de carbono existe como um sólido ou um gás. Da mesma forma, a temperatura do ponto de solidificação do dióxido de carbono é a temperatura de ponto triplo, -56,5 °C.)

Fonte: ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013. 1018 p.