



VOLUME 5

Economia do Hidrogênio e os significados dos termos Pt-X

THORSTEN SCHNEIDERS, INGO STADLER,
MARINA DOMINGUES, MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ,
JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES, AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

A Transição Energética para o Carbono Zero (H2 Pt- X)

Projeto H2Brasil – Expansão do Hidrogênio Verde

Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável (Componente 03 – Capacitação)

Implementação: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)

- Diretor: Markus Francke
- Coordenador: Martin Studte

Coordenação Geral: INTEGRATION / GOPA_INTEC

- Coordenação: Klaus-Peter Albrechtsen
- Especialista: Lothar Hoppe
- Especialista: Rosana Z. Domingues
- Tradução: Francisco Polatscheck
- Revisão: Victor N. Bistrizki

Coordenação dos Cursos e Livros: Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética

- Coordenação Geral dos cursos: Júlia Teixeira Fernandes
- Coordenação Acadêmica: Aurélio Lamare Soares Murta
- Coordenação Operacional: Roney Ramaiano de Souza Silva
- Coordenação Pedagógica: Ariane Louzada Sasso Ferrão
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Bianca Zorzetto Carniel Furquim
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Isabelle Freire Sousa

Economia do Hidrogênio e os significados dos termos Pt-X

Ficha catalográfica

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Economia do hidrogênio e os significados dos termos Pt-X [livro eletrônico] : volume 5 / Thorsten Schneiders...[et al.]. -- Brasília, DF : LaSUS FAU, 2023.(Coleção 1: conceitos do H2 power-to-x) PDF

Outros autores: Ingo Stadler, Marina Domingues, Mário González, Júlia Fernandes, Aurélio Murta.

ISBN 978-65-84854-27-7

1. Carbono 2. Economia - Aspectos ambientais
3. Energia - Fontes alternativas 4. Hidrogênio
5. Sustentabilidade ambiental.

I. Série.

23-178231

CDD-333.794

Índices para catálogo sistemático:

1. Brasil : Energias renováveis : Desenvolvimento sustentável : Economia 333.794

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

Dados editoriais:

Editora: LaSUS FAU UnB

Equipe editorial:

- Professor Dr. Caio Frederico e Silva (ed)
- Professora Dra. Marta Bustos Romero(ed)
- Coordenador Técnico: Valmor Cerqueira Pazos



Estante digital: <https://livros.unb.br/>

Economia do Hidrogênio e os significados dos termos Pt-X*



**Esse livro tem como referência a transcrição e adaptação das aulas do Curso 1-Modulo 5 H₂Brasil, 2023.*

Conteúdo das aulas:

THORSTEN SCHNEIDERS
INGO STADLER
MARINA DOMINGUES
MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ

Adaptação para livro:

JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES
AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

Organização do livro:

KLAUS-PETER ALBRECHTSEN
LOTHAR HOPPE
ROSANA ZACARIAS DOMINGUES

Economia do Hidrogênio e os significados dos termos Pt-X

Dr. Thorsten Schneiders

Cologne University of Applied Sciences | thorsten.schneiders@th-koeln.de

Possui doutorado pela Ruhr-Universidade de Bochum, Bochum, Alemanha; Pesquisador do Instituto de Energias Renováveis de Colônia e Professor na área de Armazenamento de Energia, Casa Inteligente, Energia Inteligente na indústria energética; Pesquisa nas áreas de energias renováveis nos países em desenvolvimento: fornecimento de energia sustentável com energias renováveis; Energia solar em combinação com geradores a diesel e armazenamento de bateria; Chefe do "Virtual Institute Smart Energy" (VISE), que é uma plataforma para atuação acadêmica e em empresas.

Dr. Ingo Stadler

Cologne University of Applied Sciences | ingo.stadler@th-koeln.de

Possui doutorado e professor de Energias Renováveis e Economia da Energia no Karlsruher Institut für Technologie (KIT) na Alemanha, que combina o ensino e a investigação de uma forma interdisciplinar; Membro do Instituto de Engenharia de Energia Elétrica (IET); Experiência de ensino, pesquisa e projeto na área de Energia Renovável, Armazenamento de Energia, Integração de energias renováveis nas estruturas de abastecimento; Gestão de energia em sistemas de rede e Projetos relacionados ao Brasil com relação a aplicação do Hidrogênio Verde com energias renováveis.

Dra. Marina Domingues

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) | marinadf@ufmg.br

Formada em Economia, mestre em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual e doutora em Inovação Tecnológica com foco em tecnologias de hidrogênio pela UFMG. Doutorado na Dinamarca, Universidade Federal de Minas Gerais. Durante seu doutorado, foi Analista Sênior de Transições energéticas na Rystad Energy e Diretora de Mercado e Regulação da Associação Brasileira do Hidrogênio. Atua em conjunto com esferas governamentais e industriais. Tem vasta experiência na área de hidrogênio, energia renovável, análise econômica, análise de mercado, marco regulatório, pesquisa científica multidisciplinar, interação B2B.

Dr. Mario Orestes Aguirre Gonzalez

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) | mario.gonzalez@ufrn.br

Doutor em Eng. de Produção (Inovação de Produtos e Integração de Clientes) pela UFSC, Mestre pela UFRN e Graduado em Eng. Industrial no Perú. Especialista em Gestão da Qualidade Total e em Gestão da Inovação Tecnológica, na abordagem Open Innovation. É professor dos programas de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Engenharia do Petróleo. É Coordenador e Fundador do grupo de pesquisa CREATION - Inovação de produtos e processos nas cadeias de valor de energias renováveis (eólica, solar e hidrogênio). Atua pela UFRN na Câmara Temática de Capacitação de RH do Programa Nacional do Hidrogênio - PNH2.

Dra. Júlia Teixeira Fernandes

Universidade de Brasília (UnB) e Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética | julia@quali-a.com

Arquiteta e Urbanista, Doutora pela FAU-UnB, onde é pesquisadora em laboratórios e grupos de pesquisas (LaSUS, LACAM e SiCAC) nas áreas de Sustentabilidade, Bioclimatismo, Conforto Ambiental, Desempenho Térmico e Lumínio, Eficiência Energética, Qualidade Ambiental e Simulação Computacional. Realiza consultorias e capacitações especializadas, em especial, de Etiquetagem de Eficiência Energética das Edificações (PROCEL-EDIFICA/MME), Normas, Certificações, Neoarquitetura e Biofilia. Professora de pós do IPOG e sócia da empresa de tecnologia e inovação Quali-A, implantada no Impact Hub-Brasília. Fundadora do IDB (Instituto Design Biofílico).

Economia do Hidrogênio e os significados dos termos Pt-X

Dr. Aurélio Lamare Soares Murta

Universidade Federal Fluminense (UFF) | aureliomurta@id.uff.br

Graduado em Engenharia Civil, Mestrado em Transportes (IME), Doutorado e Pós-doutorado em transporte e Planejamento Energético e Ambiental UFRJ. É Professor da UFF no Mestrado e Graduação em Administração, Coordenador do MBA em Logística Empresarial, além de Pesquisador do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais/UFRJ. Membro Imortal da Academia Brasileira de Ciências, Artes, História e Literatura (ABRASCI). Áreas de atuação incluem Engenharia de Transportes, Planejamento e Operação Logística, Gerenciamento de Projetos, Pesquisa Operacional e Simulação.

Me. Klaus-Peter Albrechtsen

Integration – International Management Consultants GmbH / GIZ | klausalbrechtsen@yahoo.de

Mestrado em Eletrotécnica de Potência e em Educação Profissional pela Universidade de Hamburgo/Alemanha. Especialista nas áreas de energias renováveis, eficiência energética, gestão de projetos, desenvolvimento organizacional, gestão e desenvolvimento de recursos humanos. Mais de 30 anos de experiência na prestação de respectivos serviços de consultoria em mais de 20 países.

Esp. Lothar Hoppe

Integration / Gopa_Intec / GIZ | lotharhoppe@outlook.com

Engenheiro eletricista com pós-graduação em eficiência energética e gestão de energia pela PUCRS. Com vasta experiência em: consultoria e auditoria nas áreas de eficiência energética, gerenciamento de energia, economia de energia e sistemas de energia renovável, instrutor e professor em energia renovável em empresas e instituições de ensino com SENAI, PUCRS e outras. Atua nas áreas de Solar térmica, fotovoltaica, eólica, biomassa e hidrogênio.

Dra. Rosana Zacarias Domingues

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Integration/GIZ | dominguesrz@gmail.com

Doutorado pelo *Institut National Polytechnique de Grenoble*-França- INPG; Bacharel, Licenciada e Mestre em Química pela UFMG. Especialista no projeto H2Brasil BR-AL (GIZ-MME) de cursos de capacitação, coordena projetos para criação de ação de novos produtos e serviços com equipes multidisciplinares em empresas (CEMIG, EMBRAER, Magnesita etc.) nas áreas de células a combustível, biomateriais e eletroquímica. Participa dos programas de Pós-Graduação -PPGIT/UFMG.

Dr. Victor Bistritzki

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) | bistritzki@ufmg.br

Possui mestrado e doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2021). Tem experiência atuando principalmente nos seguintes temas: energia renovável, inovação de biotecnologias, tecnologias de hidrogênio, panorama de patentes.

Me. Francisco Polatscheck

WordWise tradução simultânea e escrita | wordwisebh@gmail.com

Mestrado em Língua Inglesa pela UFMG; *Certificate of Proficiency in English* (Cambridge); Coordenador de Intérpretes de Conferências e Tradutores Pós-Graduados com mais de vinte anos de atuação no Brasil e exterior. Especialista em Tradução e Escrita Simultânea (Port <> Ingl; Esp > Port/Ingl).

Economia do hidrogênio e os significados dos termos PT-X

THORSTEN SCHNEIDERS, INGO STADLER,
MARINA DOMINGUES, MÁRIO GONZÁLEZ
JÚLIA FERNANDES, AURÉLIO MURTA

Brasília-DF, 2023

Objetivo do livro e proteção aos direitos autorais

Ressaltamos que o conteúdo do livro, segue uma estrutura textual de transcrição de aulas online, com formato didático e informal. A linguagem é acessível, para todos os profissionais, que estão tendo a primeira aproximação com o tema Hidrogênio Verde por meio dos cursos.

Como foram inúmeras solicitações para novas turmas, a coordenação geral dos cursos, avaliou a relevância de todo o conteúdo gerado no projeto, encarando a confecção dos 10 livros como uma oportunidade de democratizar esse conhecimento no Brasil.

Assim, a leitura desse livro, também deve ser feita com esse propósito: uma oportunidade de “ler/ouvir” esses grandes especialistas, durante uma aula sobre H₂Verde. Por isso, o objetivo do livro é ter um caráter técnico, com uma abordagem didática das informações, conteúdos e exemplos ilustrativos, de fácil compreensão, com o propósito de garantir a aprendizagem.

O livro não substitui as publicações e referências acadêmicas sobre o assunto. Para isso, sugerimos conhecer o currículo lattes, a biografia, as publicações (livros e artigos), pesquisas e trabalhos técnicos (de universidades, laboratórios e empresas), desenvolvidos pelos professores conteudistas e especialistas, que são grandes referências no tema no Brasil e mundo.

Lembramos que todo o conteúdo reunido foi fruto de uma iniciativa inédita no país. Reforçamos que todo criador de uma obra intelectual tem seu direito autoral garantido sobre a sua criação. Esse direito é exclusivo dos autores (art. 5.º, XXVII, da Constituição Federal), constitui-se de um direito moral (criação) e um direito patrimonial (pecuniário). Segundo a Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, este material está protegido pela lei de direito autoral.

Solicitamos que qualquer reprodução, parcial ou integral, seja referenciada com a devida autoria e solicitada uma autorização dos autores.

Quanto às imagens utilizadas, suas fontes estão especificadas, e alertamos que o livro não é, e não pode, ser comercializado. O conteúdo é fruto da transcrição das aulas dos professores no Projeto H₂Brasil, que tem o intuito de disseminar o conhecimento no Brasil. Seu uso é exclusivamente didático, utilizando as imagens para fins de estudo ou crítica sobre o assunto em questão.

Apresentação

O contexto mundial de transição energética para uma economia com zero emissões de carbono prioriza o uso de energias renováveis como a solar, a eólica e a hídrica em oposição as oriundas de fontes fósseis. Entretanto, um dos desafios do uso de tais fontes surge pelo fato delas serem intermitentes e não armazenáveis e, portanto, devem ser utilizados localmente ou enviadas para uma rede de distribuição.

No Brasil, a capacidade de produção de energia a partir das fontes renováveis é enorme, podendo gerar, em certos momentos, um excedente de energia. O hidrogênio, H_2 , surge então como uma forma de armazenar estas energias. O H_2 , que é um vetor energético, pode ser obtido através de diferentes rotas, com baixa ou nula emissão de carbono. Caso, a energia usada seja renovável, o H_2 produzido via eletrólise é denominado H_2 Verde.

Em uma de suas ações, o **Projeto H_2 Brasil Power-to-X** previu a capacitação dos futuros profissionais brasileiros que atuarão na cadeia do H_2 Verde. Como foco da “**Componente 3 do Projeto**” (**Educação Profissional e Superior para o Hidrogênio Verde**), foram desenvolvidos cursos teóricos e práticos, desde a produção de H_2 até seu uso final.

O objetivo dos cursos foi abordar desde o conhecimento básico fundamental até detalhar temas mais relevantes para contexto brasileiro. O intuito é a formação de um grande grupo capacitado, que será o futuro corpo docente do tema H_2 Verde no Brasil. (Rede H_2 Brasil). O público-alvo era professores (mestres e doutores) e instrutores nas áreas correlatas ao H_2 Verde, tais como engenharia elétrica, civil, eletrotécnica, mecânica, mecatrônica, química, economia, gestão, TI, economia ou direito com experiência e conhecimento em energias renováveis ou afins.

Foram 1.176 participantes que tiveram a oportunidade de se capacitar, divididos em 11 turmas, num total de 120h de carga horária. As etapas EAD (online) abordaram desde a introdução até a aplicabilidade do H_2 Verde no mercado. Já a etapa presencial focou nos cenários regionais para implantação de tecnologias relacionadas ao H_2 Verde, por meio de visitas técnicas orientadas. Também foram ministrados 8 cursos, denominados *masterclasses*, com mais de 495 inscritos, com carga horária de 20h a 30h, no formato EAD (online).

Esse livro é produto dessas capacitações, que reuniu 23 professores doutores, em temas relacionados ao H_2 Verde. Foi uma ação, inovadora e colaborativa, na criação de conteúdos, do Brasil e Alemanha. Assim todo o material didático dos cursos (transcrição de aulas, slides e apostilas) foi compilado, resultando no desenvolvimento de 2 coleções, com total de 10 livros didáticos do projeto H_2 Brasil Power-to-X.

Expressamos nosso reconhecimento aos autores e toda equipe envolvida, pelo trabalho árduo e inédito. Esperamos que os livros possam contribuir e ampliar ações efetivas para o crescimento do H_2 Power-to-X no Brasil.

Klaus P. Albrechtsen

H_2 Brasil Power to X - Programa de Parceria Alemã-Brasileira

Componente: Formação Profissional e Superior para Hidrogênio Verde

Sumário

1. Conceitos do <i>Power-to-X</i> e e-combustíveis.....	9
1.1. Acoplamento Setorial e as tecnologias “Power-to-X”	12
1.2. Variedade de tecnologias Power-to-X	14
1.3. Power-to-Gas (PtG).....	18
2. Produção de e-combustíveis.....	22
2.1. Eficiência da mobilidade baseada em eletricidade.....	27
3. Economia do Hidrogênio.....	34
3.1. Cadeia de Valor de Hidrogênio.....	37
3.2. Custos do Hidrogênio: O que é o CAPEX? OPEX? LCoH?	42
3.3. Custo do hidrogênio: O que é o Hydex?	51
4. Mercado global de hidrogênio e estratégias nacionais	58
4.1. Hidrogênio: um insumo exportável?	62
4.2. Países diferentes, estratégias diferentes.....	66
5. Considerações Finais.....	77
6. Referências.....	78

1. Conceitos do *Power-to-X* e e-combustíveis

O *Power-to-X* se refere à conversão de energia elétrica em outros vetores energéticos, tais como hidrogênio, amônia, metanol. A partir dessa conversão, é possível utilizar os novos vetores energéticos em diferentes setores energéticos e industriais, de forma similar aos usos de hidrocarbonetos.

O "X" do *Power-to-X* pode ser substituído por uma diversidade de compostos químicos gasosos, líquidos ou sólidos, dependendo da finalidade desejada. Essa conversão de elétrons para moléculas apresenta um papel importante na descarbonização quando associada a fontes renováveis para de geração da eletricidade e a quantidade de CO₂ equivalente emitida durante o processo.

A classificação de cores do hidrogênio indica uma cor para cada processo de produção e pegada de carbono diferente. Essa classificação está em desuso por ser inespecífica e causar ambiguidade no desenvolvimento de projetos e políticas de incentivo ao mercado de hidrogênio nascente, sendo substituída por classificações mais específicas e capazes de melhor quantificar as emissões de carbono referentes ao processo de produção de hidrogênio.

O hidrogênio pode ser produzido a partir da eletrólise associado a eletricidade renovável para quebra da molécula da água em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂). O hidrogênio eletrolítico é também comumente denominado hidrogênio verde. É importante ressaltar que as rotas de produção de hidrogênio, tal como para o hidrogênio produzido a partir de biomassas sustentáveis, também recebem a classificação "verde".

O hidrogênio produzido a partir de insumos fósseis com a captura e sequestro do CO₂, como no caso reforma do gás natural e a gaseificação do carvão, também resultam em um hidrogênio de baixo carbono, também coloquialmente conhecido como hidrogênio azul. A pirólise é outra técnica de produção de hidrogênio, que pode dar origem ao hidrogênio turquesa.

Classificação por cor do hidrogênio depende também do processo de produção:

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

* GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

Figura 1: Fonte: <https://www.H2.bulletin.co>

É importante destacar que as emissões associadas ao processo de produção de hidrogênio não estão somente relacionadas a molécula a ser convertida (ex. água, ou metano), mas também a outros insumos e seus processos de obtenção.

O hidrogênio produzido através de eletrólise pode ter uma baixa emissão de gases de efeito estufa quando utilizando energia elétrica renovável, assim como o hidrogênio produzido a partir de insumos fósseis com sequestro de carbono. Já o hidrogênio produzido a partir de carvão, por exemplo, sem captura de carbono, é considerado um processo altamente intensivo em emissões.

O gráfico a seguir, mostra essas emissões para cada tipo de produção. Para assegurar comparabilidade entre produtores de hidrogênio, a certificação da produção visa estabelecer um valor máximo para a quantidade de CO₂ ou CO₂ equivalente emitido para cada quilo de hidrogênio produzido. Essa relação é de 1 quilo de carbono para 1 quilo de hidrogênio.

Comparação entre as emissões de CO₂ de diferentes rotas de produção de hidrogênio

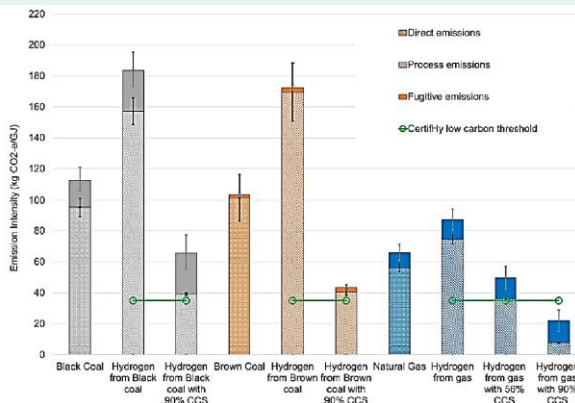


Figura 2: Fonte: Notas de aula, 2023.

A produção de hidrogênio a partir do carvão, tem emissões relativamente altas, mesmo com captura de carbono, ao contrário do produzido a partir do gás natural, onde é possível reduzir significativamente as emissões de CO₂.

Ressalta-se que os processos de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis não são completamente livres de emissão de CO₂. Isso ocorre porque, por exemplo, a manufatura de equipamentos e componentes necessários para a produção do hidrogênio ainda é resulta alta emissão de CO₂ ou requerem extração de minerais que causam danos ambientais severos.

Eletrolise associada a fontes renováveis não é 100% livre de CO₂ devido às emissões do ciclo de vida dos componentes

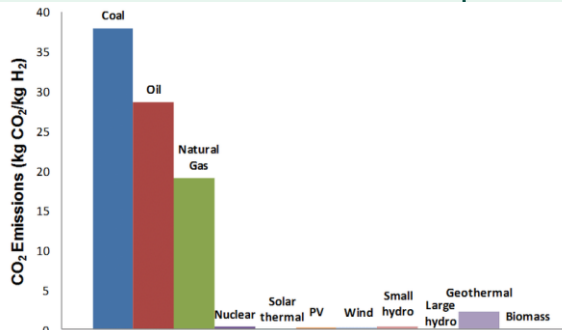


Figura 3: Fonte: Notas de aula, 2023.

O hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis sem captura de carbono apresenta o menor custo, variando entre €0,5 e €3. Já o hidrogênio produzido a partir da eletrólise associada a fontes renováveis, como energia solar e eólica, apresenta um custo mais elevado, sendo mais de três ou quatro vezes o valor do hidrogênio produzido sem abatimento de emissões.

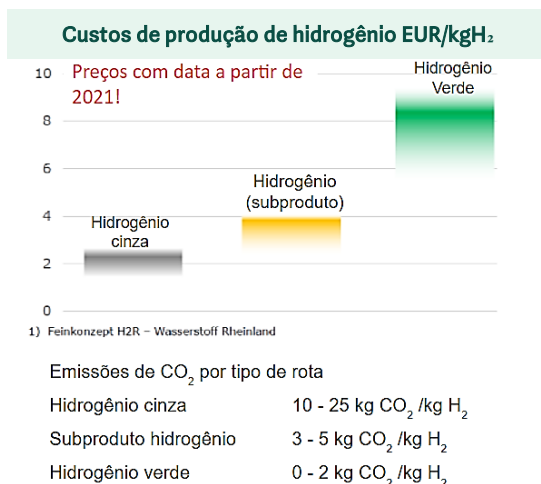


Figura 4: Fonte: Notas de aula, 2023.

O hidrogênio pode ser produzido como um subproduto a partir de processos químicos para produção de outros bens, como o cloro. As emissões de CO₂ desse tipo de hidrogênio são inferiores, o que o torna uma alternativa viável para estímulos à economia do hidrogênio. Em Colônia, na Alemanha, essa rota permitiu a viabilização de projetos de ônibus a hidrogênio.

1.1. Acoplamento Setorial e as tecnologias “Power-to-X”

O acoplamento de setores pode ser caracterizado pela utilização da energia elétrica gerada em outras moléculas energéticas ou formas de energia. Assim, o acoplamento de setores está diretamente relacionado a novas maneiras de utilização da eletricidade.

Acoplamento setorial: integrando diferentes setores de energia e indústria

Elettricidade verde para fornecer a outros setores

Sector coupling – an integrated energy system based on renewable electricity

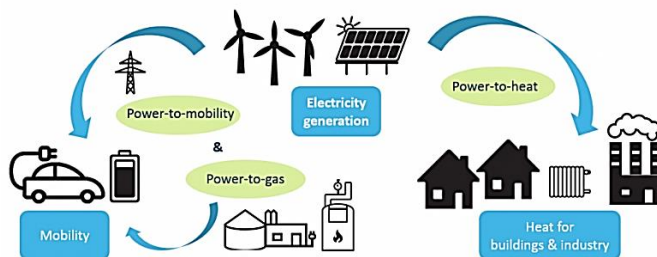


Figura 5: Fonte: Notas de aula, 2023 (Schneiders, TH Cologne).
<https://www.cleanenergywire.org/factsheets/sector-coupling-shaping-integrated-renewable-power-system>

A eletrólise, portanto, permite a empregar energia elétrica, em diversos usos tais como os usos tradicionais do gás natural ou o hidrogênio no setor de transporte, possibilitando reduções de emissões entre esses diferentes setores.

Exemplos de Acoplamento Setorial:

- Combinação de calor e energia;
- Energia para aquecimento (geração de calor a partir de eletricidade por bombas de calor);
- Eletromobilidade (eletricidade como combustível no setor de transportes).

Acoplamento setorial: integrando diferentes setores de energia e indústria

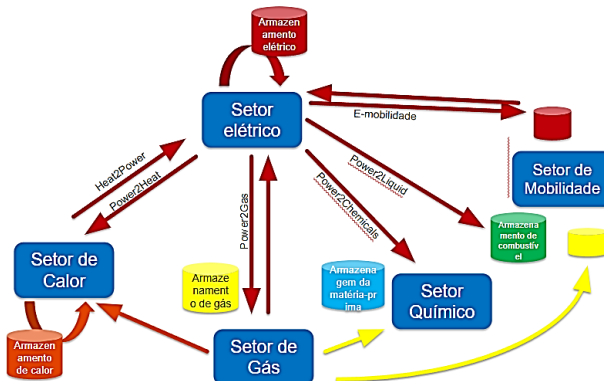


Figura 6: Fonte: Notas de aula, 2023.

1.2. Variedade de tecnologias Power-to-X

A produção de hidrogênio a partir da eletrólise viabiliza o armazenamento de energia para o setor elétrico, o armazenamento de calor, armazenamento do setor de gás, bem como o armazenamento no próprio setor químico e no setor de mobilidade.

O *Power-to-Heat* pode ser empregado para aquecer residências e indústrias. Já a ligação direta do setor elétrico e o setor de mobilidade é chamada de mobilidade elétrica, que pode inclusive devolver a carga para o setor elétrico.

O *Power-to-Gás* é outra possibilidade de integração, que possibilita a produção de gás a partir da eletrólise da água e sua aplicação em diversos setores, tais como aquecimento de residências e veículos movidos a gás. A partir dessa conversão, é possível atingir todos os outros setores, como a produção de fertilizantes no setor químico e a geração de calor no setor elétrico, conhecido como *Heat v2Power*.

O *Power-to-X* pode ser classificado a partir de duas maneiras: pelo uso pretendido ou pela forma de energia resultante.

Pela classificação de uso, temos o *Power-to-Fuel*, que converte energia elétrica em combustíveis sintéticos, o *Power-to-Chemicals*, que produz produtos químicos, o *Power-to-Amônia*, que produz amônia, o *Power-to-Power*, que produz eletricidade, o *Power-to-Protein*, que produz proteínas, e o *Power-to-Syngas*, que produz Syngas.

Já pela classificação por forma de energia, temos o *Power-to-Gás*, que converte energia elétrica em gás natural ou em combustíveis sintéticos, o *Power-to-Liquid*, que produz combustíveis líquidos e o *Power-to-Heat*, que produz calor.

As tecnologias Power-to-X podem ser subdivididas de acordo com o uso pretendido ou forma de energia

Power-to-X pelo uso:

- Power-to-Fuel
- Power-to-Chemicals
- Power-to-Ammonia
- Power-to-Power
- Power-to-Protein
- Power-to-Syngas

Power-to-X por forma de energia:

- Power-to-Gas
- Power-to-Liquid
- Power-to-Heat

Variedade de tecnologias Power-to-X

Power-to-gas é apenas uma opção (proeminente) de acoplamento setorial e Power-to-X

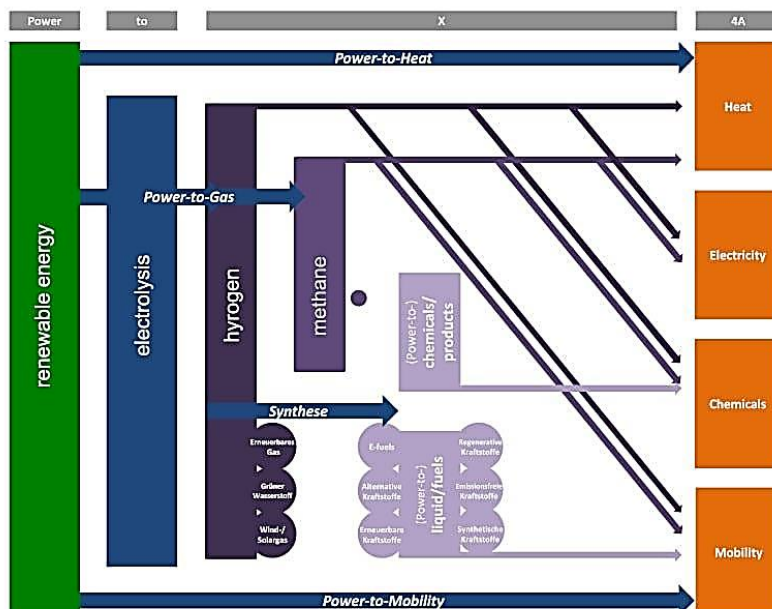


Figura 7: Fonte: <https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>

O **Power-to-Hidrogênio** é o uso da eletricidade para a quebra da água em hidrogênio e oxigênio, processo eletroquímico denominado eletrólise.

Power-to-Hidrogênio

A eletrólise produz hidrogênio e oxigênio a partir de água e eletricidade

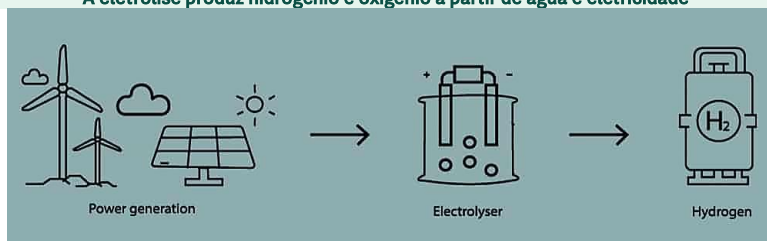


Figura 8: Fonte: <https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>

Quando as fontes renováveis de energia são utilizadas na eletrólise, o hidrogênio se torna um portador de parte da eletricidade gerada. Diferentemente dos elétrons, o hidrogênio é uma molécula que pode ser

transportado em seu estado gasoso, líquido ou transformado em outros derivados, tais como a amônia ou carreadores líquidos orgânicos.

Por meio do *Power-to-Hidrogênio*, é possível gerar energia elétrica para produção de hidrogênio, que pode ser utilizado como portador de energia renovável. Isso é especialmente útil em locais onde a transmissão de energia elétrica é limitada.

No *Power-to-Metano* o hidrogênio é convertido em metano por meio da metanização, na qual o hidrogênio reage com o dióxido de carbono para produzir gás natural sintético.

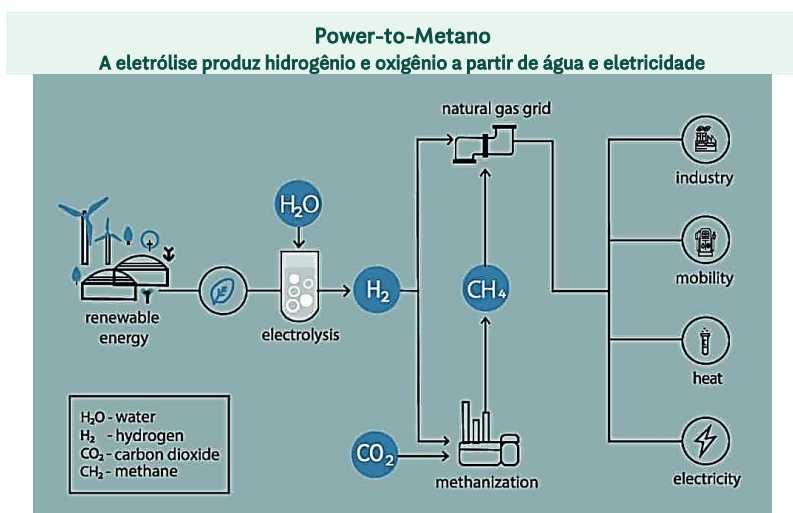


Figura 9: Fonte: <https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>

Na metanização, o hidrogênio é sintetizado com o CO₂ para produzir o metano. Esse processo de produção de metano facilita a distribuição de hidrogênio, uma das principais barreiras de mercado da comercialização do hidrogênio não cativo. Uma vez convertido em metano, o hidrogênio apresenta os mesmos manuseios a aplicações do gás natural.

O hidrogênio também pode ser convertido em combustíveis líquidos sintéticos, como metanol, éter, oximetileno (OME), petróleo bruto sintético, gasolina, diesel e combustível de aviação. Esses processos também são conhecidos como *Power-to-Líquids*. O hidrogênio combinado com CO₂ pode resultar em combustíveis sintéticos ou químicos, tais como metanol, éter, petróleo bruto, gasolina, diesel e

combustível de aviação. Todos esses podem ser gerados a partir do hidrogênio.

Combustíveis líquidos normalmente têm uma maior densidade por massa, comparados aos gasosos que têm maior densidade por volume. O *Power-to-Liquids* permite reduzir perdas de conversão energética relacionadas à pressurização e ao transporte desses gases. Aeronaves, navios e outros meios de transporte de carga pesada a longa distância se beneficiam muito do processo de *Power-to-Liquids*.

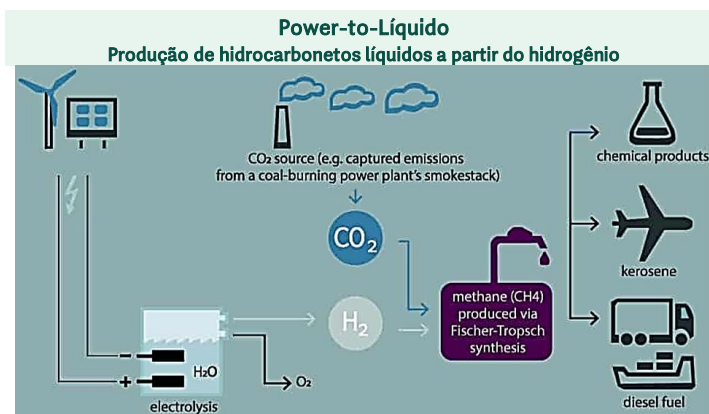


Figura 10: Fonte: <https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>

O *Power-to-heat*, (calor em inglês) utiliza o hidrogênio como fonte para fornecer calor através de grandes caldeiras elétricas ou bombas de calor.

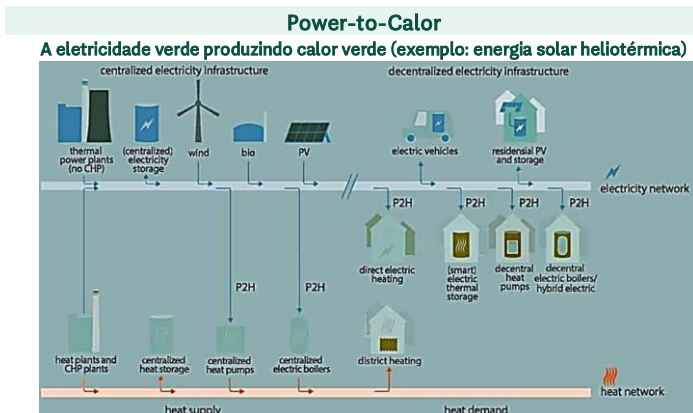


Figura 11: Fonte: <https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>

Devido ao baixo custo de se armazenar calor em tanques de água ou tanques de gelo, as soluções *Power-to-Heat* são úteis para aplicações próximas ao local da demanda.

É importante observar que todas essas conversões devem resultar em um saldo positivo de energia, caso contrário, teríamos o *Power-to-niX*, que traduzido do alemão é “*Power-to-nada*”. É importante observar os processos de resistência de cada uma dessas convenções para garantir uma transição energética sustentável e eficiente.

1.3. Power-to-Gas (PtG):

Uma vez produzido, o hidrogênio pode apresentar diversas aplicações, desde a produção de fertilizantes e outros químicos até a fabricação de materiais como aço e cimento, além do refino de petróleo. Também pode ser utilizado para estabilizar redes elétricas e como armazenamento de energia por meio de metanização.

Outro uso importante é na célula a combustível, a qual pode ser utilizada para transporte, aquecimento, iluminação e para atender às necessidades elétricas de edifícios e residências

O hidrogênio também pode ser misturado em redes de gás natural, gerando um gás natural enriquecido com hidrogênio, porém há desafios referentes a diferenças de densidade energética e tamanho dos gases, o que dificulta a mistura dos dois na mesma rede de distribuição.

Uso do hidrogênio na rede elétrica ou de gás A eletricidade verde produzindo calor verde (exemplo: energia solar heliotérmica)

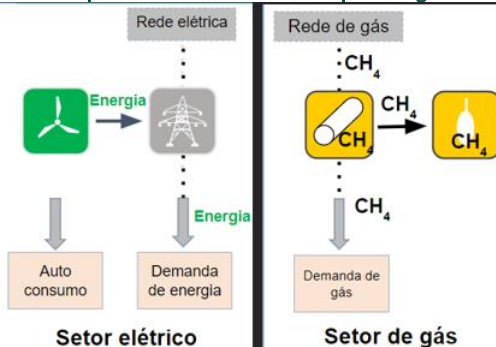


Figura 12: Fonte: Notas de aula, 2023. (Schneiders, TH Colônia)

As redes de gás foram projetadas transportar gases ricos em metano, e requerem avaliação para o transporte de hidrogênio, considerando questões de segurança e a composição da rede de gás.

Países como a Alemanha e a Inglaterra já apresentam planejamentos de adicionar hidrogênio na rede de gás natural, mas ainda é necessário mais estudo para sua aplicação no Brasil. Similarmente, na Califórnia e Texas, por exemplo, já existe uma rede de distribuição de hidrogênio para uso na mobilidade e em refinarias.

A distribuição do hidrogênio já é amplamente praticada na indústria química e petroquímica, utilizando cilindros ou tanques, e também no âmbito da pesquisa, como por exemplo em usos laboratoriais.

O processo de metanização permite produzir o metano, CH_4 de forma sintética, apresentando o ganho de não ter origem fóssil apesar de uma estrutura molecular é idêntica ao do metano encontrado no gás natural. O metano sintético é carbono neutro quando o CO_2 utilizado já se encontrava presente na atmosfera. O processo de metanização é interessante por utilizar recursos renováveis e o CO_2 circulante na, produzindo uma molécula carbono-neutra que se beneficia da infraestrutura já existente para o gás natural.

Além disso, não há limites para a injeção em gasodutos ou utilização de metano sintético em equipamentos convencionais, como caldeiras, motores e queimadores industriais, resultando em um menor custo de adequação de maquinário e infraestrutura existente.

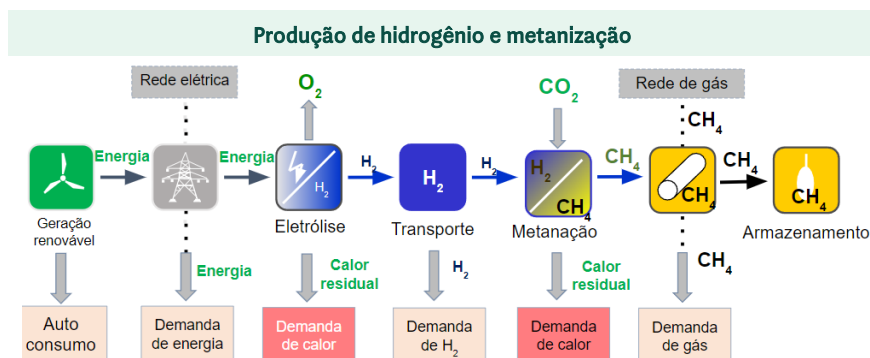


Figura 13: Fonte: Notas de aula, 2023 (Schneiders, TH Colônia)

O metano, principal composto do gás natural, apresenta diversas finalidades, desde turbinas a gás e motores a gás até queimadores industriais, caldeiras e até mesmo fogões de cozinha.

A metanização é um processo complexo que exige pressurização. No entanto, essa é uma tecnologia já existente, que é considerada um estado da arte, mesmo sendo complexa. A tecnologia utilizada para a metanização do gás natural pode ser adequada para produzir metano a partir do hidrogênio. A tecnologia dessa planta ainda pode ser melhorada para gerar maiores eficiências e operações mais dinâmicas do que as que temos hoje.

O metano pode ser mais facilmente armazenado comparado ao hidrogênio, sendo uma solução para períodos de escassez elétrica. A expansão das instalações e geração de energia renovável intermitente no setor elétrico exige uma maior capacidade de armazenamento de energia no setor.

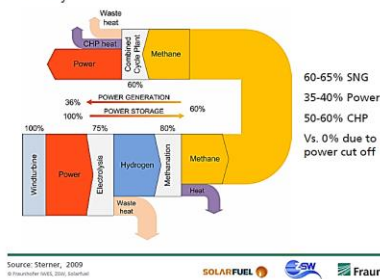
Um exemplo de variação de curto prazo é a variação de produção de energia em um parque solar, que não produz energia elétrica durante a noite. No Brasil, diferenças sazonais nas hidrelétricas são percebidas no setor elétrico. No período de seca, os reservatórios ficam mais baixos, levando a um aumento no valor da conta de luz.

Existem limitações nas opções de armazenamento de eletricidade, especialmente por longos intervalos de tempo como semana, mês, ano. Apesar do armazenamento da eletricidade ser um processo que resulta em perdas de eficiência, a expansão de fontes renováveis e intermitentes de energia na rede requer a reformulação dos sistemas de energia. Termoelétricas ou hidrelétricas permitem o maior controle da geração da eletricidade, uma vez que a água e os hidrocarbonetos (gás, carvão, derivados do petróleo) podem ser estocados antes da conversão em eletricidade.

Ressalta-se que a metanização apresenta uma eficiência inferior comparada ao uso direto do hidrogênio. Os principais desafios desse processo são em relação aos custos de geração de eletricidade, que exigem um excedente de eletricidade importante e as perdas de conversão e uso do calor.

Power-to Gas é um processo com perdas energéticas

Renewable power (to) methane / SNG
Efficiency



A eficiência geral do PtG é menor que a do hidrogênio, porém há outros benefícios:

- uso do calor residual quando aplicado de forma descentralizada
- uso da infraestrutura de gás natural existente!

Sem limites de injeção ou utilização de SNG em equipamentos convencionais (por exemplo, caldeiras, motores, queimadores industriais)

- Baixo custo de adequação, pois o cliente só precisa pagar o metano verde mais caro, mas não precisa investir em novos equipamentos.

Figura 14: Fonte: Notas de aula, 2023.

Uma vez produzidos a partir de processos com baixa emissão de carbono, o hidrogênio e o metano podem ser usados como matéria-prima em processos químicos para produzir produtos descarbonizados como, por exemplo, plásticos, e-combustíveis.

A cadeia do processo PtX pode ser ampliada

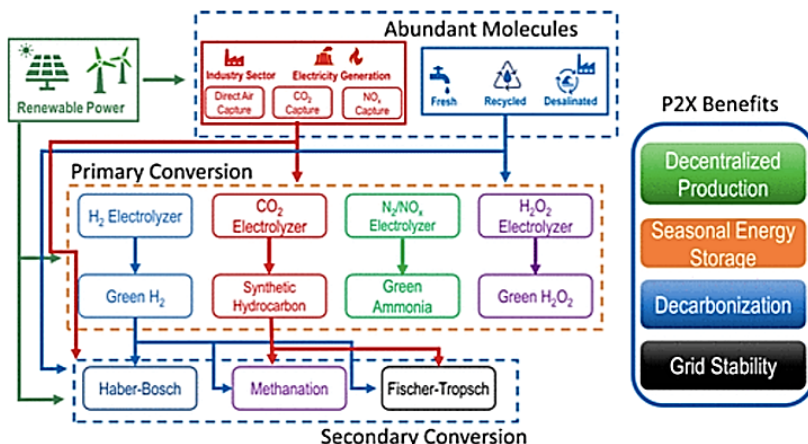


Figura 15: Esquema de infra-estrutura para a tecnologia power-to-X (PtX). Daiyan et al., ACS Energy Lett. 2020, 5, 3843-47. (Schneiders, TH Colônia)

Na Alemanha, por exemplo, esses insumos foram empregados para produção de polímeros. Para a eletrólise, utilizou-se um eletrolisador do tipo PEM, e o CO₂ foi obtido de indústrias químicas. O processo utilizou

resíduos de uma indústria como insumo para outra, reduzindo o impacto ambiental e aumentando a eficiência produtiva.

Exemplo: Projeto de pesquisa CO₂RRECT na Alemanha

De renováveis a PtG, de polímeros a cadeiras de plástico! (PtGtCtSit)

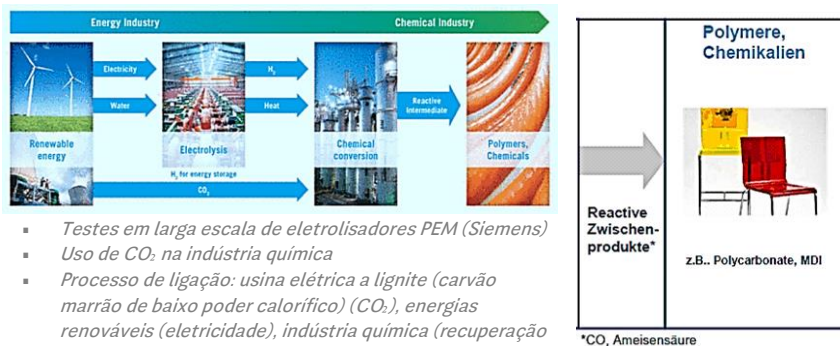


Figura 16: Fonte: Notas de aula, 2023.

2. Produção de e-combustíveis

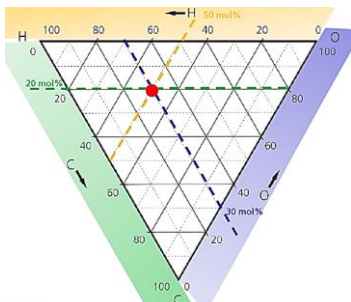
Atualmente, a maioria dos combustíveis são compostos por carbono, hidrogênio e oxigênio. Essa proporção dos elementos é conhecida como ternário molar e é importante para a produção dos chamados *e-fuels*, que são combustíveis sintéticos produzidos a partir de fontes de energia renováveis.

A composição dos combustíveis pode ser compreendida a partir do diagrama de ternário molar. Quanto mais próximo do hidrogênio (H) estiver, mais puro será o combustível e, conseqüentemente, mais eficiente será a sua queima. Por exemplo, a gasolina e o diesel são combustíveis com mais carbono, enquanto o metano é mais limpo, com maior presença de hidrogênio. O hidrogênio é o combustível mais puro e com maior potencial energético.

Há muitas maneiras de produzir os e-combustíveis

Quanto mais próximo no eixo HC, maior é o conteúdo energético.

Os produtos no triângulo azul não são de uso energético.



- Sistema C-H-O é a base para o armazenamento de energia química;
- A maioria dos portadores de energia química consiste em várias composições de HIDROGÊNIO, carbono e oxigênio;
- Representação no sistema ternário molar C-H-O.

Exemplo:

20% carbono

50% hidrogênio

30% de oxigênio

Figura 17: Fonte: Notas de aula, 2023.

O triângulo azul presente na figura não representa combustíveis, mas sim outros compostos químicos, como a água (H_2O), que não é um combustível. A eficiência do combustível está diretamente relacionada à sua composição química. Os combustíveis fósseis, como a gasolina, são formados por hidrocarbonetos na cadeia CH_2 , enquanto a biomassa possui um pouco mais de oxigênio, o que gera umidade durante o processo de produção.

Produção de e-combustíveis.

Quanto mais próximo no eixo HC, maior é o conteúdo energético.

Os produtos no triângulo azul não são de uso energético.

Meios de armazenamento (educts):

- Hidrogênio: H_2
- Metano: CH_4
- Hidrocarbonetos de cadeia longa como gasolina, diesel, etc.: $-CH_2-$
- Biomassa: Base CH_2O
- Carvão: C_6H_2O

Produtos finais:

- Água: H_2O
- Dióxido de Carbono: CO_2

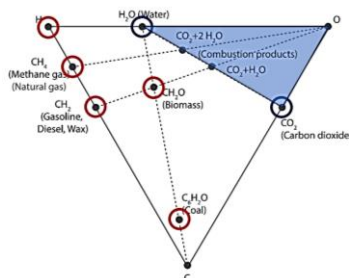
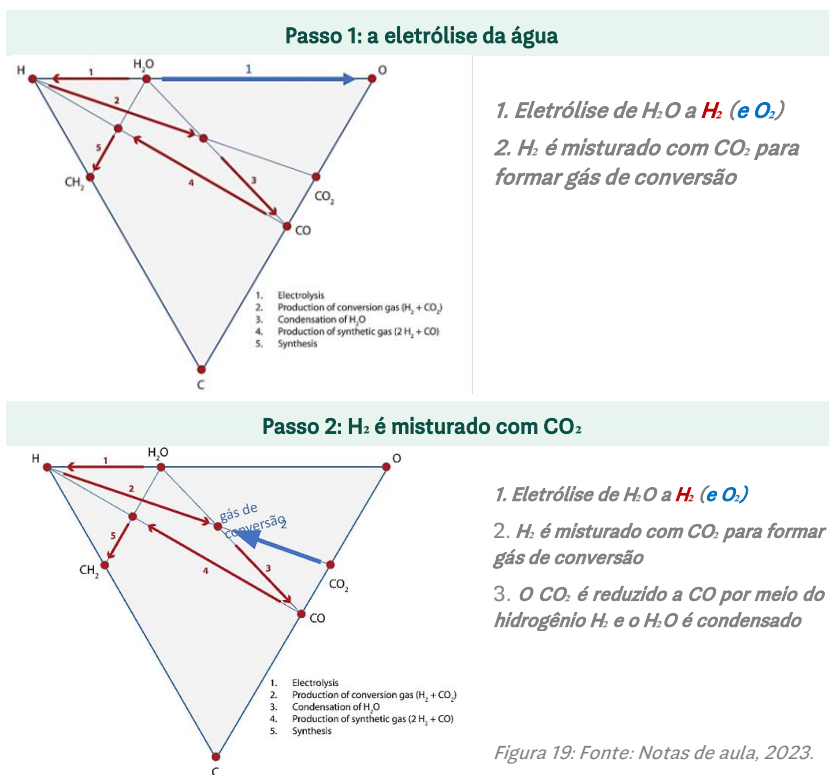


Figura 18: Fonte: Notas de aula, 2023.

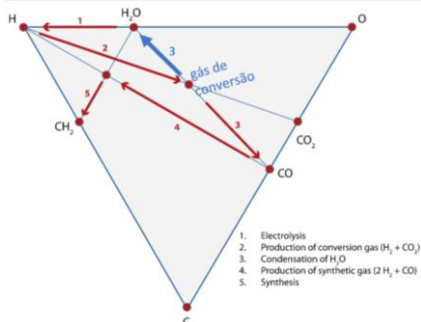
É importante observar a proporção de carbono e hidrogênio na produção de combustíveis. Quanto maior a quantidade de hidrogênio em relação ao carbono, mais puro e eficiente será o combustível. Por exemplo, no metano, temos 4 hidrogênios para 1 carbono, o que é uma proporção mais elevada do que a gasolina, que tem 1 carbono para 2 hidrogênios.

A produção de *e-fuels* se inicia com a eletrólise de água. Após a produção do hidrogênio, ele será sintetizado com CO_2 para formar um gás chamado gás de conversão, que é obtido a partir da reação entre o hidrogênio e o CO_2 , onde o CO_2 é responsável por fornecer o carbono para a síntese do combustível.



Nesse processo, o CO_2 é ser reduzido a CO por meio do hidrogênio. Além do monóxido de carbono também é produzido água, que posteriormente é condensada. Em seguida, o CO é misturado com o hidrogênio para formação do gás de síntese.

Passo 3: redução a CO



1. Eletrólise de H_2O a H_2 (e O_2)

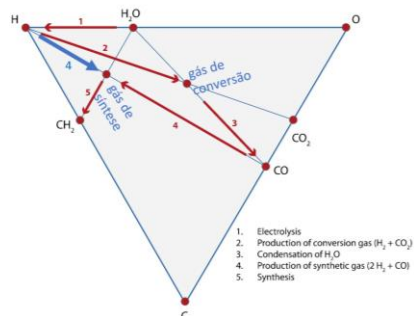
2. H_2 é misturado com CO_2 para formar gás de conversão

3. O CO_2 é reduzido a CO por meio do hidrogênio H_2 e o H_2O é condensado

Figura 20: Fonte: Notas de aula, 2023.

A síntese de Fischer-Tropsch é a formação de hidrocarbonetos de composição tipo CH_2 , a partir do gás de síntese. É necessário que também ocorra a separação da água nesse processo, ou seja, a desumidificação.

Passo 4: CO é misturado com H_2 .



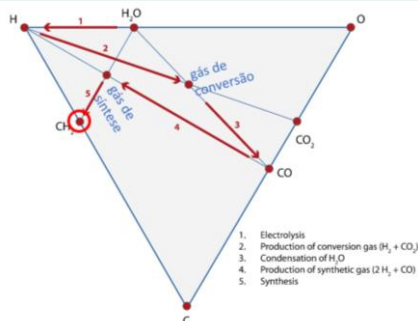
1. Eletrólise de H_2O a H_2 (e O_2)

2. H_2 é misturado com CO_2 para formar gás de conversão

3. O CO_2 é reduzido a CO por meio do hidrogênio H_2 e o H_2O é condensado

4. O CO é misturado com H_2 para formar o gás de síntese

Passo 5: Síntese de Fischer-Tropsch em hidrocarbonetos



1. Eletrólise de H_2O a H_2 (e O_2)

2. H_2 é misturado com CO_2 para formar gás de conversão

3. O CO_2 é reduzido a CO por meio do hidrogênio H_2 e o H_2O é condensado

4. O CO é misturado com H_2 para formar o gás de síntese

5. Síntese de Fischer-Tropsch em hidrocarbonetos $-CH_2-$ (separação de H_2O)

Figura 21: Fonte: Notas de aula, 2023.

Após o processo de síntese de Fischer-Tropsch, é possível obter vários tipos de combustíveis, que podem ser distribuídos de acordo com diferentes composições. A distribuição dos tipos de combustível é influenciada pela probabilidade de crescimento em cadeia. As cadeias de hidrocarbonetos produzidas dependerão do tipo de catalisador e do processo utilizado, como temperatura e pressão. É importante utilizar todos os produtos gerados nesse processo para evitar perdas de energia significativas.

O processo Fischer-Tropsch nunca gera apenas um combustível, mas uma grande variedade de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos

- A **probabilidade de crescimento em cadeia** influencia a **variedade** de produtos
- A **probabilidade de crescimento** da cadeia depende do **catalisador** utilizado, bem como da **pressão** e da **temperatura**
- Há sempre um conceito geral para todos os produtos (caso contrário, será um desperdício de energia)

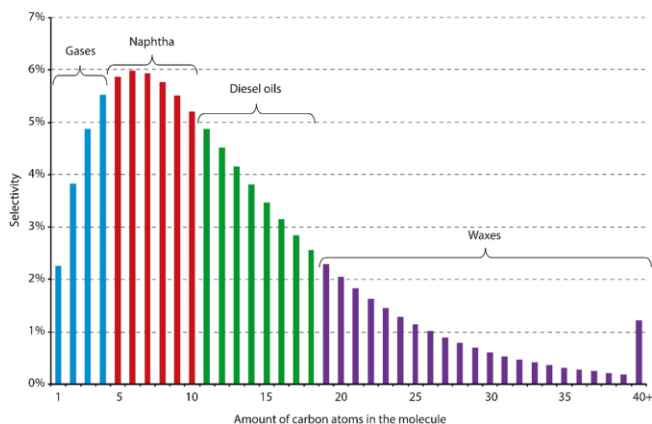


Figura 22: Fonte: Notas de aula, 2023.

Ressalta-se que a eletrólise é uma reação endotérmica, ou seja, que requer energia, e que o processo de Fischer-Tropsch é exotérmico, ou seja, libera energia. Para maximizar a eficiência total do processo, pode-se utilizar a energia exotérmica do processo Fischer-Tropsch na eletrólise, o que permitiria uma otimização do projeto e eficiências mais altas.

Ainda assim, é importante destacar que todo o processo requer uma energia considerável. A síntese de Fischer-Tropsch é uma das várias maneiras de produzir combustíveis sintéticos.

2.1. Eficiência da mobilidade baseada em eletricidade

O uso de combustíveis fósseis na mobilidade é um grande contribuinte para as emissões de gases de efeito estufa. O setor apresenta diversas alternativas para sua descarbonização incluindo a eletrificação direta de alguns modais de transporte, o uso de biocombustíveis, combustíveis sintéticos, baterias e células a combustível.

Os biocombustíveis se destacam por suas baixas emissões, uma vez que o CO₂ eliminado de sua combustão é neutro. Já os veículos elétricos, tais como a bateria e a células a combustível, são uma alternativa importante de baixa emissão.

GEE-Emissões de Combustíveis alternativos

Emissões de GEE relacionadas ao consumo de energia 2020 (Well-to-Wheel)

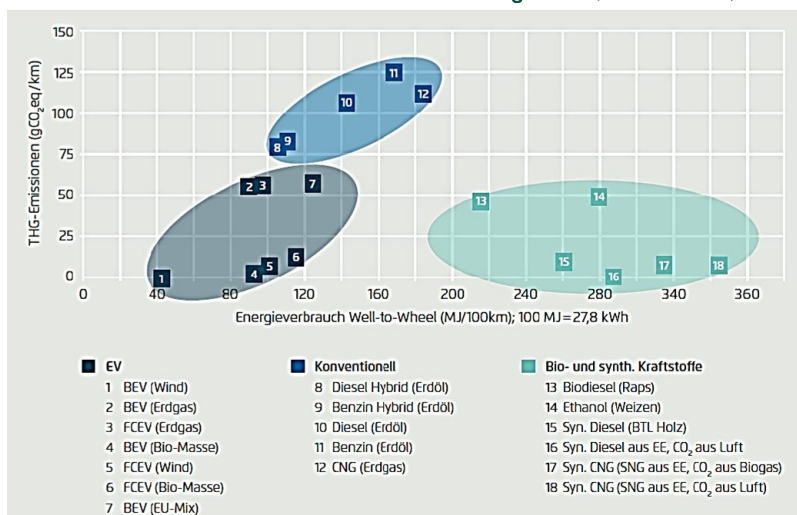


Figura 23: Fonte: Quelle: Agora Verkehrswende, 2017

Sempre que possível, a eletrificação direta é preferível por ser uma rota mais eficiente para o uso de recursos energéticos. Por exemplo, no setor ferroviário, onde é possível garantir o fornecendo energia elétrica através dos próprios trilhos.

Transitar para modais de transporte mais eficiente é fundamental. Isso significa expandir o uso de transporte coletivos e eficientes, como o modal ferroviário rodoviário coletivo.

Para o transporte rodoviário, a eletrificação por meio de baterias apresenta uma eficiência entre 77% e 81% até o ponto de recarga. Já a produção de hidrogênio até o ponto de distribuição tem uma eficiência de cerca de 68%, devido às perdas no processo de conversão. O uso de *e-fuels* tem uma eficiência ainda menor, em torno de 55%.

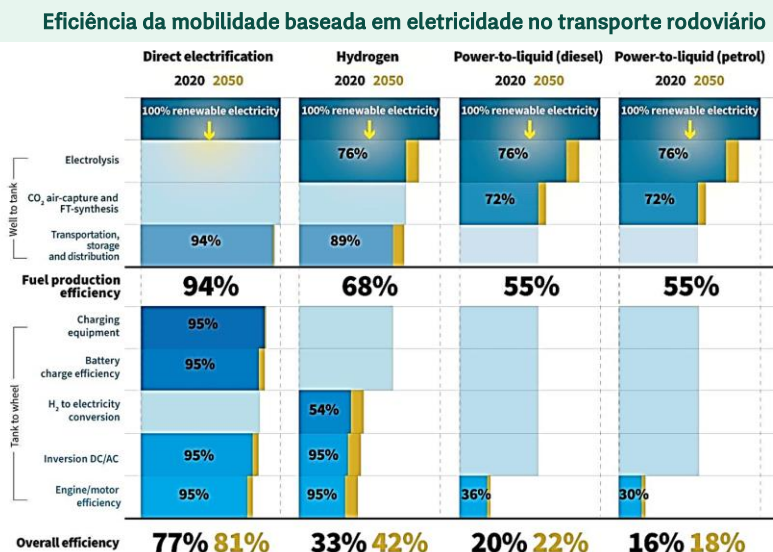


Figura 24: Fonte: 2020_12_Briefing_feasibility_study_renewables_decarbonisation.pdf (transportenvironment.org)

A extensão da análise da eficiência até o uso final em automóveis acrescenta perdas de conversão. A eficiência da eletrificação direta é novamente superior, totalizando cerca de 77% a 81% no caso dos carros a bateria, enquanto o hidrogênio tem uma eficiência de cerca de 33% a 42%. O uso de combustíveis sintéticos, representado pelo *Power-to-liquid*, tem uma eficiência de cerca de 20% a 22%, que é significativamente menor do que as alternativas de veículos elétricos a bateria ou a hidrogênio.

Espera-se que sua eficiência aumente até 2050. No entanto, em termos de avanços tecnológicos, as opções de combustão já estão saturadas e não há muito espaço para melhorias significativas.

Comparado com a eletrificação direta, a produção de hidrogênio ou combustíveis sintéticos tem uma eficiência menor. Quanto mais

eficiente for a cadeia da produção ao uso final, menos eletricidade será necessária. Isso significa que a produção de hidrogênio *e-fuels* exigirá uma capacidade instalada de energia renovável muito maior do que a eletrificação direta.

Por exemplo, para o funcionamento de 10 milhões de veículos elétricos a bateria, seria necessário de 20 a 25 terawatts-hora (TWh). Já para carros movidos por células a combustível, que utilizam hidrogênio como fonte de energia, seria necessário quase três vezes mais energia do que os carros a bateria. Isso significa que seria preciso instalar mais turbinas eólicas ou outras fontes renováveis para suprir essa demanda.

Por outro lado, se considerarmos o uso de combustíveis sintéticos produzidos a partir de eletricidade renovável para alimentar carros de combustão interna, seria necessário seis vezes mais energia do que para os carros elétricos a hidrogênio.

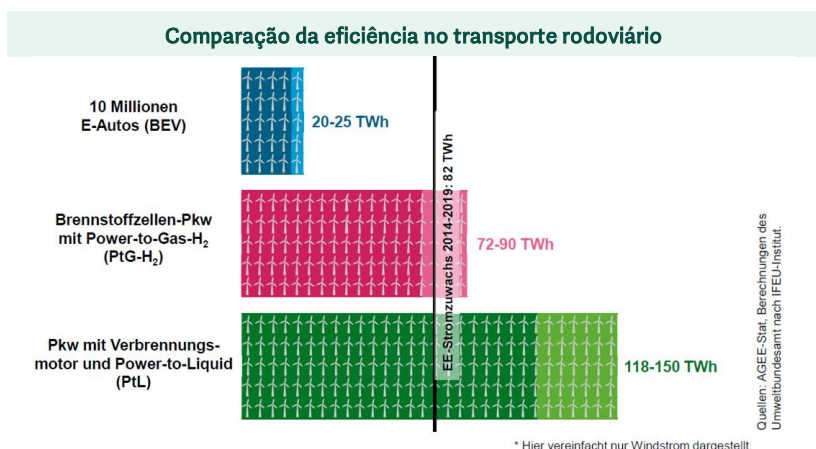


Figura 25: Fonte: Messner, D., Klimaschutz im Verkehr: Welchen Beitrag leisten alternative Antriebe und Kraftstoffe, 2021

Apesar de sua baixa eficiência, os *e-fuels* são uma alternativa de descarbonização importante para setores específicos que ainda não possuem alternativas viáveis de eletrificação, como a aviação ou o transporte marítimo.

Os combustíveis sintéticos são vantajosos quando o volume é um fator limitante. Isso porque a densidade volumétrica do hidrogênio, por exemplo, é muito inferior à do gás natural e da gasolina em pressão

ambiente. Mesmo com pressurização, o hidrogênio ainda tem uma densidade inferior à gasolina e ao diesel. Para o transporte, aéreo e marítimo, os combustíveis líquidos são preferíveis, pois são capazes de atingir a densidade energética necessária.

Outra perspectiva sobre os e-combustíveis

**Sempre que o volume disponível é o fator limitante,
os e-combustíveis estão em vantagem.**

Emissões do transporte doméstico em 2019 aproximadamente
164 MtCO₂eq (corresponde ao nível de 1990).

Transportador de energia	Densidade gravimétrica de energia	Densidade volumétrica de energia
H2 (pressão ambiente)	33,3 kWh/kg	3 kWh/m ³
200 bar		530 kWh/m ³
700 bar		1855 kWh/m ³
Líquido (-253°C)		2360 kWh/m ³
CH4 (gás natural)	13,9 kWh/kg	2580 kWh/m ³
Gasolina	11,6 kWh/kg	9300 kWh/m ³
Diesel	11,8 kWh/kg	9800 kWh/m ³
LOHC (por exemplo, N-Ethylcarbacole)	1,93 kWh/kg	1860 kWh/m ³

Figura 26: Fonte: Notas de aula, 2023.

Para ilustrar as emissões no setor de transporte. Em 2021 na Alemanha, os carros de passageiros representam 61% das emissões desse setor, enquanto o transporte de mercadorias pesadas representa 28%. O transporte ferroviário, marítimo e aéreo representa apenas 4% do total, mas em outros países pode ser bem maior.

Emissões de CO₂ do transporte doméstico na Alemanha (2019)

Emissões de CO₂ do transporte doméstico na Alemanha (2019)

Emissões do transporte doméstico em 2019 aproximadamente 164 MtCO₂eq
(corresponde ao nível de 1990).

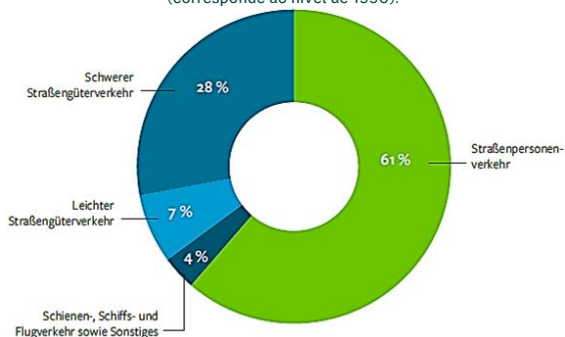


Figura 27: Fonte: SRU, Wasserstoff im Klimaschutz, 2021

O uso do hidrogênio para a produção de combustível sintético na região da Amazônia, para abastecer aeronaves, tem sido estudado no Brasil. Essa região apresenta algumas características específicas, como a dificuldade de acesso a áreas remotas e a necessidade de um combustível de alta densidade para que as aeronaves possam chegar até lá.

Aeronaves precisam ser abastecidas tanto na Amazônia quanto em outras regiões, como São Paulo, por exemplo. Por isso, é importante que o combustível utilizado comum. Atualmente, o querosene é o combustível utilizado nesses casos. A produção de querosene sintético na Amazônia pode ser uma opção interessante para suprir essa demanda específica.



Figura 28: Fonte: Notas de aula, 2023.

Na Alemanha, 61% do transporte ferroviário ainda é eletrificado. Já na Suíça, esse percentual já chegou a 100%, mas ainda há um volume importante de trens movidos a diesel em operação, principalmente na Europa.

No Brasil, o transporte ferroviário é 100% movido a diesel, com pouquíssimas locomotivas elétricas, o que representa uma emissão significativa de poluentes. No caso do transporte de carga pesada, como os trens da Vale que transportam minério de ferro, a situação é ainda mais crítica.

Participação de linhas eletrificadas na malha ferroviária (desde 2018)

Uma parte significativa dos trilhos ferroviários não é eletrificada – aqui os e-combustíveis podem ter uma chance.

A ferrovia pode ser uma chance para H₂ e e-combustíveis!?



Quelle: Allianz pro Schiene | 10/2020 | auf Basis von EU-Kommission 2020, BMVI 2019
Lizenz: © CC BY-NC-SA. Nutzung frei für redaktionelle Zwecke unter Nennung der Allianz pro Schiene

Figura 29: Fonte: Quelle: Alstom, Coradia iLINT, 2019.

A eletrificação dessas ferrovias apresenta custos elevados. Na Europa o custo é de aproximadamente 1,5 milhões de euros por quilômetro ferroviário. Isso torna a eletrificação inviável em regiões de baixo volume de tráfego, e faz com que alternativas como *e-fuels* e hidrogênio sejam cogitadas.

O setor de marítimo também apresenta desafios de descarbonização. O hidrogênio e seus derivados têm sido discutidos para usos desde catamarãs até mega transportadores. As áreas de aplicação são diversas e vários combustíveis têm sido considerados para serem modificados, tais como hidrogênio líquido, amônia, metanol, carreadores orgânicos de hidrogênio líquidos (LOHC) ou os próprios combustíveis sintéticos.

Sector de Transporte: Navios

Nos navios, os e-combustíveis também podem ter uma chance.



Figura 30: H₂ Navio de abastecimento offshore-Wind

A escolha do combustível dependerá, em grande medida, do transportador e do modo como o navio ou meio de transporte marítimo será utilizado, bem como da frequência e tipo de distância que ele percorrerá.

Por exemplo, navios que viajam entre a Ásia e o Brasil precisam de condições de armazenamento de combustível muito diferentes daquelas necessárias para um navio que percorre a rota de Manaus para a Flórida, uma vez que requerem quantidades de combustíveis muito diferentes.

Em suma, a escolha da forma de descarbonização varia de acordo com o tipo de carga, quilometragem e modal de transporte. Para carros urbanos, soluções de baterias são ótimas e podem resolver boa parte da mobilidade urbana. No entanto, em viagens longas, como por exemplo, do Rio de Janeiro para São Paulo, o carro a bateria exige longas recargas, podendo acrescentar pelo menos 4 horas no trajeto.

Taxis são outro exemplo. Na Dinamarca, taxis movidos a hidrogênio têm sido utilizados uma vez que esses veículos percorrem uma quilometragem elevada ficando parados apenas 3% do tempo. Assim os táxis estão sempre em movimento, com uma maior demanda de combustíveis e abastecimento rápido.

No setor aéreo e marítimo, a eletrificação direta ainda está distante, sendo necessário encontrar outros combustíveis que possam ser utilizados nessas atividades no médio e curto prazo. Nesses casos, a produção de combustíveis sintéticos que não exijam alteração na arquitetura das aeronaves e navios será prioritária, comparados a combustíveis como o hidrogênio que exigem arquiteturas distintas.

A infraestrutura de distribuição do combustível também é relevante. Atualmente, essa infraestrutura opera com derivados do petróleo para o caso de navios e aviões. Alterações nos combustíveis implicará mudanças não só a arquitetura das aeronaves e navios, mas também na estrutura portuária e aeroportuária.

Países como a Holanda já que estão restringindo as emissões de aviões em solo no aeroporto. Outro exemplo é a restrição de emissões de cruzeiros em cidades turísticas.

Resumindo, há muitas alternativas que competem no processo de transição de energia no setor de transporte, desde baterias, eletrificação direta, células a combustível, pilhas a combustível, uso de outros vetores energéticos como a amônia, metanol, até o próprio gás natural.

3. Economia do Hidrogênio

A economia do hidrogênio se refere ao conjunto de atividades relacionadas desde a sua produção até seu uso final em diversos setores energéticos e industriais. A cadeia de valor do hidrogênio inclui, por exemplo, a geração de eletricidade, a fabricação de equipamentos e componentes associados a eletrólise, captura de carbono, produção e manuseio de biomassas, produção de fertilizantes a base de amônia, produção de aço descarbonizado, entre outras atividades.

O conceito explorado neste capítulo se difere dos aspectos econômicos referentes aos usos cativos existentes tais como para o refino do petróleo e produção de amônia e químicos a base de metanol. A economia do hidrogênio apresentada a seguir se refere a ampliação da utilização do hidrogênio para além de usos cativo, garantindo sua produção, condicionamento, armazenamento e distribuição de forma segura, econômica e sustentável como combustível de zero emissão.

Principais papéis do hidrogênio na economia

O hidrogênio desempenhará um papel importante na descarbonização de setores-chave da economia.

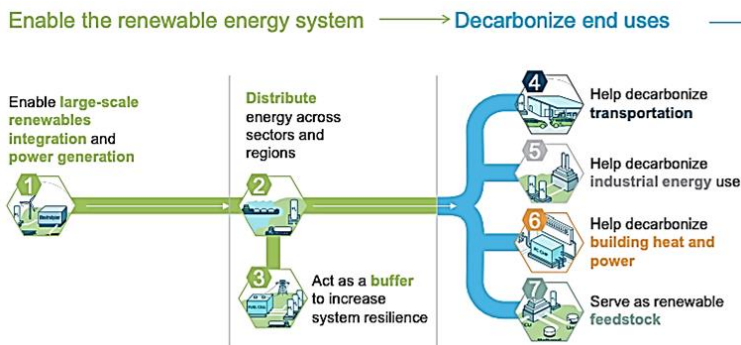


Figura 31: Fonte: OKOLIE, J. A. et al. Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy, Int. Journal of Hydrogen energy, 2021.

A economia do hidrogênio ganhou relativo destaque uma vez que processos de produção de hidrogênio de baixo carbono associado ao seu uso em aplicações na indústria e setor de energia e transporte pode auxiliar na redução de emissões de gases de efeito estufa.

O hidrogênio pode ser produzido a partir do excedente de energia da geração elétrica renovável, tornando-se uma forma de armazenamento de eletricidade em sistemas de energia com crescente utilização de fontes intermitente como solar e eólica. Uma vez convertida em hidrogênio, energia renovável pode ser distribuída em regiões de forma análoga a outros hidrocarbonetos, permitindo ampliar o acesso da eletricidade renovável.

O hidrogênio de baixo carbono pode ser utilizado em setores de difícil abatimento de emissões de gases de efeito estufa. Um exemplo importante é para produção de amônia, insumo para fertilizantes nitrogenados.

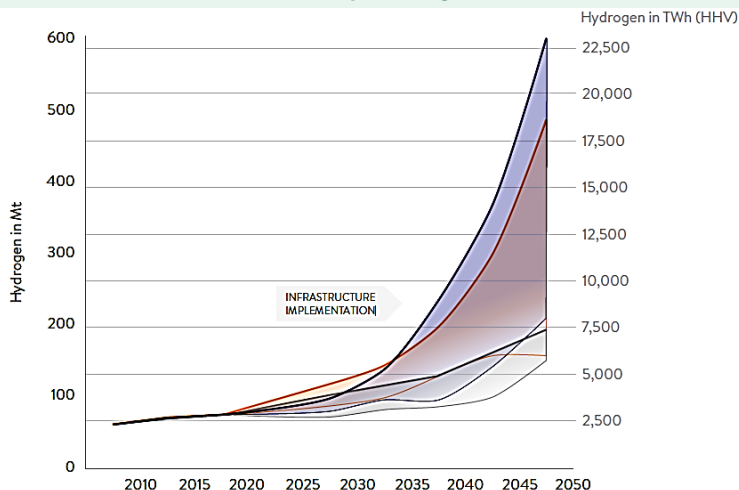
Atualmente, a produção de amônia é feita a partir do gás natural em dois processos principais: a conversão do gás natural e hidrogênio através da reforma a vapor e o processo de Haber-Bosch. A descarbonização da produção desses fertilizantes pode ser feita através da captura do CO₂, emitido durante a reforma do gás natural ou através da utilização de hidrogênio produzido a partir de processos de baixa emissão, tais como eletrólise e reforma de biomassas de rejeito.

O hidrogênio também pode ser utilizado em processos de produção de ferro e aço, ambos intensivos em emissão de CO₂. O hidrogênio pode ser utilizado em utilizando em processos de redução de óxidos ferrosos para obtenção de ferro e aço, atualmente processos majoritariamente realizados a partir de insumos fósseis como coque ou gás natural.

Outro setor em que o hidrogênio se desdobra como uma alternativa para a descarbonização é o transporte. O hidrogênio pode ser utilizado na produção de combustíveis sintéticos, como no caso dos combustíveis sintéticos de aviação, como gás para combustão direta em motores adaptados ou, em pilhas a combustível (ou células a combustível), onde esses motores apresentam maior eficiência. O hidrogênio tem sido muito utilizado nesse setor.

A demanda por hidrogênio de baixo carbono pode ser projetada a partir de diferentes aumentos de temperatura global. Estima-se que para manter o aquecimento global abaixo de 2°C, será necessário um aumento expressivo na demanda por hidrogênio, podendo representar um acréscimo de até 10 vezes entre 2015 e 2050.

Demanda por hidrogênio



Meta:

● < 1.8°C

● 1.8 - 2.3°C

● > 2.3°C

Segundo o World Energy Council [7] a demanda de hidrogênio nas próximas décadas dependerá de metas para desacelerar o aumento da temperatura do planeta. O gráfico mostra o intervalo de avaliação da demanda de hidrogênio até 2050.

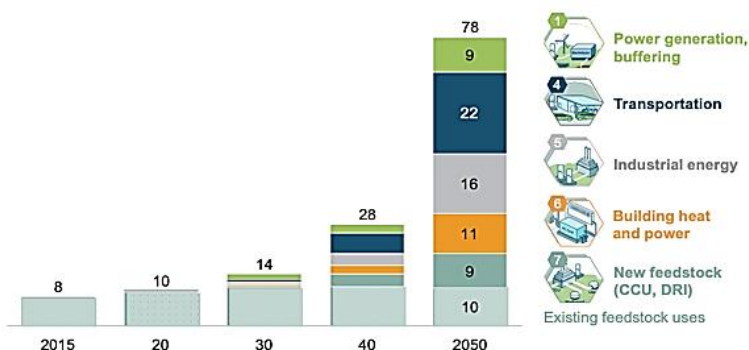
Figura 32: Fonte: World Energy Council (2021). Working paper: Hydrogen demand and cost dynamics. 2021.

É importante notar que:

- 1 EJ de energia equivale a 1 dia de demanda total do mundo;
- 2 anos de consumo do setor de transporte na região metropolitana de Nova York ou o calor utilizado pela indústria siderúrgica alemã em um ano.
- Passar de 10 EJ para 80 EJ em 2050 representa um aumento significativo da demanda desse vetor energético.

A demanda anual por hidrogênio pode aumentar dez vezes até 2050 – de 10 EJ em 2020 para quase 80 EJ em 2050.

Global energy demand supplied with hydrogen, EJ



Qual o tamanho de 1 EJ? 1 EJ é aproximadamente equivalente a:

- Um dia da demanda total de energia do mundo.
- A energia consumida em dois anos pelo setor de transporte na região metropolitana de Nova York.
- O calor usado pela indústria siderúrgica alemã em um ano.

Figura 33: Fonte: World Energy Council (2021). Working paper: Hydrogen demand and cost dynamics. 2021.

3.1. Cadeia de Valor de Hidrogênio

A cadeia de valor do hidrogênio é composta por diversas etapas, tais como a produção de insumos e equipamentos, a produção do hidrogênio seu condicionamento, armazenamento e distribuição, o uso do hidrogênio em diversos setores.

Os termos *Upstream*, *Midstream* e *Downstream*, que são frequentemente utilizados na cadeia de valor do petróleo e do gás, são também aplicados para descrever a cadeia de valor do hidrogênio.

A cadeia de abastecimento de hidrogênio compreende os processos necessários para produzir, armazenar e distribuir o hidrogênio. Dependendo da opção de produção, a cadeia começa com fornecimento de matéria-prima ou geração de energia elétrica.

A produção pode ser centralizada ou na estação local (decentralizada).

O transporte, dependendo da distância, pode ser na forma líquida, gasosa ou de outro tipo como amônia para longas distâncias (transporte intercontinental).

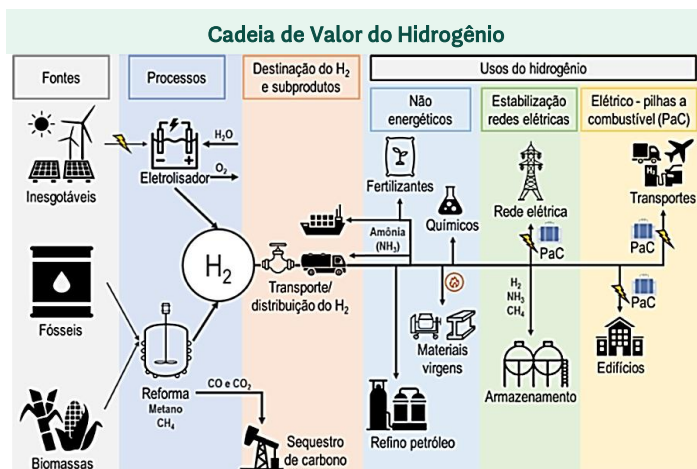


Figura 34: Fonte: Notas de Aula, 2023.

O *Upstream* refere-se à etapa de obtenção da matéria-prima. No caso da rota de produção através da eletrolise, os principais insumos são a eletricidade e água. Para processos de reforma, o *Upstream* pode se referir a obtenção de recursos fósseis, como o gás natural ou insumos orgânicos como rejeitos agropecuários.

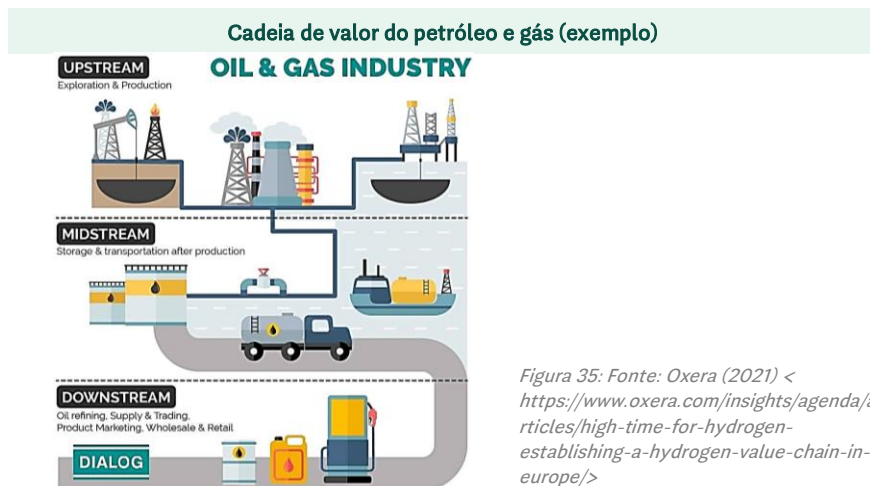


Figura 35: Fonte: Oxera (2021) <
<https://www.oxera.com/insights/agenda/articles/high-time-for-hydrogen-establishing-a-hydrogen-value-chain-in-europe/>>

Uma vez produzido o hidrogênio, a etapa seguinte é o *Midstream*, que se encarrega do armazenamento e transporte do hidrogênio até os locais de uso. Isso pode incluir o uso de gasodutos, tanques de armazenamento e caminhões-tanque para distribuição.

Por fim, o *Downstream* refere-se à transformação do hidrogênio em produtos finais, tais como a produção de energia elétrica, produção de amônia e metanol, bem como combustíveis sintéticos. Essa etapa também inclui a distribuição desses produtos para seu uso final.

A cadeia produtiva do hidrogênio é complexa, e inclui processos como o condicionamento do hidrogênio. Seja para produzir hidrogênio líquido (LH_2), amônia ou carreadores orgânicos de hidrogênio (LOHC). Cada um desses processos possui suas particularidades e exige um alto nível de expertise para ser realizado.

Após o condicionamento, o hidrogênio precisa ser transportado, e pode ser feito de diversas formas, dependendo do tipo de condicionamento pelo qual passou. O hidrogênio gasoso pode ser transportado em gasodutos, como já é feito na Alemanha, onde a proporção chega a 20%.

No Brasil, ainda há poucos estudos sobre a proporção de hidrogênio que é possível misturar. Já o hidrogênio líquido, a amônia e outros carreadores de hidrogênio podem ser transportados em tanques, e serem levados por caminhões e navios.

Por fim, é importante lembrar que, após chegar ao consumidor final, o hidrogênio ainda precisa passar por processos como o craqueamento ou desidrogenação, que consistem em converter a amônia em hidrogênio e depressurizar o hidrogênio líquido.

Além disso, é necessário ter conhecimentos específicos para realizar o craqueamento dos LOHCs, outro processo complexo que requer um alto nível de expertise.

Empresas de setores variáveis atuam na cadeia de valor do hidrogênio. Empresas do setor do petróleo e gás, gases industriais e geração de eletricidade atuam na produção e/ou distribuição do hidrogênio.

Cadeia de valor do hidrogênio (exemplo)

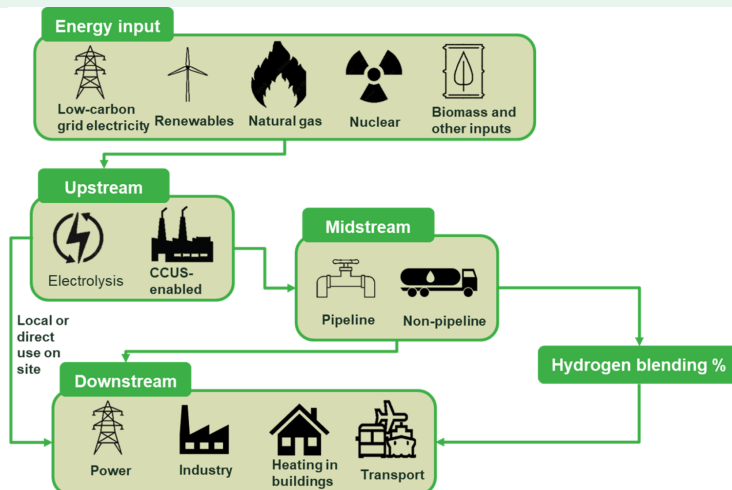


Figura 36: Fonte: Oxera (2021) <

<https://www.oxera.com/insights/agenda/articles/high-time-for-hydrogen-establishing-a-hydrogen-value-chain-in-europe/>>

Empresas provedoras de tecnologia como *Siemens Energy*, *thyssenkrupp* e *Hytron* também fazem parte da cadeia de valor do hidrogênio. Destacam-se também empresas de engenharia, que têm o importante papel de projetar as plantas de produção de hidrogênio.

North-Rhine Westphalia/Germany:



Figura 37: Fonte: Notas de aula, 2023.

Cada parte dessa cadeia produtiva influencia no preço final do hidrogênio para o consumidor, sendo que um custo adicional em qualquer uma dessas partes pode acarretar um custo final maior.

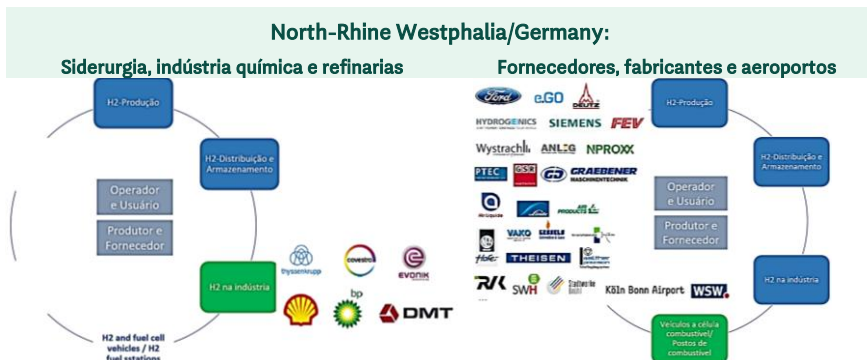


Figura 38: Fonte: Notas de aula, 2023.

No Brasil, existem diferentes empresas atuando em cada uma dessas partes, desde a produção até a distribuição e uso do hidrogênio. Uma delas é a NEA GROUP, que fabrica compressores utilizados na produção de hidrogênio, e outras que estão focadas na produção do gás para a indústria.

Com o desenvolvimento de fontes renováveis para produção de hidrogênio, novas cadeias de valor surgirão, trazendo mais atores e processos para essa importante indústria.

A produção de veículos movidos a hidrogênio é das aplicações para o hidrogênio, utilizando motores elétricos ou a combustão. As pilhas a combustível (ou células a combustível) são dispositivos eletroquímicos que convertem hidrogênio em eletricidade.

Veículo elétricos alimentados por uma pilha a combustível são uma alternativa aos veículos movidos a gasolina ou diesel, uma vez que não emitem poluentes e têm uma autonomia semelhante. A expansão das estações de abastecimento de hidrogênio são fundamentais para permitir o uso desses veículos, visto que ainda há poucas delas disponíveis em todo o mundo.

A indústria automotiva promete disponibilizar carros movidos a hidrogênio, mas não encontram infraestrutura para abastecê-los. Já as empresas que constroem infraestrutura alegam falta de demanda para justificar a falta de investimentos.

3.2. Custos do Hidrogênio: O que é o CAPEX? OPEX? LCoH?

Os custos de produção, conversão, armazenamento e distribuição do hidrogênio são fundamentais para avaliar a eficiência econômica e competitividade. O custo nivelado do hidrogênio, LCoH, é um indicador que mede o custo do ciclo de vida que agrega despesas de investimento e custos operacionais em um valor de custo unitário

Para calcular o LCoH, utiliza-se a fórmula: CAPEX + OPEX + despesas totais de descomissionamento das indústrias incumbentes, dividido pela quantidade de hidrogênio produzida.

O CAPEX é o valor total dos investimentos em capital, enquanto o OPEX são os custos de operação ao longo da vida de um projeto. Já as despesas de descomissionamento estão relacionadas à transição de uma indústria fóssil para uma renovável. Quando o preço de mercado do hidrogênio é igual ao seu custo médio de produção, a operação está em equilíbrio.

Custo nivelado de hidrogênio (LCoH) $\text{LCoH} = \frac{(\text{CAPEX} + \text{OPEX} + \text{DECEX})}{(\text{Total amount of H}_2)} \quad (\$/\text{kg})$ CAPEX: Valor total dos investimentos OPEX: Custo total durante o ciclo de vida do projeto DECEX: Despesas totais de descomissionamento

Figura 39: Fonte: DOE, EPA. Report of the interagency task force on carbon capture and storage. Department of Energy and Environmental Protection

Os custos nivelados são indicadores para avaliação da eficiência econômica e competitividade da tecnologia; eles podem medir quantitativamente a viabilidade econômica de uma determinada tecnologia, e são frequentemente usados como um indicador para avaliar a competitividade de diferentes tecnologias de geração de energia.

Semelhante ao conceito de Custo Nivelado de Energia (LCoE), que se refere ao custo de geração de eletricidade por unidade de energia, o LCOH refere-se ao custo de produção de hidrogênio por unidade de hidrogênio.

Em um cenário otimista, o custo médio de produção de hidrogênio seria relativamente muito menor, chegando a pouco acima de 1 US\$ por quilo de hidrogênio produzido. Enquanto em condições desfavoráveis, o custo poderia iniciar de um valor bem mais alto e chegar a um valor muito baixo, que seria aproximadamente quase 6 US\$ por quilo.

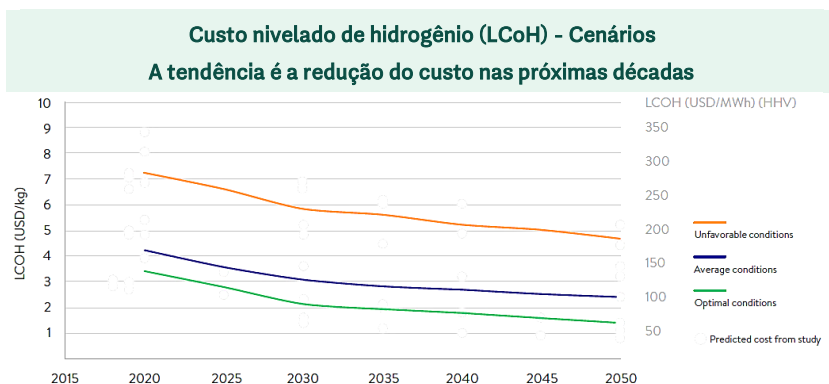


Figura 40: Fonte: World Energy Council. Hydrogen demand and cost dynamics. Working paper, 2021.

Os cenários desenhados vão determinar, por exemplo, o quanto de capacidade renovável instalada será utilizada para a produção de hidrogênio. Todos esses valores vão fazer diferença porque eles entram aqui nessa parte operacional.

Para reduzir o custo do LCoH (custo nivelado de hidrogênio), ou seja, o custo de geração de hidrogênio por unidade de hidrogênio, é necessário aumentar a escala de produção ou reduzir significativamente os custos de capital e operacionais.

Aumentar a escala é uma das partes centrais para reduzir os custos de produção de hidrogênio. Isso significa que é necessário produzir mais hidrogênio para que os custos sejam diluídos em uma quantidade maior de produção.

Outra maneira de diminuir os custos é a redução dos custos de capital, que incluem os eletrolisadores e os componentes, ou os catalisadores, no caso das reformas. Também é possível reduzir o custo de operação, por exemplo, por meio da redução do custo da eletricidade renovável.

Um dos processos mais utilizados atualmente é a SMR, que consiste na reforma a vapor do metano com ou sem a captura de carbono. O custo médio de produção de hidrogênio nesse processo é de aproximadamente de US\$2 a US\$2,3 por kg de hidrogênio. A gaseificação do carvão também apresenta valores relativamente baixos.

No entanto, uma alternativa mais sustentável é o uso de fontes renováveis, como a biomassa. A pirólise e a gaseificação são exemplos de processos competitivos em termos de custo.

Existem ainda outros processos de produção de hidrogênio, como a biofotólise direta ou indireta e a fermentação escura, que apresentam um custo por quilo de hidrogênio produzido inferior ao da eletrólise.

É importante destacar que, em termos de abertura de mercado, a competitividade de preço é um desafio grande. Embora alguns países tenham priorizado apenas uma rota de produção de hidrogênio, no Brasil, um país rico em diversos recursos energéticos, é necessário avaliar qual rota é mais viável em termos de custo para tornar o hidrogênio um produto competitivo no mercado internacional.

Comparação do custo de vários processos de produção de hidrogênio

Methods	Energy source	Feedstock	Capital cost (M\$)	H ₂ cost (\$/kg)
SMR with CCS	Fossil fuels (standard)	Natural gas	226.4	2.27
SMR without CCS	Fossil fuels (standard)	Natural gas	180.7	2.08
CC with CCS	Fossil fuels (standard)	Coal	545.6	1.63
CG without CCS	Fossil fuels (standard)	Coal	435.9	1.34
ATR of CH ₄ with CCS	Fossil fuels (standard)	Natural gas	183.8	1.48
Methane pyrolysis	Fossil fuels (standard)	Natural gas	–	1.59–1.70
Biomass pyrolysis	Fossil fuels (standard)	Woody biomass	53.4–3.1	1.25–2.20
Biomass gasification	Fossil fuels (standard)	Woody biomass	149.3–6.4	1.77–2.05
Direct biophotolysis	Solar	H ₂ O + algae	50 \$/m ²	2.13
Indirect biophotolysis	Solar	H ₂ O + algae	135 \$/m ²	1.42
Dark fermentation	–	Organic biomass	–	2.57
Photofermentation	Solar	Organic biomass	–	2.83
Solar PV electrolysis	Solar	H ₂ O	12–54.5	5.78–23.27
Solar thermal electrolysis	Solar	H ₂ O	421–22.1	5.10–10.49
Wind electrolysis	Wind	H ₂ O	504.8–499.6	5.89–6.03
Nuclear electrolysis	Nuclear	H ₂ O	–	4.15–7.00
Nuclear thermolysis	Nuclear	H ₂ O	39.6–2107.6	2.17–2.63
Solar thermolysis	Solar	H ₂ O	5.7–16	7.98–8.40
Photoelectrolysis	Solar	H ₂ O	–	10.36

Figura 41: Fonte: NNABUIFE, S.G. et al. *Present and Projected Developments in Hydrogen Production: A Technological Review. Carbon Capture Science & Technology*, v.3, 2022.

Para que o preço do hidrogênio possa ser competitivo, é necessário criar incentivos para o desenvolvimento de diversas rotas descarbonizadas visando a redução do custo do hidrogênio. Nos Estados Unidos, por

exemplo, estão priorizando a obtenção de escala na produção de hidrogênio.

Uma das principais formas para reduzir o CAPEX da eletrólise, rota que produz hidrogênio a alto custo, seria diminuir o custo do eletrolisador. Atualmente, existem dois principais tipos principais de eletrolisadores comercialmente disponíveis: o alcalino e o tipo PEM.

As tecnologias alcalinas são mais consolidadas no mercado, o que explica o custo mais baixo em relação ao tipo PEM.

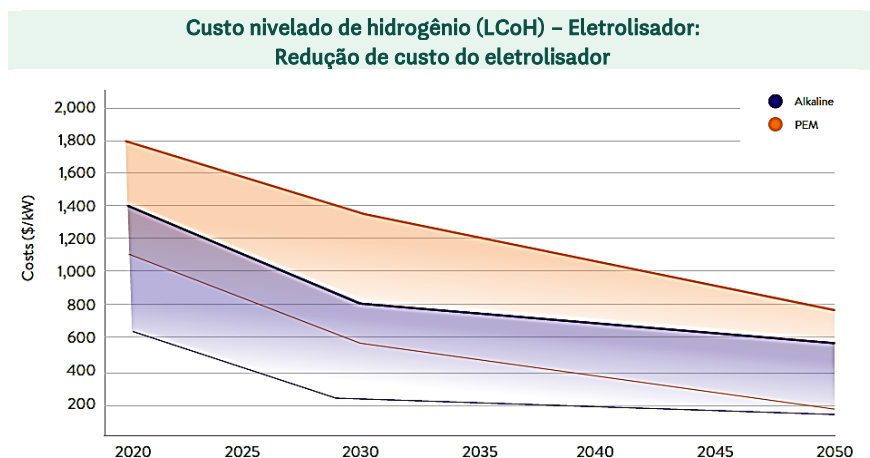


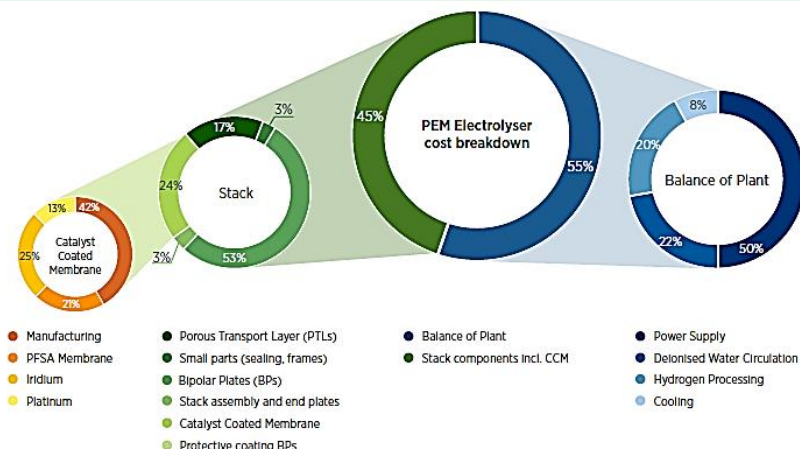
Figura 42:. Fonte: World Energy Council. Hydrogen demand and cost dynamics. Working paper, 2021.

No entanto, a partir de 2030, espera-se uma redução mais drástica nos preços dos eletrolisadores PEM, o que irá aumentar a competitividade dessa tecnologia até 2050.

Em alguns casos, os dois tipos de eletrolisadores podem competir entre si, visto que o tipo PEM é mais eficiente, permitindo redução de custos significativos em determinadas escalas de produção de hidrogênio.

É importante notar que mais de 50% dos custos dos eletrolisadores não se referem ao essencial da eletrólise, que é o stack, mas sim ao balanço de planta, que são todos os outros componentes para o funcionamento do eletrolisador tais como trocadores de calor que realizam o resfriamento, as bombas que gerenciam a circulação de água, as válvulas e os compressores e etc.

Estrutura de custo do eletrolisador tipo PEM de 1 MW



Note: The specific breakdown varies by manufacturer, application and location, but values in the figure represent an average.

CCM = Catalyst Coated Membrane

Figura 43: Fonte: IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy

Dentre dos custos do próprio eletrolisador, os componentes, como as placas e membranas apresentam elevados custos. Outro custo elevado é atribuído ao uso de metais, terras raras e membranas.

Normalmente, os eletrolisadores do tipo PEM utilizam materiais de alto custo e escassas. Pesquisas tem sido direcionada para reduzir o uso de materiais raros nesses dispositivos para garantir a durabilidade e a eficiência ao lidar com os custos operacionais e de capital.

As membranas catalíticas mais finas, que permitem uma maior passagem de íons, são mais eficientes quando possuem uma área maior para a catálise e menor uso de materiais raros. Porém, isso pode comprometer a durabilidade do eletrolisador.

O desafio é encontrar o equilíbrio ideal entre eficiência e durabilidade para minimizar os custos de operação (OPEX) e de capital (CAPEX). Uma maior eficiência na produção de hidrogênio reduzirá os recursos operacionais necessários por quilograma de hidrogênio produzido, tendo um impacto direto no OPEX.

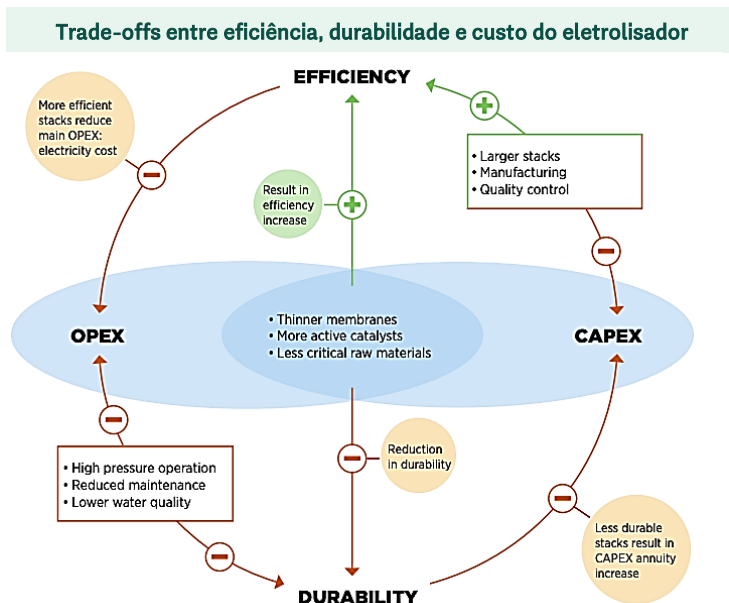


Figura 44: Fonte: IRENA (2020)

No entanto, se isso afetar negativamente a durabilidade do eletrolisador, poderá aumentar o CAPEX, já que será necessário investir em empilhamentos maiores, maior produção e maior controle de qualidade, além de custos de manutenção e troca do eletrolisador. É importante encontrar o ponto ideal para garantir uma produção eficiente e durável de hidrogênio.

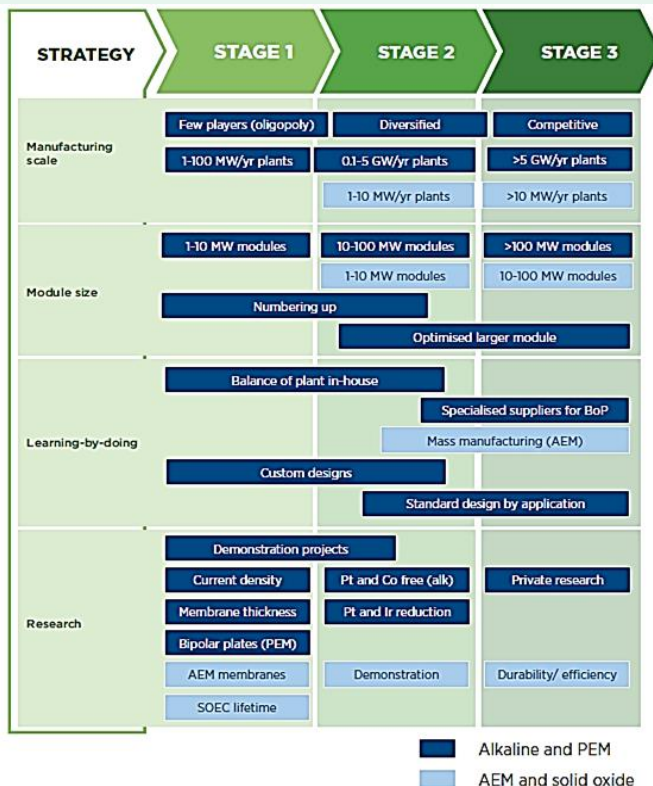
A durabilidade dos eletrolisadores é um fator importante a ser considerado, uma vez que quanto mais duráveis forem esses equipamentos, menor será o investimento necessário em capital.

No entanto, se a durabilidade afetar diretamente a eficiência, isso pode resultar em custos mais altos de operação (OPEX) ou em reduções nos custos, como uma maior pressão, menor manutenção e uso reduzido de água.

Existem alguns desafios em relação aos materiais utilizados nos eletrolisadores que podem afetar positiva ou negativamente tanto a eficiência quanto a durabilidade desses equipamentos.

A longo prazo, o desenvolvimento das tecnologias PEM, alcalina e óxido sólido é pensado em três estágios. O primeiro estágio foca na manufatura ou escalabilidade dessa produção desses equipamentos. O segundo na diversificação dessa economia e, o terceiro em um aumento significativo das escalas de produção (de MW para GW).

Estratégias de redução de custos para eletrolisadores

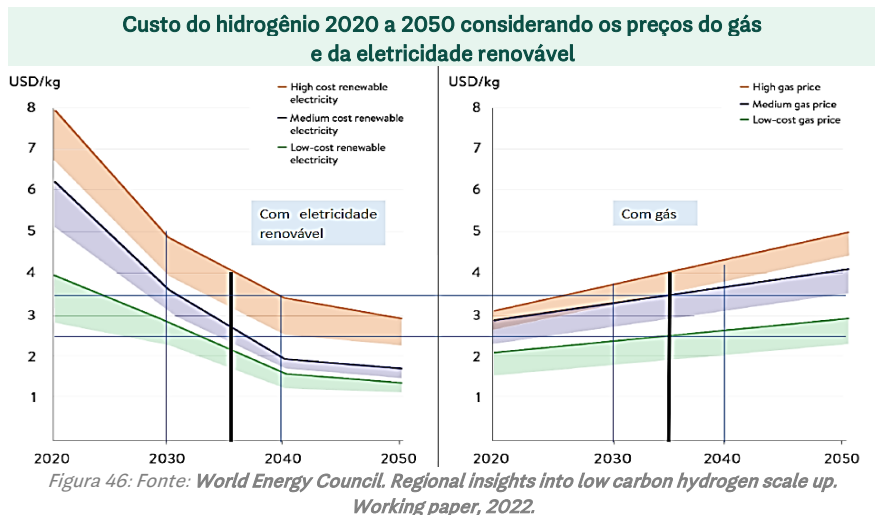


Progridir de um estágio para o próximo não é uma atividade com limite de tempo. Em vez disso, a rapidez com que o custo final no Estágio 3 é alcançado dependerá da rapidez com que os marcos são alcançados. Isso dependerá do apoio político, do capital investido e da implantação.

Figura 45: Fonte: IRENA (2020)

Em 2020, o custo de produção do hidrogênio a partir da eletrolise foi de aproximadamente US\$ 8 por kg de hidrogênio. No entanto, é esperado que com o cenário otimista de produção de eletricidade renovável no Brasil, esse custo seja reduzido em quase um terço do OPEX (custos operacionais).

Por outro lado, o hidrogênio produzido a partir do gás natural pode sofrer com o aumento de preços devido às restrições impostas pelos mercados de crédito de carbono e outras regulamentações que limitam o uso de combustíveis fósseis.



Com a abundância de recursos renováveis no Brasil, é possível reduzir significativamente o custo de produção e tornar o hidrogênio a partir da eletrólise um produto economicamente competitivo.

O quadro a seguir mostra o custo de cada um dos componentes do CAPEX e do OPEX. O custo do eletrolisador é de cerca de 11%.

Caso 2: Custo de produção de hidrogênio com uso de eletricidade renovável (Nova Zelândia)

Elemento de custo	NZ\$/kg H ₂	%
Custo de capital do eletrolisador	1,00	11,9%
Custo operacional do eletrolisador	0,57	6,8%
Custo de eletricidade	6,34	75,4%
Custo de armazenamento	0,50	5,9%
Total	8,41	100%

Figura 47: Fonte: PEREZ, R.J.E. Analysis of the levelized cost of green hydrogen production for very heavy vehicles in New Zealand. Master of Science by Thesis in Electronics and Computer Systems, Victoria University of Wellington, 2020.

Já o custo operacional não é tão grande, mas o do capital do eletrolisador chega a quase 12%. Podemos ver que, no caso da Nova

Zelândia, o principal fator de crescimento do preço do hidrogênio é realmente o custo da eletricidade. O Brasil apresenta potencial para ser competitivo na produção de hidrogênio a partir da eletrolise devido a um custo relativamente baixo de eletricidade renovável.

É importante lembrar que a Nova Zelândia também é um país com um potencial relativamente alto de geração de eletricidade renovável. O Brasil se diferencia por já utilizar esse potencial.

Na figura abaixo, a faixa pontilhada representa a competitividade do hidrogênio em relação ao gás natural.

Custo de produção de hidrogênio em função do preço de eletricidade e horas de operação

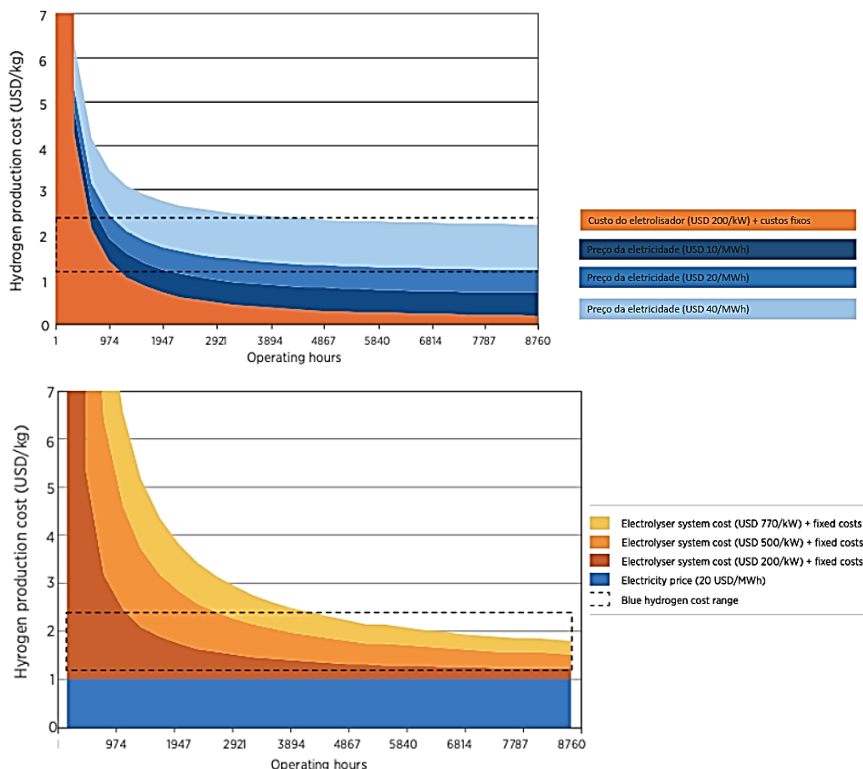


Figura 48: Fonte: **IRENA (2021)**

No entanto, é necessário considerar o custo do eletrolisador ao longo do tempo e da quantidade de horas em que ele é utilizado. Se o eletrolisador for operado por menos de 900 horas, o custo será o principal fator a ser considerado. Após 900 horas, fatores como o custo da eletricidade passam a ter uma maior contribuição no custo operacional.

Podemos observar que o preço da eletricidade é considerado uma constante, ou seja, mantido em um patamar elevado. Isso é importante porque, ao descontar o custo da eletricidade, podemos avaliar os demais custos associados à operação do eletrolisador.

3.3.Custo do hidrogênio: O que é o Hydex?

O Hydex é um índice de preços baseado em custos. Ele reflete o preço médio do hidrogênio, por exemplo com eletrolisador ou com reforma a vapor (com e sem armazenamento de CO₂) na Alemanha. O Hydex é baseado nos custos de produção de hidrogênio de curto prazo. O custo de capital não está incluído.

Índice de preços do hidrogênio, fornecido pelo *German Consultant E-Bridge*):

- O "Hydex Green" indica o preço médio do hidrogênio no local de produção de um eletrolisador. Os certificados de eletricidade (garantias de origem) são adquiridos para toda a quantidade de eletricidade. Presume-se que, de acordo com o EnWG e a alteração EEG, não serão aplicadas taxas da rede elétrica, sobretaxas de gases de efeito estufa e impostos de eletricidade para uso na eletrólise.
- O "Hydex Blue" indica o preço médio do hidrogênio pela reforma a vapor de gás natural e inclui a captura e armazenamento do CO₂ liberado (chamado CCS). Para este processo, os certificados de emissão do ETS só precisam ser adquiridos para as emissões restantes.
- O "Hydex Gray" indica o preço médio do hidrogênio pela reforma a vapor de gás natural. Para o CO₂ liberado, os certificados de emissão devem ser adquiridos no âmbito do Sistema de Comércio de Emissões da UE (ETS).

O reformador a vapor de gás natural é conectado à rede de gás natural. São assumidas as tarifas médias de rede para a ligação de gás de

clientes industriais. O Hydrex refere-se ao menor poder calorífico (LHV) do hidrogênio

O reformador a vapor de gás natural é conectado à rede de gás natural, e as tarifas médias de rede para a ligação de gás de clientes industriais são assumidas. O Hydrex refere-se ao menor poder calorífico (LHV) do hidrogênio.

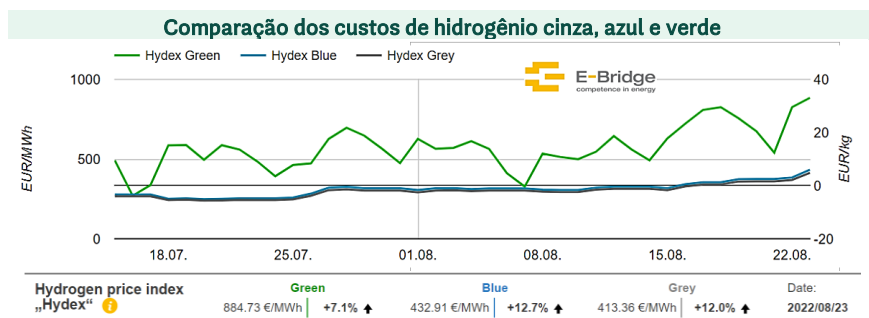


Figura 49: Fonte: <https://www.e-bridge.com/#hydrexmodal>

Um exemplo de sucesso na utilização da economia do hidrogênio ocorreu na região de Colônia, na Alemanha.

O gráfico apresentado a seguir, mostra como essa região utilizou diferentes tipos de veículos em sua estratégia de melhoria total do sistema de transporte.

No centro urbano, o ônibus elétrico foi a escolha mais interessante, enquanto nas regiões mais afastadas, o hidrogênio, o diesel e outros tipos de veículos, como o gás natural ou biogás, foram utilizados. Essa estratégia diversificada e focada na melhoria do sistema contou com a participação ativa do hidrogênio no design do sistema de transporte na região da Colônia, na Alemanha.

Região de Colônia, na Alemanha
Operadora da maior frota de ônibus a H₂ da Europa –
ônibus em operação desde 2011

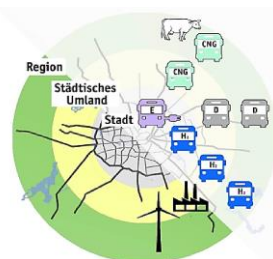


Figura 50: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Projetos financiados apoiaram o início do mercado de ônibus a hidrogênio



Figura 51: Fonte: Notas de Aula, 2023.

- **A RVK é uma operadora de ônibus público regional na Alemanha:**
 - aprox. 830 funcionários
 - Área de tráfego: aprox. 2.800 km²
 - mais de 2,3 milhões de habitantes
- **Uso diário do veículo: ca. 450 ônibus**
- **A partir de 2030, a mais tardar, apenas aquisição de veículos com formas de propulsão próximas de zero ou zero emissões.**
- **Dependendo das prioridades tecnológicas da região:**
 - Ônibus híbridos de célula de combustível (distritos):
 - Ônibus a GNV com biogás natural
 - Veículo elétrico a bateria BEV

Operador de ônibus regional RVK em Colônia/Alemanha: Custos para ônibus H₂ na Europa

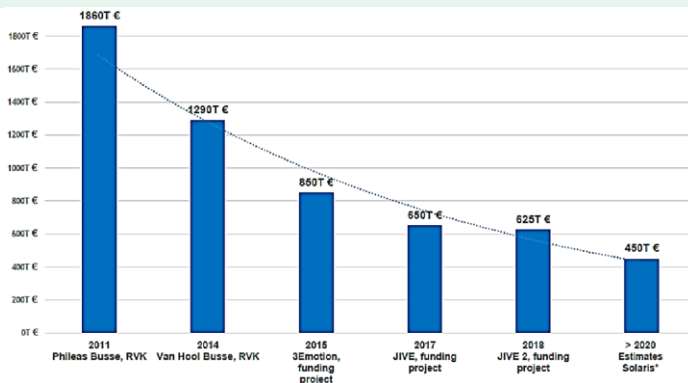


Figura 52: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Ônibus movidos a hidrogênio estão se tornando cada vez mais viáveis economicamente na Europa. Com o passar do tempo, o custo desses ônibus tem diminuído bastante. Além disso, é importante lembrar que o

papel das estações de abastecimento de hidrogênio na Europa é fundamental para o funcionamento desses veículos.



Figura 53: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Uma das vantagens dos ônibus e trens em relação aos carros é que eles têm rotas fixas, ou seja, sempre passam pelos mesmos pontos.

Isso facilita a instalação de estações de abastecimento de hidrogênio, já que é possível estimar onde elas devem estar localizadas com mais precisão. Por isso, na Europa, tem se investido bastante na expansão da estrutura de distribuição de hidrogênio, especialmente em regiões com frotas de ônibus e trens.

Isso permite que as localidades onde as estações devem ser instaladas sejam determinadas com maior precisão, o que é importante tendo em vista que a distribuição de hidrogênio é um processo caro.

A Shell é uma empresa que tem se voltado para a descarbonização, e busca reduzir a pegada de carbono de suas atividades. Para isso, ela utiliza diversos tipos de combustíveis, como o hidrogênio e o gás natural, e investe em tecnologias para armazenar permanentemente o CO₂ retirado da atmosfera.

Além disso, a empresa busca usar esses combustíveis de forma diferente, como na produção de plásticos, no transporte rodoviário e na produção de lubrificantes. A Shell tem se preocupado em utilizar fontes

renováveis intermitentes, bem como resíduos plásticos e de biomassa para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

**Em 2020, a Shell lançou sua estratégia de descarbonização
"CO₂ – net zero até 2050 ou antes"**



Hydrogen: "Engine of the future" in the energy transition

- Net-zero para operações próprias (por exemplo, usando H₂ Verde nas refinarias da Shell ou biocombustíveis);
- Pegada de carbono líquida – ambição 1,5°C;
- Apoiar os clientes na descarbonização (também como modelo de negócios).

Figura 54: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Caso Shell – Shell Rhineland se tornará o local-chave para transformação



Figura 55: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Aqui, podemos observar a construção de um eletrolisador. Apenas os eletrolisadores são apresentados nesta imagem. É interessante notar,

em primeiro lugar, a presença de diversas bandeiras europeias, indicando que se trata de um projeto europeu.

Caso Shell – Construção do maior eletrolisador PEM da Europa

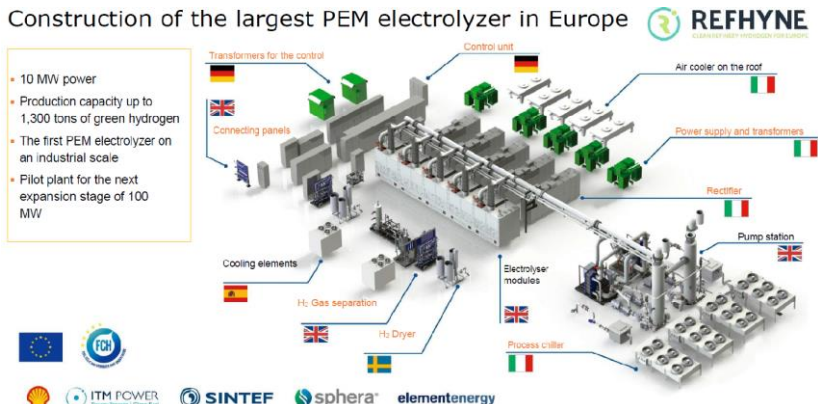


Figura 56: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Em segundo lugar, percebe-se que a parcela do eletrolisador em si é reduzida em relação ao tamanho total da unidade.

São necessárias estações de bombeamento, processos como secagem do hidrogênio, separação de gás, resfriamento, conexão das partes, controladores, entre outros componentes, o que encarece o balanço de planta. Na cadeia de valor do hidrogênio, cada um desses componentes pode potencialmente influenciar a expansão e uso dos eletrolisadores.

No município de Maricá, no estado do Rio de Janeiro, há um exemplo interessante de utilização do dinheiro dos royalties do petróleo para investir em projetos de descarbonização.

A Prefeitura de Maricá tem buscado reinvestir esse dinheiro em outras atividades econômicas que garantam à cidade uma posição mais competitiva, consciente da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa:

- Maricá é a cidade do Brasil com mais royalties da gasolina (R\$ 2,4 bi em 2021);
- Investe parcialmente esse recurso em atividades econômicas para industrialização;

- Outros investimentos são, por exemplo, passe de transporte gratuito na cidade;
- Maricá está investindo no desenvolvimento de 3 ônibus híbrido-elétricos:
 - Etanol-elétrico (na foto)
 - Ônibus elétrico a hidrogênio
 - Ônibus elétrico
- Após teste, 125 ônibus de Tarifa Zero serão reformados com a melhor tecnologia.

Caso Maricá, Rio de Janeiro



Figura 57: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Uma das iniciativas da cidade foi desenvolver um sistema de transporte público gratuito, com alguns ônibus disponíveis para a população. Outra iniciativa pioneira é o desenvolvimento de ônibus híbridos, que combinam a tecnologia do etanol, eletricidade e hidrogênio.

Esses ônibus estão sendo testados em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro, e a prefeitura planeja substituir 125 ônibus convencionais pelos modelos híbridos escolhidos para atender às rotas da cidade.

É importante ressaltar que essas iniciativas não envolvem apenas a compra de ônibus, mas também o desenvolvimento de infraestrutura para o armazenamento e distribuição de hidrogênio. Além disso, a cidade está realizando estudos para identificar outras atividades econômicas que possam ser impulsionadas com a utilização de recursos dos royalties do petróleo, como a produção de energia renovável.

4. Mercado global de hidrogênio e estratégias nacionais

O comércio internacional de hidrogênio tem impulsionado o desenvolvimento de economias locais de hidrogênio em diversos países que buscam formas de produzir, exportar ou importar essa commodity.

Os custos de produção de hidrogênio variam entre países dependendo dos recursos disponíveis e das tecnologias empregadas. Alguns países apresentam vantagens naturais na produção de hidrogênio, como a disponibilidade de fontes renováveis de energia ou outros recursos energéticos para a produção de hidrogênio. Transportar o hidrogênio ou seus carreadores de forma econômica, segura e eficiente ainda é um desafio para o desenvolvimento do mercado global.

Os países apresentam diferenças em relação ao desenvolvimento do mercado de hidrogênio. Para entender melhor, podemos analisar a demanda por energia desses países.

O gráfico a seguir, mostra que a linha vermelha representa a média da demanda energética, e acima dela estão os países desenvolvidos, que geralmente possuem um setor industrial forte e uma demanda energética maior.

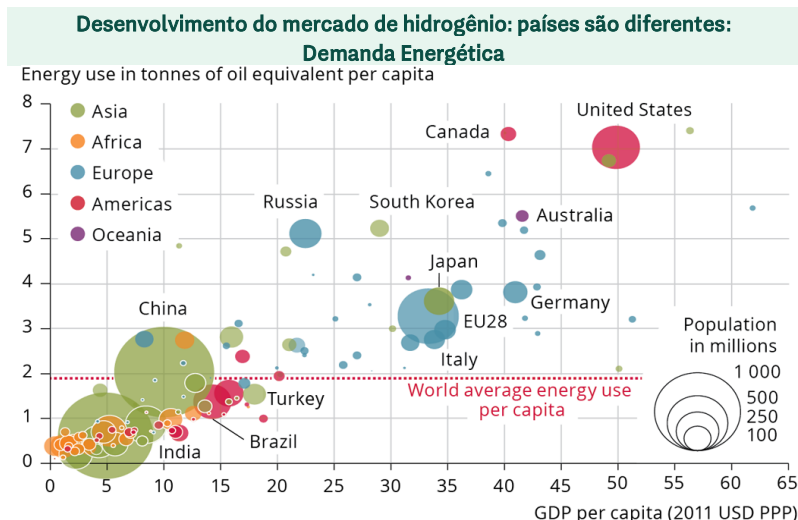


Figura 58: Fonte: Notas de Aula, 2023.

- Forte correlação entre PIB e uso de energia
- Países de baixa renda têm menor demanda de energia
- Menos atividade da indústria

Já os países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos ficam abaixo desse valor energético, pois são normalmente agrários, possuem pouca atividade industrial e, conseqüentemente, menos demanda energética.

Os Estados Unidos se destacam como o país com a maior demanda de energia do mundo, consumindo mais energia por habitante. A China também possui uma grande indústria, mas sua população elevada equilibra o consumo de energia.

Existe uma forte correlação entre o PIB, o desenvolvimento desses países e seu consumo de energia, principalmente por conta do setor industrial. Os países de baixa renda são aqueles que possuem menor demanda de energia, pois a indústria é menos ativa nesses países, gerando menos renda e emprego.

Por outro lado, a disponibilidade de energia renovável no mundo não necessariamente se concentra a demanda - o norte global apresenta uma maior demanda e o sul global uma maior oferta. As exceções são, por exemplo a Austrália, a península da Europa como Espanha e Portugal, e principalmente, os Estados Unidos.

O aumento da atividade industrial para o sul global é uma alternativa para a utilização dos recursos energéticos locais.

Potencial de produção de energia renovável

Hydrogen costs from hybrid solar PV and onshore wind systems in the long term

Faixa de preços competitivos

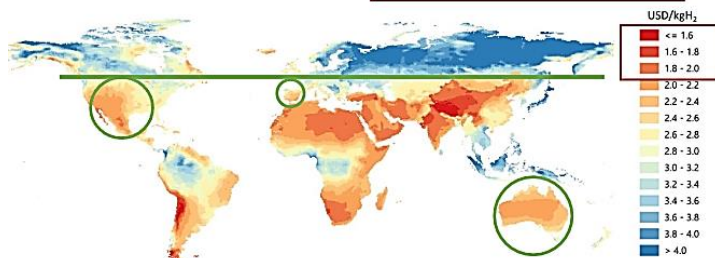


Figura 59: Fonte: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

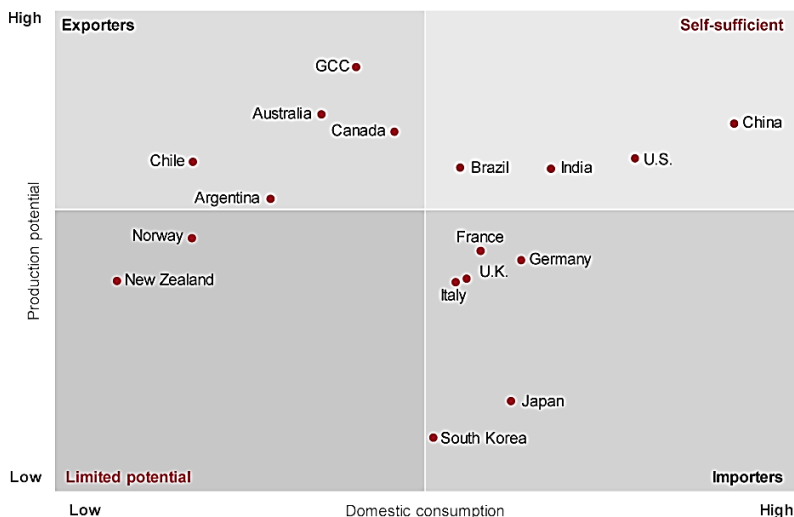
Os países podem ser classificados como exportadores, importadores ou autossuficientes em hidrogênio, e essa classificação pode mudar ao longo do tempo à medida que novas tecnologias são desenvolvidas e novas fontes de hidrogênio se tornam disponíveis.

Os exportadores são aqueles que possuem grande potencial para produção de hidrogênio, mas não têm tanta demanda interna. Isso pode ser devido ao fato de serem países com uma população pequena ou com indústrias pouco desenvolvidas. Já os importadores são países com uma atividade industrial forte, mas com poucos recursos naturais ou energéticos disponíveis. Eles precisam encontrar outras fontes de energia para suprir suas necessidades.

Desenvolvimento do mercado de hidrogênio: países são diferentes: classificação dos países de acordo com o comércio internacional

GCC countries have great export potential

Green hydrogen production, domestic consumption, and export potential



Exportadores:

- produção de energia é maior do que a demanda;
- Austrália, Chile, Norte da África e Espanha;

Importadores:

- regiões onde os recursos domésticos têm custos mais altos do que o hidrogênio importado;
- ou onde não há potencial renovável suficiente para satisfazer a demanda doméstica;

Autossuficientes:

- recursos renováveis suficientes para atender sua demanda de hidrogênio com produção local;

a produção de hidrogênio é uma proposta viável para atender sua própria demanda ao menor custo, com necessidade limitada de comércio internacional (China e Estados Unidos e Brasil).

Figura 60: Fonte: <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen.html>

O Brasil tem um lugar de destaque, pois possui um alto potencial de produção de hidrogênio, com estudos demonstrando a viabilidade de produção a partir de fontes renováveis, bem como a captura de carbono.

Além disso, o Brasil tem uma grande demanda interna por hidrogênio devido à sua forte presença em setores como mineração, siderurgia e agropecuária, que precisam descarbonizar suas atividades.

Essa grande demanda interna coloca o Brasil no mesmo quadrante de países como China, Estados Unidos e Índia, que possuem uma grande população e uma demanda significativa em setores como transporte, produção de ferro, fertilizantes e cimento.

Cada país apresentará diferentes demandas energéticas e recursos renováveis para a geração de energia, e isso terá implicações diretas para o preço final da produção de hidrogênio naquela região. O custo de produção de hidrogênio está intimamente ligado à capacidade desses países de reduzir o OPEX, que é o custo operacional dessas plantas e está muito relacionado à eletricidade renovável e à disponibilidade de recursos renováveis.

Além disso, cada país apresenta especificidades em relação ao hidrogênio. Cada país tem sua própria indústria, disponibilidade de recursos renováveis e infraestrutura de distribuição de hidrogênio, o que leva a estratégias diferentes para o hidrogênio localmente.

Como exemplo, a Alemanha está buscando colocar 20% de hidrogênio na mistura de gás natural, enquanto no Brasil, estamos trabalhando para alcançar 10%. Essas diferenças resultam em infraestruturas disponíveis para transporte de hidrogênio distintas em cada país.

4.1. Hidrogênio: um insumo exportável?

O transporte de hidrogênio pode ser realizado por meio de gasodutos, navios ou caminhões. Em relação à distância percorrida, os gasodutos são utilizados para distribuição ou transmissão de hidrogênio em até 50 km ou 100 km. Já para distâncias maiores, como o transporte transatlântico do Brasil até a Europa, é necessário o uso de gasodutos com mais de 5.000 km.

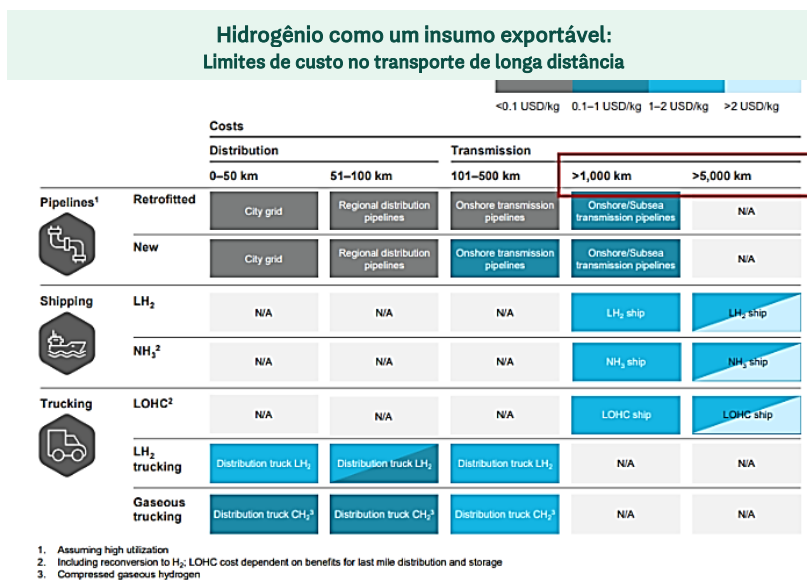


Figura 61: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Os custos de transporte variam de acordo com o meio utilizado. O transporte via gasoduto é considerado o mais barato e apresenta menor impacto de emissões de CO₂. Para garantir essa redução de impactos ambientais, os países estão pensando em misturar o hidrogênio com gás natural. Esse tipo de transporte é viável em distâncias de até 1.000 km em terra, não sendo indicado para grandes distâncias subaquáticas.

Em resumo, o transporte de hidrogênio é realizado por meio de diferentes meios, sendo o gasoduto o mais vantajoso em termos de custo e emissões.

No entanto, para distâncias maiores, é necessário utilizar gasodutos com extensões superiores a 5.000 km. A mistura de hidrogênio com gás

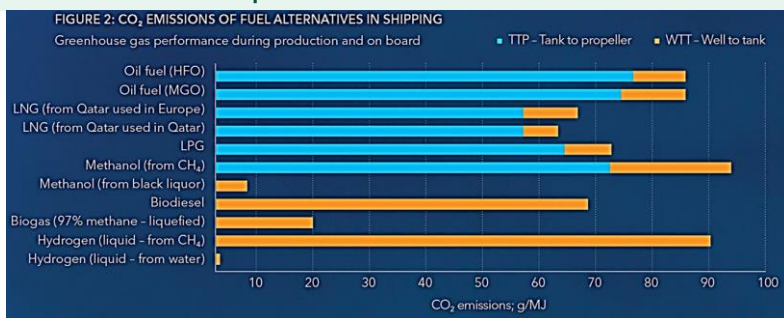
natural é uma estratégia utilizada para reduzir o impacto ambiental do transporte.

Ao pensar na exportação de hidrogênio, surgem desafios relacionados à distância, como no caso da importação de hidrogênio pelo Japão, da Austrália ou da exportação de hidrogênio pelo Brasil para a Europa. Como solucionar essa questão?

Inicialmente, é preciso condicionar o hidrogênio. Para o setor marítimo, estão sendo considerados dois tipos de condicionamento: hidrogênio líquido e amônia. No entanto, essa forma de transporte é mais cara e, para distâncias superiores a 5.000 km, a única opção é o transporte via navios. Os navios, por sua vez, utilizam óleo pesado e emitem uma quantidade relativamente alta de poluentes.

Já no transporte rodoviário, o hidrogênio pode ser condicionado em tanques líquidos ou gasosos, ou como carreadores orgânicos, sendo o primeiro método mais comum. No entanto, é importante ressaltar que a logística do transporte ainda é um grande desafio a ser enfrentado no comércio internacional de hidrogênio. Por fim, ressalta-se que há também as emissões de GEE associadas ao transporte de hidrogênio.

Perspectivas dos combustíveis alternativos marítimos para o comércio internacional



- Combustíveis alternativos considerados na indústria marítima são substitutos do óleo pesado
- GNL, metanol, biocombustíveis, amônia e hidrogênio são alternativas possíveis para reduzir as atuais alternativas de emissões
- As considerações das emissões referem-se a "well-to-propeller"

Figura 62: Fonte: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/alternative-fuels.html>

Ao substituir esses combustíveis por alternativas como o hidrogênio, as emissões relacionadas ao transporte serão reduzidas. Existem várias opções de combustíveis alternativos que podem substituir o petróleo e o óleo pesado, como o gás natural, o metanol, biocombustíveis e amônia.

A amônia tem ganhado destaque como uma alternativa viável para o setor de transporte marítimo, pois pode ser produzida a partir de fontes renováveis e não emite gases poluentes durante a queima.

No entanto, é importante ressaltar que as emissões de gases poluentes ainda ocorrem durante a produção desses combustíveis, o que reforça a importância de investir em fontes de energia limpas e renováveis.

É importante destacar as áreas estratégicas em que o hidrogênio agrega valor a uma economia. A sua produção é apenas uma parte da cadeia de valor, sendo necessário ainda armazená-lo, distribuí-lo e utilizá-lo.

Quanto mais avançamos nessa direção, como demonstrado na figura, mais valor agregado a cadeia de hidrogênio pode gerar para as economias locais.



Figura 63: Fonte:

https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Value%20Chain%20study%20SummaryReport_v2.02.pdf

Os benefícios industriais da cadeia do hidrogênio estão relacionados à fabricação de equipamentos, componentes e infraestruturas necessárias para a produção e utilização do hidrogênio.

A transformação da indústria do hidrogênio gera valor econômico e agregado, gerando empregos e renda para a população. Por isso, muitos países têm desenvolvido estratégias para investir nessa indústria. É importante destacar que incorporar toda a cadeia do hidrogênio é fundamental para o desenvolvimento econômico e tecnológico.

Foi realizado um estudo para identificar onde há maior valor agregado na cadeia de hidrogênio no desenvolvimento desses equipamentos. O objetivo é alcançar seu alto desenvolvimento para aumentar a participação do mercado europeu e impulsionar o desenvolvimento econômico e tecnológico da região.

Valor Agregado do Hidrogênio: exemplo da Europa



Figura 64: Fonte:

https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Value%20Chain%20Study%20SummaryReport_v2.02.pdf

O “cenário A” com baixa participação do mercado europeu e baixo desenvolvimento do setor de hidrogênio; o “cenário C” com alta participação do mercado europeu e alto desenvolvimento da cadeia hidrogênio e o “cenário B” com baixa participação do mercado europeu e alto desenvolvimento do hidrogênio no cenário mundial. O primeiro gráfico mostra a produção do sistema total em euros, considerando os diferentes cenários.

Produção global do sistema: exemplo da Europa

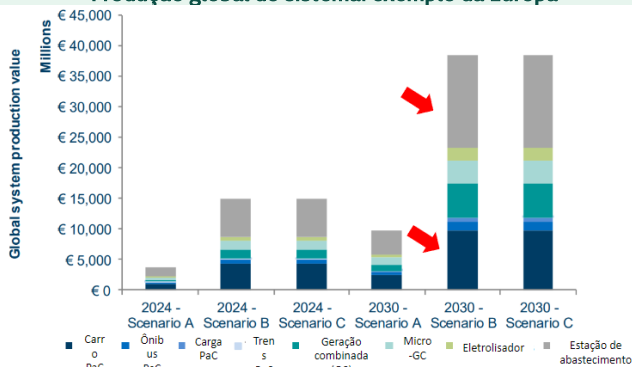


Figura 65: Fonte:

https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Value%20Chain%20Study%20SummaryReport_v2.02.pdf

A primeira cor escura representa os carros movidos a pilha a combustível, a segunda cor azul representa os ônibus, a terceira cor verde representa a geração combinada e a cor cinza representa as estações de abastecimento. Cada cor representa um setor diferente e, até 2030, o desenvolvimento bem mais amadurecido seria o não desenvolvimento desse mercado do hidrogênio.

No mercado desenvolvido, há um grande salto em dois setores principais: as estações de abastecimento e os automóveis movidos a células a combustível. O setor de transporte é considerado estratégico para o desenvolvimento ou onde se consegue gerar uma maior quantidade de recursos econômicos.

No que diz respeito ao emprego direto, as estações de abastecimento geram empregos em toda a infraestrutura necessária para que a estação funcione, refletindo em uma maior geração de empregos diretos, principalmente no caso europeu.

Outros setores importantes incluem os carros e a geração combinada, mas em contraste com os eletrolisadores, que representam a cor verde mais clara no gráfico, tanto o emprego direto quanto o valor econômico agregado direto são significativamente menores em relação à parte da demanda que é voltada para o transporte.

Na indústria automotiva, o desenvolvimento de todo o veículo, incluindo seus componentes e fornecedores, gera uma grande quantidade de empregos indiretos, que não estão diretamente relacionados ao negócio principal. No caso da aplicação de hidrogênio no transporte, esses empregos são gerados principalmente na produção de peças para o veículo.

4.2. Países diferentes, estratégias diferentes.

A utilização do hidrogênio como insumo energético é uma realidade cada vez mais presente em diversos países. Cada nação tem suas próprias estratégias e políticas para o uso desse insumo. Neste sentido, é interessante observar que diversos países já possuem estratégias bem definidas, tais como Brasil, Austrália, Canadá, Chile, muitos da região

européia como Alemanha, França, Espanha e Suécia, além de Japão e Coreia.

Alguns países têm como objetivo a exportação de tecnologia relacionada ao hidrogênio, como é o caso da Alemanha, que exporta principalmente eletrolisadores, ou a exportação do próprio hidrogênio, como é o caso da Austrália, China e Canadá. Outros países possuem desenvolvimento forte em pilhas ou células a combustível, como o Japão e a Coreia.

Assim, fica claro que a implementação de políticas voltadas ao uso do hidrogênio é uma tendência mundial e cada país está buscando sua própria estratégia para aproveitar os benefícios econômicos e ambientais desse insumo.

Podemos observar no quadro a seguir, as estratégias nacionais de hidrogênio de diversos países.

Comparações de Estratégias Nacionais													
CATEGORY	ASIA			EUROPE								LAC	NORTH AMERICA
	Australia	Japan	South Korea	EU	France	Germany	Hungary	Netherlands	Norway	Portugal	Spain	Chile	Canada
Strategy contains timeline for market development with targets	●	●	●		●		●	●	○	●		●	●
Strategy contains hydrogen cost targets	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Strategy includes measures to support H2 development													
Direct investments	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●
Other economic and financial mechanisms	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Legislative and regulatory measures	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Standardisation strategy and priorities	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Research & development initiatives	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
International strategy	●	●	●	○	○	●	○	●	●	●	●	●	●
Strategy addresses social issues for H2 development	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Strategy includes review and update	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Strategy's H2 target source by 2030	Clean	Feedstock with CCS	From natural gas	Low carbon	Low carbon & fossil based	Carbon free	Low carbon & fossil based	Low carbon & fossil based	Blue & Green	Clean	Green	Renewable	Green
Strategy's H2 target source by 2050	Clean	CO ₂ free	Eco-friendly CO ₂ free	Clean / Renewable	Low carbon	Renewable	Low carbon & fossil based	Green	Clean	Green	Renewable	Green	Low carbon intensity
Import / Self-reliance / Export	Export / Self-reliance	Import	Import / Export (both)	Export	Import / Export (both)	Export	Import / Export (both)	Self-reliance	Import to export H2 (if full)	Self-reliance	Self-reliance / Export	Self-reliance / Export	Self-reliance / Export
Strategies content: ● Detailed ● Mentioned ○ Not seen													

- As estratégias da Ásia têm uma forte orientação para os custos, a UE e os seus países não tanto;
- Apenas Chile e Portugal têm uma estratégia focada em H₂ “verde” (NL para 2050);
- Outros países também se concentram na redução das emissões de CO₂ relacionadas à produção de H₂ de outras matérias-primas;
- Países com abundância de energia renovável ou energia nuclear têm uma estratégia de exportação;
- Alguns países como Coreia do Sul e Alemanha têm uma estratégia focada na exportação de tecnologia.

Figura 66: Fonte: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf

Podemos observar que há países com direcionamentos específicos na Europa e na Ásia, além de países na América Latina e América do Norte

com diferentes enfoques. Uma das diferenças que podemos notar é que na Ásia, o custo é uma preocupação central das estratégias de hidrogênio, enquanto na Europa, o custo não é considerado tão relevante.

Outro ponto destacado na tabela é que somente Portugal e o Chile têm o foco em Hidrogênio Verde até 2030, enquanto todos os outros países vão utilizar algum tipo de mistura.

Por exemplo, na Ásia, o foco está em CCS, que é a captura e armazenamento de carbono ou uso do gás natural. É importante ressaltar que não existe uma ênfase somente na parte de eletrólise até 2030, o que permite que o custo de desenvolvimento da infraestrutura de hidrogênio seja mais baixo em países como a Ásia.

O hidrogênio é uma fonte de energia limpa que vem sendo cada vez mais explorada em diversas partes do mundo. Na Europa, por exemplo, o foco é no hidrogênio de baixo carbono, produzido com captura de carbono. Embora a eletrólise seja importante, a produção a partir de fontes fósseis ainda faz parte da estratégia. A França, por exemplo, está estudando a produção de hidrogênio a partir de energia nuclear. Já na Alemanha, o termo utilizado é “hidrogênio em carbonos”, que significa produzir hidrogênio sem gerar carbono extra na atmosfera.

Embora o termo “Hidrogênio Verde” seja bem popular, observa-se que não é o único tipo de hidrogênio produzido.

A Holanda, por exemplo, produz tanto hidrogênio azul quanto verde, ou seja, hidrogênio com e sem captura de carbono, respectivamente. Além disso, a partir de 2050, a Holanda terá um foco ainda maior no Hidrogênio Verde.

Outros países também possuem estratégias distintas em relação ao hidrogênio. Portugal e Chile, por exemplo, já estão trabalhando com o Hidrogênio Verde, enquanto outros países utilizam algum tipo de mistura, como a Ásia, que está focada em CCS (captura e armazenamento de carbono) e uso do gás natural.

Até 2030, não se espera que o foco seja exclusivamente na eletrólise, pois é necessário garantir um custo mais baixo para o desenvolvimento da infraestrutura de hidrogênio.

No contexto da Alemanha, assim como em outros países europeus, o Hidrogênio Verde tem sido visto como o futuro da energia, com a meta de produzir hidrogênio a partir de fontes renováveis até 2050. No entanto, até 2030, o hidrogênio com captura de carbono ainda é considerado uma opção importante.

É interessante observar que cada país tem uma estratégia diferente em relação ao hidrogênio, incluindo se focam na importação ou exportação. A França, por exemplo, tem como principal objetivo a exportação de hidrogênio, já que produz o elemento a partir da energia nuclear, o que lhe dá uma grande vantagem em termos de abundância. Portugal e Espanha também visam a exportação para países vizinhos da Europa.

No Chile, por outro lado, o foco é a exportação do Hidrogênio Verde, com o país sendo o primeiro da América Latina a se colocar como exportador do elemento. É interessante observar como cada país tem suas próprias estratégias e necessidades energéticas, o que acaba influenciando em como lidam com o Hidrogênio Verde e suas diferentes formas de produção.

No mundo, o Hidrogênio Verde é uma aposta para reduzir a emissão de gases do efeito estufa.

Comparações de Estratégias Nacionais													
CATEGORY	ASIA			EUROPE								LAC	NORTH AMERICA
	Australia	Japan	South Korea	EU	France	Germany	Hungary	Netherlands	Norway	Portugal	Spain	Chile	Canada
SECTORIAL PRIORITIES													
Heating	Immediate	Immediate	Lower	Lower	Lower	Lower	Immediate	Immediate	Lower	Immediate	Lower	Immediate	Immediate
Industry													
Iron and Steel	Long term	Lower	Lower	Long term	Immediate	Immediate	Long term	Immediate	Lower	Immediate	Lower	Not seen	Immediate
Chemical feedstock	Immediate	Lower	Not seen	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate
Refining	Immediate	Lower	Not seen	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate
Others (cement, etc.)	Not seen	Not seen	Not seen	Not seen	Immediate	Lower	Long term	Lower	Not seen	Immediate	Lower	Not seen	Immediate
Power													
Power generation	Lower	Immediate	Immediate	Lower	Not seen	Not seen	Lower	Lower	Not seen	Lower	Lower	Not seen	Lower
Back-up services	Lower	Lower	Lower	Not seen	Not seen	Not seen	Long term	Lower	Not seen	Lower	Lower	Not seen	Lower
Transport													
Passenger vehicles	Lower	Immediate	Immediate	Lower	Lower	Lower	Long term	Immediate	Lower	Lower	Lower	Long term	Immediate
Medium and heavy duty	Immediate	Long term	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Lower	Immediate	Lower	Immediate	Immediate
Buses	Immediate	Long term	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Immediate	Lower	Immediate	Lower	Immediate	Immediate
Rail	Lower	Lower	Lower	Immediate	Immediate	Immediate	Lower	Immediate	Not seen	Immediate	Lower	Not seen	Long term
Maritime	Long term	Lower	Lower	Long term	Lower	Long term	Lower	Lower	Immediate	Long term	Lower	Long term	Long term
Aviation	Lower	Lower	Not seen	Immediate	Long term	Long term	Not seen	Lower	Lower	Lower	Lower	Long term	Long term

A maioria dos outros países tem foco nos setores H₂ já em uso (matéria-prima química, refino). A Ásia concentra-se no uso de energia do H₂ para transporte e geração de energia (Ene-Farm em JP – implementado em casas para cogeração e água). Já a Noruega é o único país com foco imediato na indústria marítima e a França na indústria da aviação

Figura 67: Fonte: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf

Países estão investindo em estratégias de produção e utilização do hidrogênio para setores prioritários. O setor de aço verde e ferro tem prioridade intermediária. Já o setor de produção de químicos, é responsável pela produção de amônia, não é considerado prioritário. Os setores de fertilizantes e químicos são estratégicos, sendo que muitos países adotam esses setores como uma forma de entrada imediata no hidrogênio.

Na Ásia, há um foco na geração de energia elétrica e no transporte, com desenvolvimento peculiar e específico. Já na Europa, Noruega e França têm foco na indústria marítima e aviação, respectivamente, com impulso de empresas domésticas.

Na Ásia, o transporte com hidrogênio é mais voltado para passageiros, enquanto na Europa e em muitos países há estratégias para descarbonização imediata de veículos de médio porte e ônibus.

A Ásia se destaca enquanto região mais avançadas em relação ao uso e produção de hidrogênio. Países como Japão, Coreia e China têm impulsionado muito o crescimento dessa tecnologia na região.

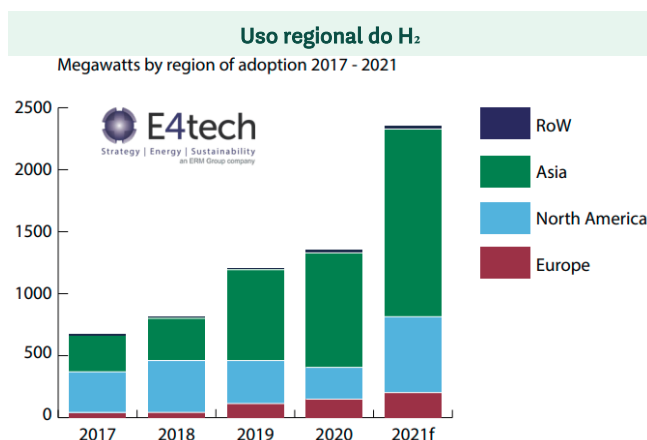


Figura 68: Fonte: E4TECH_ The Fuel Cell Industry Review 2021

Até 2018, os Estados Unidos e o Canadá eram os países com maior foco no hidrogênio, principalmente na Califórnia. No entanto, com o aumento das políticas voltadas para o desenvolvimento do hidrogênio na Ásia, essa região despontou rapidamente como uma das mais avançadas no

assunto. Na Europa, o crescimento ainda é tímido, mas também está em ascensão.

No Japão, especificamente, já existe um alto nível de desenvolvimento em relação ao uso do hidrogênio. Durante as Olimpíadas, que ocorreram durante a pandemia, o país fez uma demonstração do potencial do uso do hidrogênio, mostrando que o estádio e a vila dos atletas foram abastecidos dessa maneira, algo realmente excepcional.

Além disso, o Japão tem um dos principais veículos de passageiros que utilizam o hidrogênio, o Toyota Mirai, um veículo movido a hidrogênio, e dispositivos como o ENE-Farm, que utiliza células a combustível estacionárias para cogeração de calor e eletricidade, além de gerar água para as residências.

A Coreia também tem um modelo similar, o Hyundai Nexus, e a Honda já produziu o Honda Clarity, embora esse modelo tenha sido descontinuado recentemente.



Figura 69: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Outra região importante é a Califórnia, que possui 48 estações de abastecimento de hidrogênio, mais do que a Alemanha, que possui apenas 37. No entanto, é importante destacar que, em relação ao uso de hidrogênio, a Califórnia é o único estado americano que possui um grande investimento no setor.

Estratégias Nacionais: EUA / Califórnia



Figura 70: Fonte: Notas de Aula, 2023.

Empresas de base tecnológica, tais como a ZeroAvia, que desenvolve aviões movidos a hidrogênio, e a Hyzon Motors e Nikola, que produzem caminhões, movidos a bateria ou hidrogênio, são exemplos da estratégia de inovação do país.

Outra inovação desenvolvida nos EUA são as estações de abastecimento SimpleFuel, que utilizam a energia disponível na rede elétrica e água para produzir hidrogênio por meio de eletrólise. O mercado norte-americano é diferente do europeu, com empresas voltadas para segmentos específicos de transporte.

O Hidrogênio Verde é uma das principais estratégias da União Europeia para alcançar a descarbonização de sua economia. Essa estratégia faz parte do Green Deal e do *Next Generation EU Development Instrument*, que visam a transição para uma economia mais sustentável.

Entre 2020 e 2024, a meta é instalar eletrolisadores para produzir hidrogênio renovável com capacidade de eletrólise de pelo menos 6 GW (atualmente, a capacidade é de apenas 1 GW) e produzir até 1 milhão de toneladas de hidrogênio renovável.

De 2025 a 2030, o objetivo é integrá-lo como um componente essencial do sistema de energia, instalando eletrolisadores para produzir pelo menos 40 GW de hidrogênio renovável e produzindo até 10 milhões de toneladas de hidrogênio renovável.

Nesse prazo, espera-se que suas tecnologias estejam maduras o suficiente para serem implantadas em grande escala em todos os setores onde a descarbonização é difícil. Para isso, estima-se que o volume de investimento em hidrogênio renovável pode chegar a € 180-

470 bilhões até 2050, enquanto para o hidrogênio fóssil com baixo teor de CO₂, o investimento pode chegar a € 18 bilhões.

Para financiar essas metas, a UE criou o Fundo de Inovação ETS da UE, que disponibiliza € 10 bilhões até 2030 para promover tecnologias de baixo carbono, e o Programa Projetos Importantes de Interesse Europeu Comum (IPCEI).

Uma das principais diferenças entre a estratégia europeia e a estratégia estadunidense é que a Europa foca nas próprias indústrias já existentes, enquanto os Estados Unidos tendem a focar em indústrias novas, como startups.

A Alemanha é um dos países que têm investido bastante em tecnologias de Hidrogênio Verde. Em junho de 2020, o governo federal alemão publicou a Estratégia Nacional de Hidrogênio, com o objetivo de estabelecer o hidrogênio como elemento central da transição energética.

A Alemanha tem uma trajetória longa no desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio, o que lhe confere um conhecimento técnico avançado nessa área. Com essa estratégia, o país espera acelerar ainda mais o desenvolvimento e a implementação dessas tecnologias, que são essenciais para a descarbonização de processos de produção e para a transição energética.

Alemanha: Estratégia Nacional de Hidrogênio (2020)



Para alcançar o objetivo, a estratégia tem como metas:

- criar condições para a aceitação no mercado das tecnologias de hidrogênio;
- fortalecer as empresas alemãs e sua competitividade por meio de P&D acelerado;
- financiar projetos de pesquisa na área, como os Laboratórios de Transição Energética;
- a Rede de Pesquisa de Hidrogênio e o Programa Nacional de Inovação para Tecnologias de Hidrogênio e Pilhas a Combustível (NIP).

O governo do estado de NRW estabeleceu um Roteiro de Hidrogênio com o objetivo de tornar os processos industriais quase neutros em

termos de clima até 2050, utilizando o hidrogênio como principal recurso.

North-Rhine-Westphalia NRW – Estado na Alemanha



O plano prevê a instalação de 100 quilômetros de rede de dutos H₂ até 2025, além da operação das primeiras usinas de grande porte, 400 caminhões de pilha a combustível, 80 estações de abastecimento de H₂ e 500 ônibus movidos a hidrogênio.

Já até 2030, a previsão é de 240 km de linhas H₂, 11.000 caminhões de pilha a combustível, 200 estações de abastecimento de H₂, 1.000 coletores de resíduos de célula de combustível e 3.800 ônibus de célula de combustível, além de eletrólise de até 3 GW.

A mudança estrutural na área de mineração da Renânia oferece oportunidades para a implementação do plano e os municípios estão planejando vários projetos H₂.

O financiamento é realizado através de instrumentos nacionais, assim como da ajuda estrutural e financiamento estatal (FEDER, Progres). É importante ressaltar que, às vezes, as estratégias podem não ser tão completas, mesmo com algum tipo de financiamento específico, e a realização dos planos pode ser dificultada.

Até 2025, o plano prevê a produção de hidrogênio em usinas de grande porte, caminhões a biocombustível, 80 estações de abastecimento e mais de 500 ônibus movidos a hidrogênio.

Esses valores geram otimismo no mercado, pois indicam uma estimativa do governo em relação à demanda futura de caminhões e ônibus movidos a hidrogênio. Isso ajuda a reduzir as incertezas e estimula o desenvolvimento de tecnologias para esse tipo de veículo.

Além disso, a estratégia inclui planos para a mudança estrutural na área de mineração da Renânia e projetos em municípios para a implementação do uso de hidrogênio. O financiamento para essas

iniciativas vem de instrumentos nacionais e ajuda estrutural, além de financiamento estatal.

No Brasil, a estratégia para o hidrogênio é aproveitar ao máximo os recursos energéticos disponíveis.

O programa nacional de hidrogênio não irá descartar nenhuma rota tecnológica e deixará o mercado decidir qual a melhor opção, seja um hidrogênio mais caro obtido através de fontes renováveis, ou um hidrogênio mais barato produzido pelo hidrogênio azul.



Figura 71: Fonte: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnH2/HidrogênioRelatríodiretrizes.pdf>

Essa transição será gradual, utilizando todas as fontes primárias disponíveis no país, desde resíduos até fontes renováveis e fósseis. Mesmo que o hidrogênio seja inicialmente produzido a partir de fontes fósseis, ele irá garantir a construção da infraestrutura para depois produzir hidrogênio a partir de fontes renováveis, reduzindo os custos indiretos produzidos pela indústria fóssil.

Essa é a lógica por trás da estratégia brasileira para o Hidrogênio Verde, que não terá um tratamento tecnológico específico e irá aproveitar todo o potencial energético do país.

No contexto brasileiro, há uma atenção especial para a possibilidade de reforma do biogás ou produção de hidrogênio a partir de resíduos com captura de carbono, o que proporcionará ao Brasil vantagem no mercado de crédito de carbono internacional. Além disso, o programa tem um foco no gerenciamento da água utilizada na produção de hidrogênio, que está sendo estudado pela Agência Nacional das Águas.

Outro ponto importante é a infraestrutura necessária para o uso do hidrogênio na rede de gasodutos de gás natural e no setor de transporte, principalmente no transporte de carga pesada em longa distância.

Também não se descarta o uso de hidrogênio no refino do petróleo. O Brasil tem muitos recursos energéticos disponíveis, sejam fósseis, de resíduos de biomassa ou de eletricidade renovável, além de uma rede interligada que facilita o processo de eletrólise em diversos locais do país.

O país já teve outras transições energéticas, como no setor de transporte com o uso do etanol, e sabe estabelecer políticas de incentivo para o setor.

As especificidades do setor de energia de cada país são determinantes para a elaboração das estratégias de uso do hidrogênio, inclusive se o país será um importador ou exportador. A maioria dos países está focada nos benefícios do desenvolvimento tecnológico e, em seguida, na descarbonização.

É importante lembrar que a descarbonização é um objetivo de longo prazo e não pode ser alcançado de forma imediata. Cada país deve adotar a abordagem que melhor se adequa a suas necessidades e especificidades, buscando sempre o equilíbrio entre a sustentabilidade e o desenvolvimento.

5. Considerações Finais

Esperamos que esse livro tenha sido uma introdução ao mundo do hidrogênio, particularmente às “*Economia do hidrogênio e os significados dos termos PT-X*”.

Em resumo, vimos a importância da observação crítica sobre as energias renováveis na transição energética, em especial com o H₂Verde. Em especial:

- A cadeia de valor do H₂: upstream, midstream e downstream;
- Os principais atores do mercado do H₂ no mundo;
- O potencial dos e-combustíveis derivados do hidrogênio; o significado;
- Uso das aplicações (X) do hidrogênio energético (Power);
- Custos comparativos entre a cadeia (da extração ao consumo) de combustíveis fósseis e cadeia de e-combustíveis.

Recomendamos a leitura dos próximos livros, para entender detalhes de todos os aspectos envolvidos na implementação eficaz e eficiente do hidrogênio verde.

6. Referências

Livros:

STERNER, M., & STADLER, I. (Eds.). (2019). Handbook of energy storage: Demand, technologies, integration. Springer.

AZZARO-PANTEL, C. (Ed.) (2018) Hydrogen supply chain: Design, deployment and operation, Elsevier.

Scientific publications:

Power-to-X (P2X) technology. Daiyan et al., ACS Energy Lett. 2020, 5, 3843-47

OOLIE, J. A. et al. Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgys, Int. Journal of Hydrogen Energy, 2021.

VIKTORSSON L, HEINONEN J, SKULASON J, UNNTHORSSON R. A step towards the hydrogen economy: a life cycle cost analysis of a hydrogen refueling station, Energies, 2017.

NNABUIFE, S.G. et al. Present and Projected Developments in Hydrogen Production: A Technological Review, Carbon Capture Science & Technology, v.3, 2022.

PEREZ, R.J.E. Analysis of the levelized cost of green hydrogen production for very heavy vehicles in New Zealand. Master of Science by Thesis in Electronics and Computer Systems, Victoria University of Wellington, 2020.

Recursos online:

Sector coupling: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/sector-coupling-shaping-integrated-renewable-power-system>

Power-to-X:

<https://as-schneider.blog/2022/03/02/what-are-power-to-x-solutions/>

<https://www.H2-international.com/2019/06/03/what-exactly-is-power-to-x/>

Power-to-X videos:

<https://www.youtube.com/watch?v=AygLAlTN9Io>

<https://www.bmv.de/media/what-is-power-to-x-technology-explained-in-simple-terms>

<https://irena.org/publications/2022/Jul/Global-Hydrogen-Trade-Outlook>

<https://irena.org/publications/2022/May/Global-hydrogen-trade-Cost>

https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_Hydrogen_Demand_And_Cost_Dynamics_-_September_2021.pdf

Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. 2020.

https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6#:~:text=The%20electrolyser%20investment%20cost%20for,Based%20on%20IRENA%20analysis.

H2BRASIL



www.quali-a.com/h2brasil

