

Câmara dos Deputados
Comissão Especial da Transição Energética e Produção de
Hidrogênio
1ª Audiência Pública – Panorama da Produção e Consumo de
Hidrogênio Sustentável
Presidente – Deputado Arnaldo Jardim

Características e aplicações do Hidrogênio

Profa. Dra. Regina Mambeli Barros

Professora Titular da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

*Pesquisadora do Centro de Hidrogênio Verde (CH2V,
UNIFEI/FAPEPE/GIZ)*

27/06/2023



UNIFEI
Universidade Federal de Itajubá

giz

Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



FAPEPE



CH2V

CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE

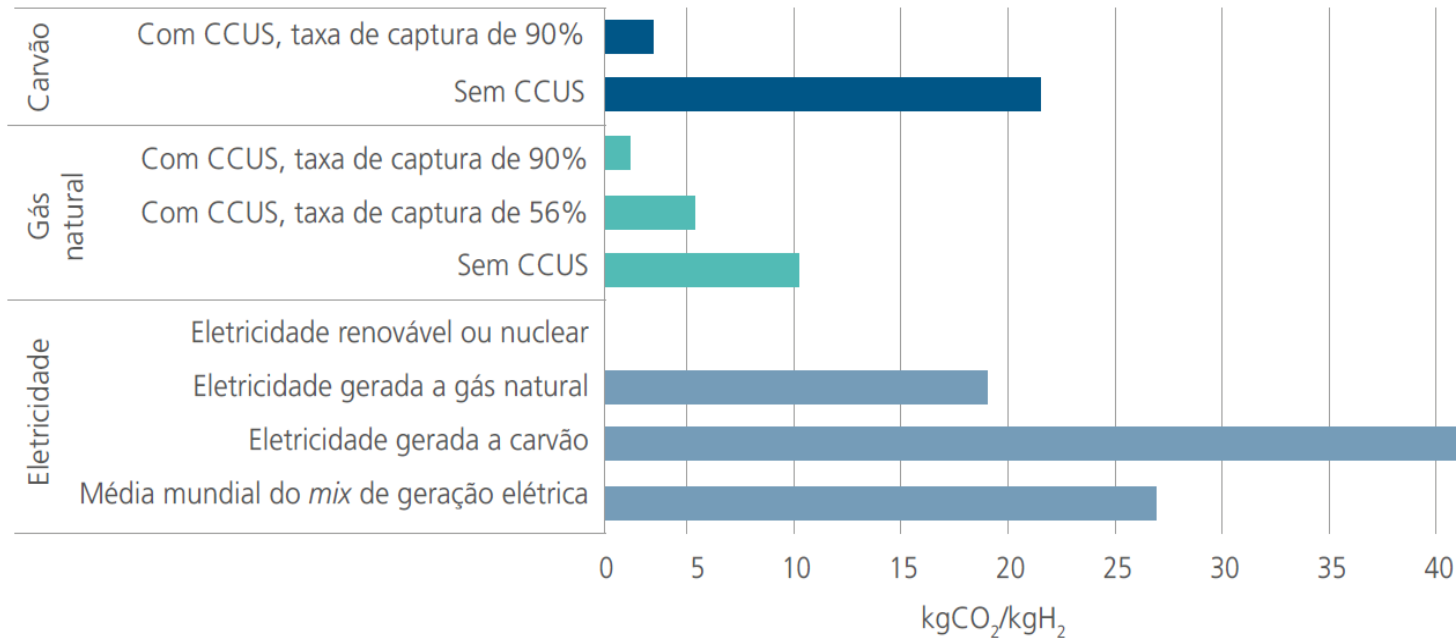
Hidrogênio

O hidrogênio pode ser usado em dispositivos de combustão ou células de combustível para beneficiar usos domésticos, transporte, geração de eletricidade e aplicações industriais (Salehi et al., 2022).

- O hidrogênio pode ser usado como um **portador de energia química**, composto de **moléculas e não apenas elétrons**, o que **facilita o armazenamento e o transporte de forma estável e similar** a outras fontes tais como o **petróleo, carvão, biomassa e gás natural** (GIZ, 2021)
- Globalmente, hoje, o hidrogênio é uma *commodity* estrategicamente importante, **tanto como matéria-prima primária para as indústrias de refino, fertilizantes e produtos químicos** quanto como **subproduto de outros processos industriais** (WEC, 2018)
- Pegada de carbono: métodos de produção - hidrogênio marrom, cinza, azul e verde. Há também classificações de hidrogênio rosa e turquesa, embora as convenções de nomenclatura possam variar entre os países e ao longo do tempo.



Hidrogênio



Fonte: IEA (2019).

Figura - Intensidade de emissão de CO₂ na produção de hidrogênio.

Fonte: IEA (2019 apud BNDES, 2022)

Conquanto se suponha que a produção de hidrogênio a partir de eletricidade renovável via eletrólise acarrete emissões zero, atingir níveis baixos de emissão utilizando eletricidade da rede é uma função da intensidade das emissões da rede (IEA, 2023)



- Conforme o organismo de certificação e inspeção alemão TÜV SÜD (2021 apud GIZ, 2021):
 - *Power-to-X* (PtX ou P2X) todos os processos que transformam eletricidade renovável em fontes de energia química para armazenamento de eletricidade, combustíveis à base de eletricidade para mobilidade ou matérias-primas para a indústria química
 - Power-to-Gas; power-to-Mobility; Power-to-Ammonia; Power-to-Fuel (GIZ, 2021)

Figura 1: Sete papéis do hidrogênio para possibilitar a Grande Transição. Fonte: traduzido de Hydrogen Council (2017 apud WEC, 2018)



UNIFEI

Universidade Federal de Itajubá

giz

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



APEPE



CH2V

CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE

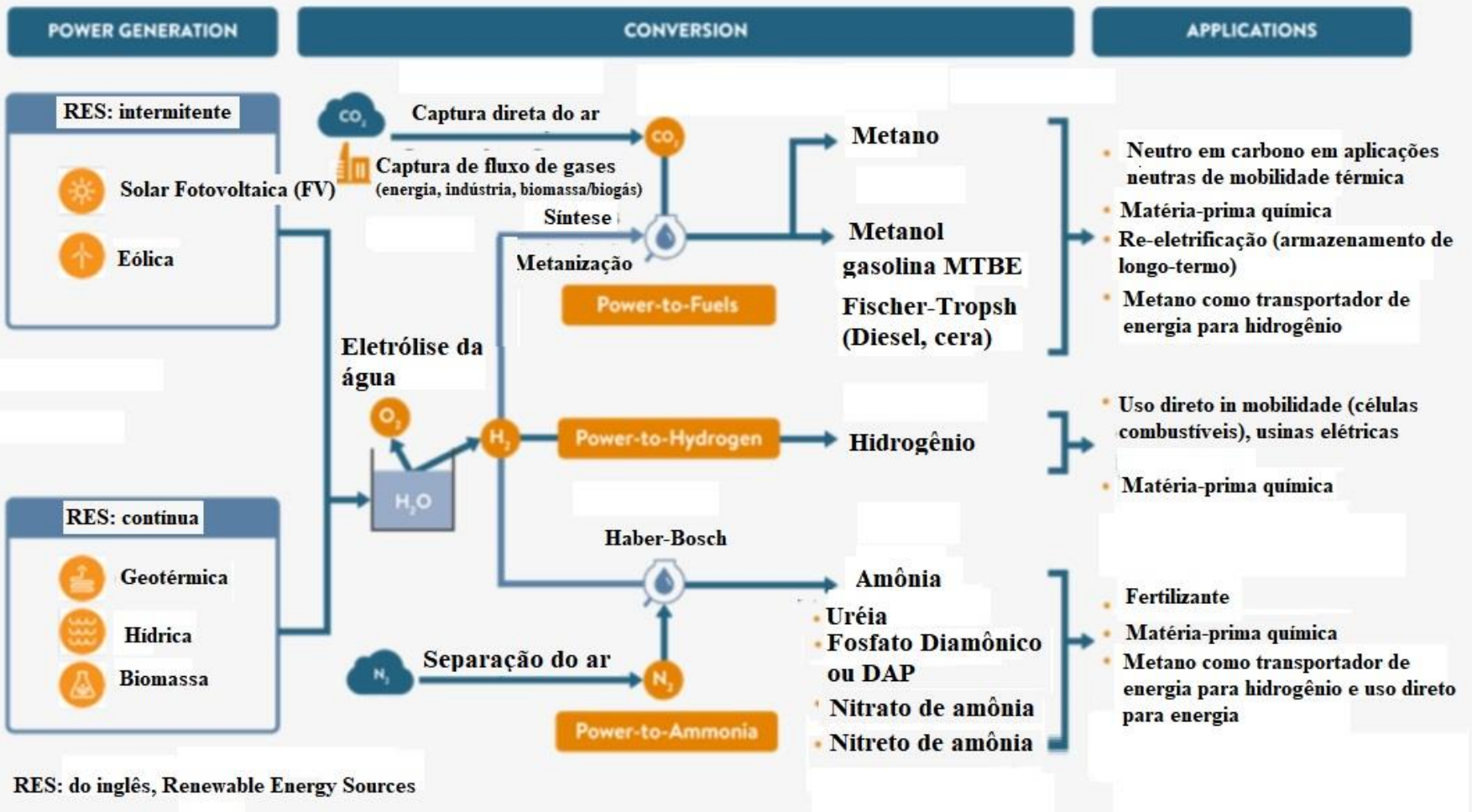


Figura 2: Conversão de energia renovável em várias formas de transportadores de energia química. Fonte: Hydrogen an Enabler of the Grand Transition, 2018 Future Energy Leaders of the World Energy Council (Hydrogen Taskforce); World Energy Council, Innovations Insights Brief, New Hydrogen Economy – Hype or Hopeapud WEC, 2018)



UNIFEI
Universidade Federal de Itajubá



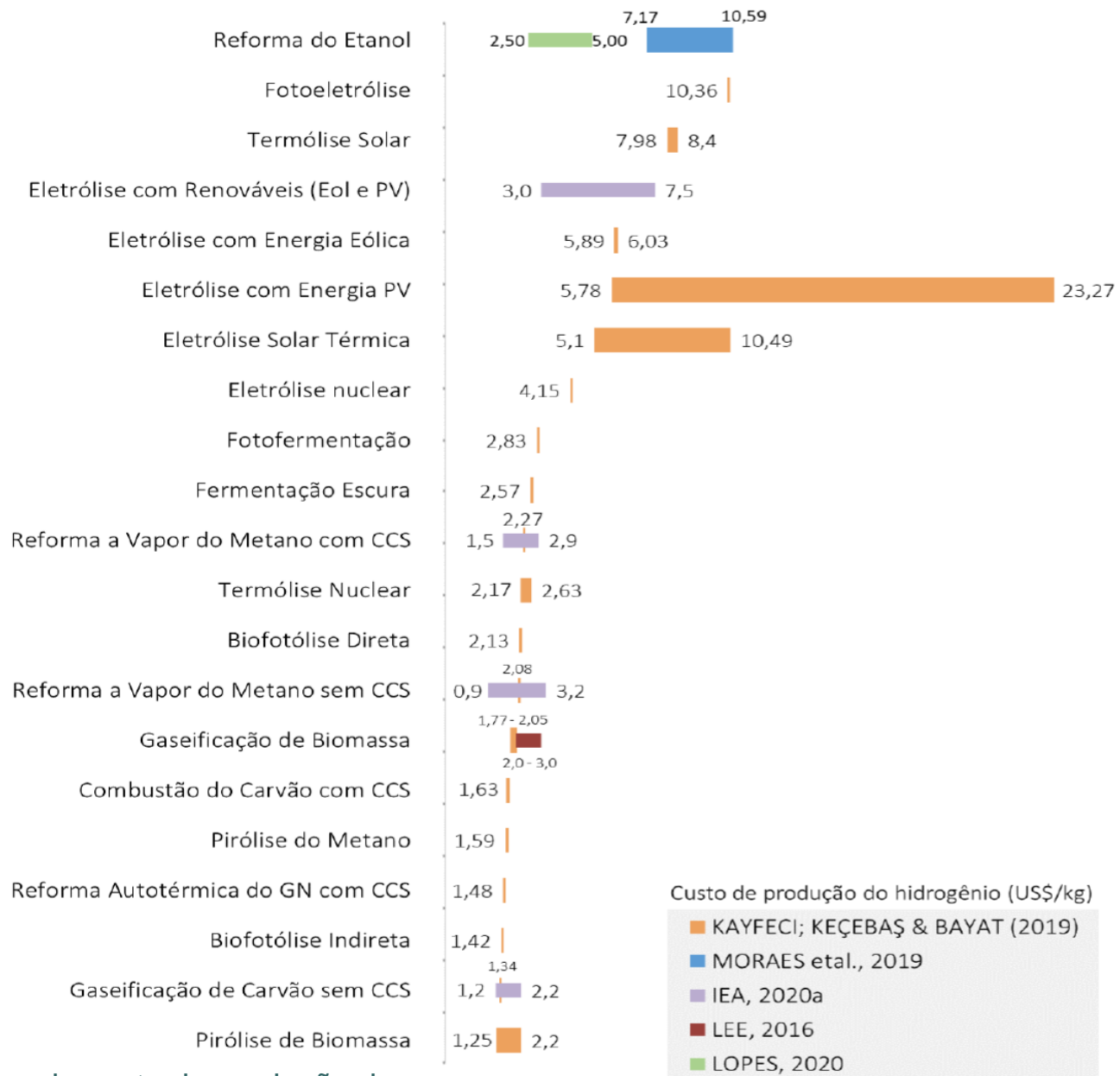


Figura 3: Faixas de custo de produção de hidrogênio, e elaborado a partir de KAYFECI; KEÇEBAŞ & BAYAT (2019); IEA (2020a); LEE (2016) apud EPE (2021)





Há uma expectativa, conforme IRENA (2019 apud EPE, 2021) de que o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis possa se tornar competitivo, relativamente ao hidrogênio de origem fóssil, antes de 2025, para os melhores casos e em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040

Figura 4: Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio
 Fonte: IRENA (2019 apud EPE, 2021)

Algumas características do hidrogênio

- A combustão de 1m^3 de hidrogênio produz 12,7 MJ de energia, um potencial energético muito alto, embora inferior ao do metano (40 MJ) (Zivar et al., 2021):
 - a produção de uma unidade de hidrogênio é maior que a energia produzida pelo hidrogênio
 - fácil conversão em eletricidade ou calor torna o hidrogênio um transportador de energia eficiente por causa de suas capacidades de transporte ou armazenamento de energia
 - perda durante o transporte de energia é muito menor se usar um transportador gasoso ($<0,1\%$) em comparação com o uso da rede elétrica (8%)
 - o hidrogênio, como fonte de energia, pode ser considerado um substituto eficiente do gás natural (cerca de 60%), devido ao seu alto potencial energético
 - Armazenamento de hidrogênio é, portanto, o armazenamento de energia



UNIFEI
Universidade Federal de Itajubá

giz
Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE

Algumas características do Hidrogênio

MCI

- **Combustível potencial para Motores de Combustão Interna (MCIs)**, quando usado tanto como combustível adicional quanto como combustível puro, por suas propriedades favoráveis (Duan et al., 2023; Zhang et al., 2023; Liang et al., 2019):
 - **alta velocidade de combustão, amplo limite de inflamabilidade, baixa energia de ignição (0,017 MJ) e emissões sem carbono**
 - **alto coeficiente de difusão (0,61 cm²/s), ampla faixa de combustão (taxa de volume de 4% a 75%), grande potencial para explosão de combustível; faixa de explosão (taxa de volume de 11% a 59%) e rápida propagação de chamas poderia causar problemas de segurança que não podem ser ignorados no uso prático**
- **Uso de hidrogênio em motores a gasolina ou diesel: redução do teor de carbono nos combustíveis, aumentando a eficiência térmica e reduzindo as emissões de CO₂;**

Tabela 1 - Propriedades físicas do hidrogênio e metano. Fonte: traduzido de Zilvar et al. (2021) e Salehi et al. (2022)

Para o hidrogênio inflamar, dois elementos adicionais necessitam estar presentes: um oxidante, a exemplo do ar e uma fonte de ignição.

Cada um dos fatores necessários para combustão, isto é, um combustível, um oxidante e uma fonte de ignição, pode ser representado em um dos 2

A **ABNT ISO/TR 15916 de 04/2010- Considerações básicas para a segurança dos sistemas de hidrogênio** fornece diretrizes para a utilização do hidrogênio em suas formas gasosa e líquida (ADNORMAS, 2022)

No momento, as pressões de retenção de 35 MPa estão sendo usadas em veículos com célula a combustível. As tecnologias para pressões de armazenamento superiores e de até 70 MPa, usando materiais compostos, estão sendo desenvolvidas (ADNORMAS, 2022)

A ISO 14687:1999/Cor 1:2001 foi publicada visando à especificação das características de qualidade do combustível de hidrogênio para garantir uniformidade de produtos de combustível de hidrogênio produzidos para aplicações veiculares, aparelhos ou outras aplicações de reabastecimento (ADNORMAS, 2022).

Tal especificação classifica o combustível de hidrogênio conforme os 3 tipos de hidrogênio, I (gasoso), II (líquido) e III (pastoso). Por sua vez, o tipo I é dividido em

Graus, que especificam níveis crescentes de pureza, quais sejam A, B e C. O transporte de hidrogênio se o hidrogênio de alta pressão for repentinamente liberado nas tubulações a jusante, e a presença de obstáculos dentro da tubulação pode afetar o mecanismo de ignição do hidrogênio de alta pressão (Li et al., 2022).



UNIFEI
Universidade Federal de Itajubá

giz

Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Algumas características do Hidrogênio MCI

- **Hidrogênio apresenta alta velocidade de combustão, fator crucial para seu uso como combustível de motores**

Outros pesquisadores realizaram pesquisas de simulação sobre vazamento de hidrogênio de veículos com célula de combustível de hidrogênio (Li et al., 2022), e navios com célula de combustível de hidrogênio (Li et al., 2018; Mao et al., 2021), assim como o processo de vazamento de gás natural em túneis utilitários (Bu et al., 2021a) e dutos enterrados (Bu et al., 2021b).

Por exemplo, uma célula de combustível de hidrogênio tem muitas vantagens, como nenhuma poluição, alta eficiência, baixo ruído e operação contínua (Li et al., 2018). No caso do artigo de Li et al. (2018), os resultados da simulação determinaram as posições ideais para os sensores de hidrogênio e ventilações e os autores esperam que esses resultados possam fornecer orientação para o projeto de um navio com célula de combustível que usa hidrogênio gasoso de alta pressão.

Em veículos, vazamentos de orifícios em pressões de fonte moderadas podem produzir concentrações de hidrogênio inaceitavelmente altas em veículos.



UNIFEI

Universidade Federal de Itajubá

giz

Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



CH2V

CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE

Transporte em dutos

Vantagens do Hidrogênio: comporta-se como **armazenamento intermediário de energia**, o que torna o hidrogênio o **mais promissor portador de energia limpa nos últimos anos**

Questões a considerar (classificação dos dutos de gás natural), Zhang et al. (2023):

- os tamanhos de **vazamento de dutos de hidrogênio** são divididos em **pinhole, furo e ruptura**.
- **Pinhole - diâmetro efetivo do furo é ≤ 2 cm, vazamento comum** para tubulações causadas por **corrosão, interferência externa, falha de material** e assim por diante
- **difíceis de detectar** e apresentam **riscos potenciais**, como a formação de **jatos de fogo**, e, portanto, tanto acadêmicos quanto engenheiros precisam prestar atenção extra a essa situação

Li et al. (2022) simularam vazamento de recipientes fechados com **diferentes proporções de concentração de metano para hidrogênio**.

- **baixa proporção de hidrogênio (20% e abaixo)**, o vazamento e a difusão de misturas de **metano-hidrogênio** são mais próximos do **metano puro**, e o armazenamento e o transporte são mais seguros nessa proporção de metano-para-hidrogênio.



UNIFEI

Universidade Federal de Itajubá

giz

Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



CH2V

CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE

Muito obrigado pela atenção! Dúvidas?

Profa. Dra. Regina Mambeli Barros

Professora Titular da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Pesquisadora do Centro de Hidrogênio Verde (CH2V,
UNIFEI/FAPEPE/GIZ)

mambeli@unifei.edu.br



UNIFEI

Universidade Federal de Itajubá

giz

Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



CH2V

CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE

Referências Bibliográficas

- ADNORMAS. Os riscos de segurança para a utilização do hidrogênio gasoso e líquido. Normalização. Revsita ADNORMAS. ABNT, 22/11/2022.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa. 2022. Disponível em: www.bndes.gov.br/bibliotecadigital
- Bu, F.X.; Liu, Y.; Wang, Z.X.; Xu, Z.; Chen, S.Q.; Hao, G.W.; Guan, B. Analysis of natural gas leakage diffusion characteristics and prediction of invasion distance in utility tunnels, *Nat Gas Sci Eng*, Vol. 96, 2021a, p. 104270
- Bu, F.X.; Liu, Y.; Liu, Y.B.; Xu, Z.; Chen, S.Q.; Jiang, M.H.; Guan, B. Leakage diffusion characteristics and harmful boundary analysis of buried natural gas pipeline under multiple working conditions, *J Nat Gas Sci Eng*, Vol. 94, 2021b, p. 104047
- Duan, Yong-hui; Sun, Bai-gang; Li, Qian; Wu, Xue-song; Hu, Tie-gang; Luo, Qing-he. Combustion characteristics of a turbocharged direct-injection hydrogen engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 291, 2023, 117267, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117267>
- Ekoto, Isaac W.; Merilo, Erik G.; Dedrick, Daniel E.; Groethe, Mark A. Performance-based testing for hydrogen leakage into passenger vehicle compartments, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, n. 16, 2011, p. 10169-10178, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.007>
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. A Transição da Geração no Setor Elétrico Brasileiro Matriz Elétrica Brasileira? Como evoluiu o uso das fontes térmicas para a geração de eletricidade no Brasil desde 1970? EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-660/EPEFactSheetEmissoesSetorEletrico.pdf> Acesso em 26 outubro 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Bases para Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio (Nota Técnica - No EPE-DEA-NT-003/2021 rev01), 14 de junho de 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogeno%20NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogeno%20NT%20(2).pdf)



UNIFEI
Universidade Federal de Itajubá



10-



CH2V
CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE

Referências Bibliográficas

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. GmbH. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde. GIZ, 27/10/2021. Disponível em:

https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf

Acesso em 26 outubro 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity*. IEA, April 2023.

Disponível em: <https://www.iea.org/>

Li, F.; Yuan, Y.P.; Yan, X.P.; Malekian, R.; Li, Z.X. A study on a numerical simulation of the leakage and diffusion of hydrogen in a fuel cell ship, *Renew Sustain Energy Ver*, Vol. 97, 2018, p. 177-185

Li, Hao; Cao, Xuewen; Du, Huimin; Teng, Lin; Shao, Yanbo; Bian, Jiang. Numerical simulation of leakage and diffusion distribution of natural gas and hydrogen mixtures in a closed container, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.47, n. 84, 2022, p. 35928-35939, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.142>

Li, Y.J.; Hou, X.L.; Wang, C.; Wang, Q.B.; Qi, W; Li,J.W.; Zhang, X.L. Modeling and analysis of hydrogen diffusion in an enclosed fuel cell vehicle with obstacles, *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022, p. 5745-5756

Liang, Yang; Pan, Xiangmin; Zhang, Cunman; Xie,Bin; Liu, Shaojun. The simulation and analysis of leakage and explosion at a renewable hydrogen refuelling station, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, n. 40, 2019, p. 22608-22619, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.140>

Mao, X.B.; Ying, R.S.; Yuan, Y.P.; Li, F. B.; Shen,Y. Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship, *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 46, 2021, p. 6857-6872

Salehi,Fatemeh; Abbassi,Rouzbeh; Asadnia, Mohsen; Chan, Billy; Chen, Longfei. Overview of safety practices in sustainable hydrogen economy – An Australian perspective, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, n. 81, 2022, p. 34689-34703, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.041>

Zhang, Yankang; Yang, Yilan; Wu, Fengrong; Li, Qianqian; Wang, Jinhua; Liu, Hu; Che, Defu; Huang, Zuohua. Numerical investigation on pinhole leakage and diffusion characteristics of medium-pressure buried hydrogen pipeline, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.209>

Zivar, Davood; Kumar, Sunil; Foroozesh, Jalal. Underground hydrogen storage: A comprehensive review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, n. 45, 2021, p. 23436-23462, ISSN 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138>

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). Hydrogen an Enabler of
<https://www.worldenergy.org/assets/downloads/1Hydrogen-an-0>
26 outubro 2022



UNIFEI

Universidade Federal de Itajubá



Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



APEPE



pdf. CH2V em
CENTRO DE HIDROGÊNIO VERDE