

^

# HIDROGENIO VERDE

---

Revisão bibliográfica, mercado atual e perspectivas

**Palestrante : Murilo Borges**



**01**    **Introdução**

**02**    **Revisão bibliográfica**

**03**    **Mercado atual**

**04**    **Potencial e perspectivas**

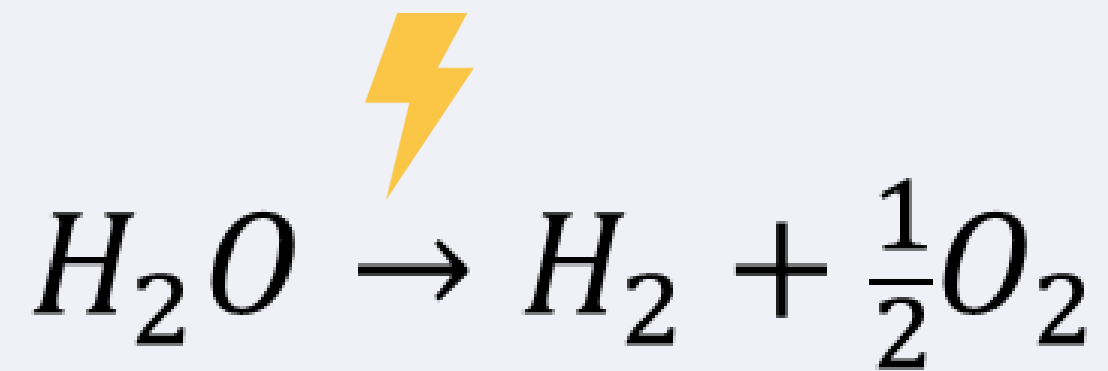
**05**    **Considerações Finais**



# INTRODUÇÃO

## ELETRÓLISE DA ÁGUA

55 kWh/kg H<sub>2</sub>\*



9 kg de água → 1 kg de H<sub>2</sub>

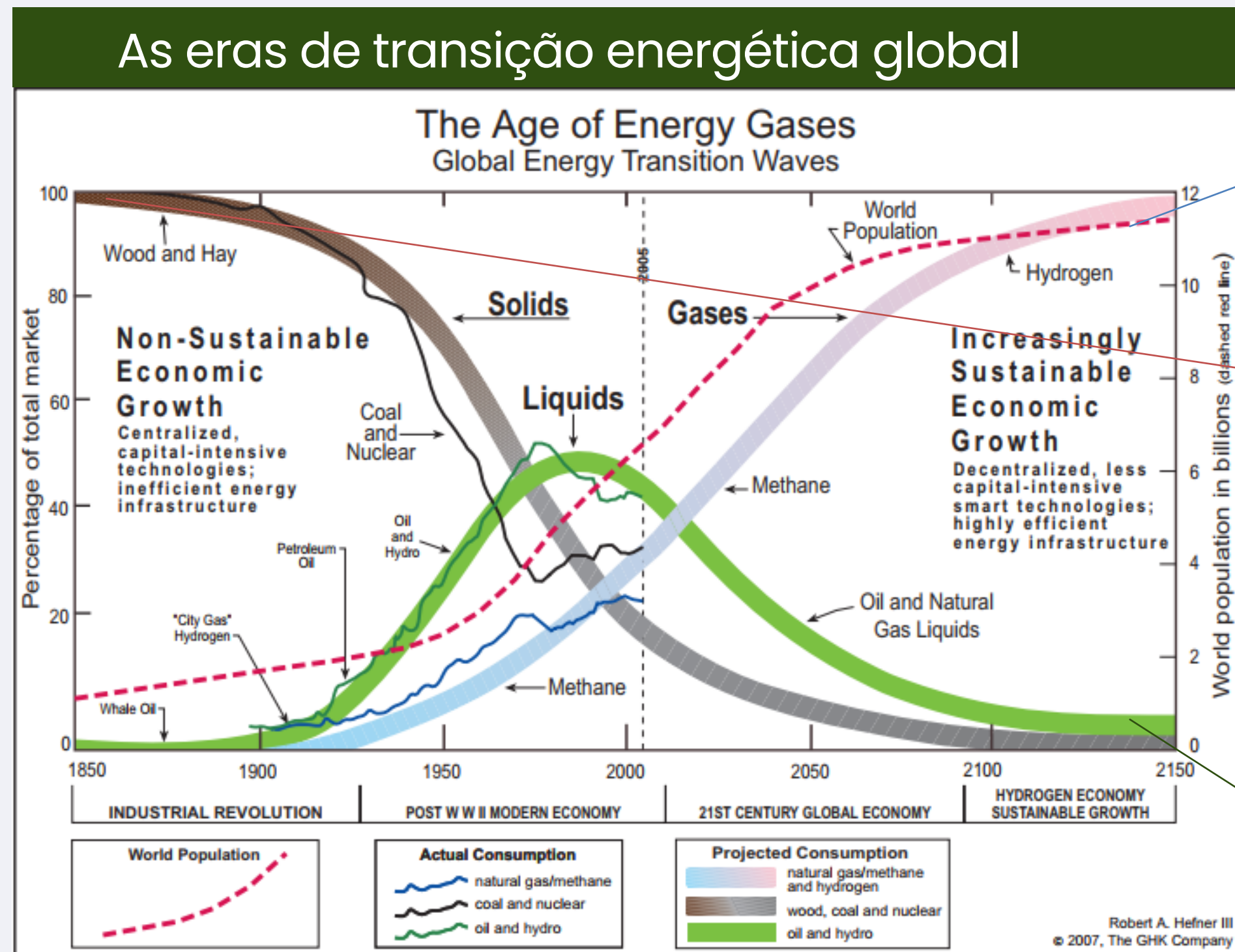
PCI do H<sub>2</sub> = 33,3 kWh/kg

SE ENERGETICAMENTE NÃO FAZ SENTIDO, POR QUE ESTAMOS FALANDO TANTO SOBRE HIDROGÊNIO VERDE?

\*Considerando a eficiência de um eletrolisador tipo SOFC (óxido sólido)

# INTRODUÇÃO

Porcentual de participação no mercado



Fonte: A Era dos Gases, Robert A. Hefner III. – 2007

Metano;  
Hidrogênio

Lenha;  
Carvão;  
Nuclear.

Petróleo;  
Diesel/gasolina;  
Hidroelétrica

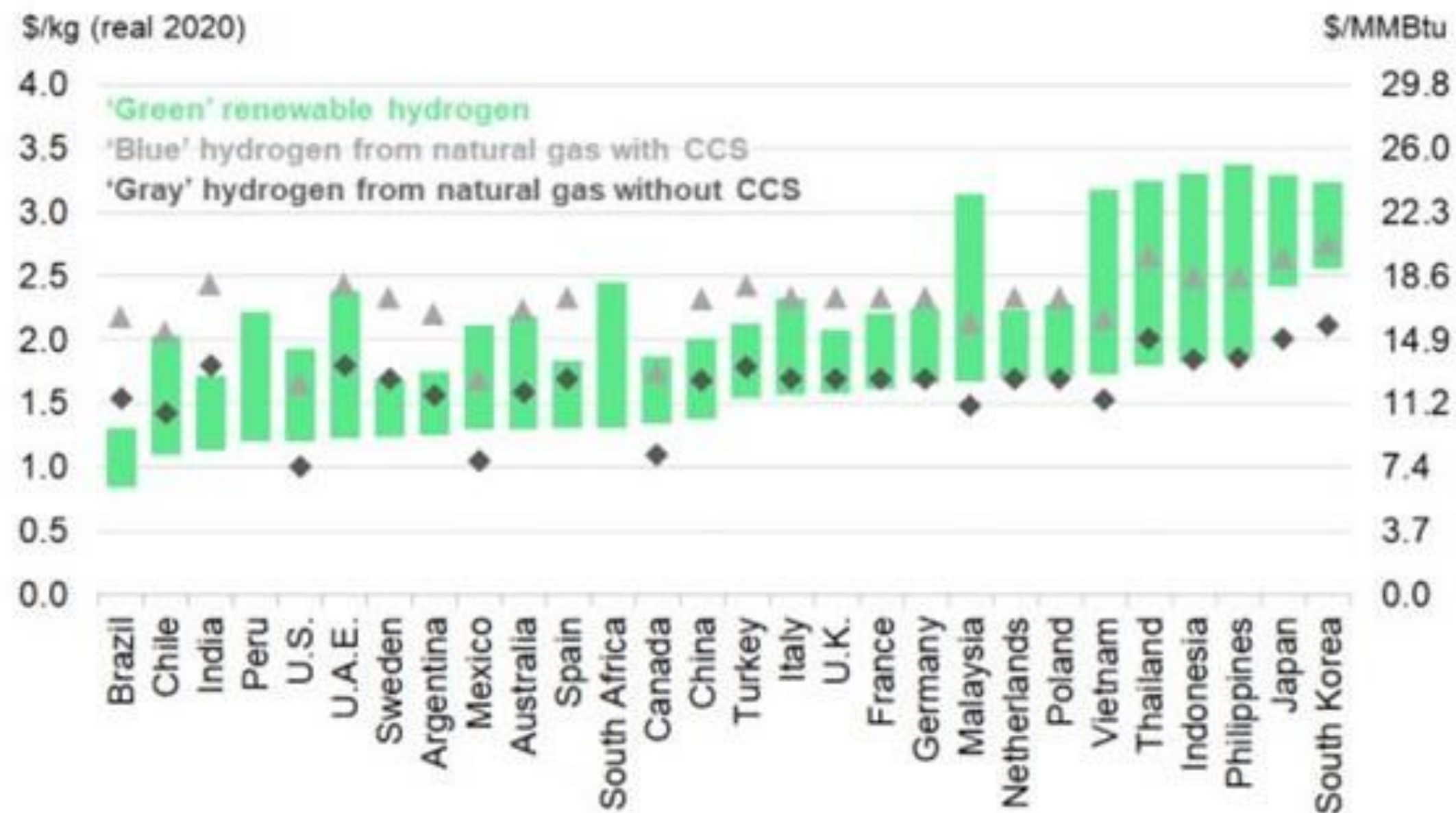
“A Idade da Pedra não acabou pela falta de pedra, e a Idade do Petróleo irá acabar muito antes que o mundo fique sem petróleo”.

Sheik Ahmed Zaki Yamani – Anos 1970.

# INTRODUÇÃO

BRASIL EM DESTAQUE COMO  
UM PROMISSOR FORNECEDOR  
DE HIDROGÊNIO VERDE  
(menores custos de produção)

'Green' versus 'blue' hydrogen costs, 2030



Source: BloombergNEF

Note: Assumes our optimistic electrolyzer cost scenario. Renewable H2 cost range reflects a diversity of electrolyzer types, from Chinese alkaline (low) to PEM (high). Assumes equal CCS costs in all countries.

Fonte: BloombergNEF

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA









## CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO

Hidrogênio **cinza** – Produzido a partir de fontes não renováveis;

Hidrogênio **azul** – Produzido a partir de fontes não renováveis, com captura, armazenamento e/ou utilização do CO<sub>2</sub> em outro processo industrial;

Hidrogênio **verde** – Produzido a partir de fontes renováveis.

Tabela 1 – Classificação de hidrogênio em escada de cores

| Cor   | Classificação       | Descrição  |
|---|---------------------|--|
|    | hidrogênio preto    | produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS   |
|    | hidrogênio marrom   | produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS  |
|    | hidrogênio cinza    | produzido do gás natural sem CCUS  |
|    | hidrogênio azul     | produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis) com CCUS                         |
|    | hidrogênio verde    | produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água.                         |
|  | hidrogênio branco   | hidrogênio natural ou geológico  |
|  | hidrogênio turquesa | produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO <sub>2</sub>  |
|  | hidrogênio musgo    | produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica |

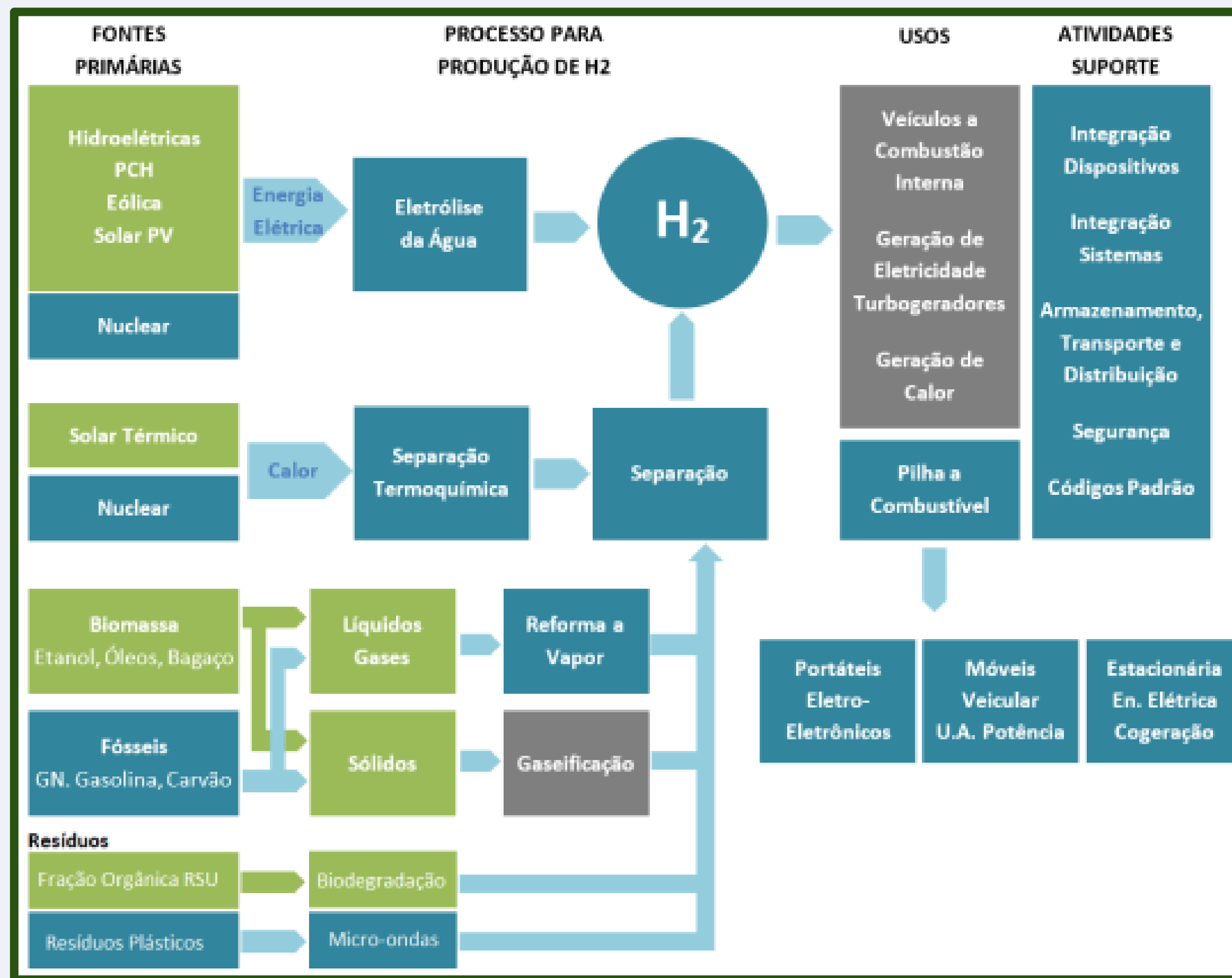
Fonte: EPE, 2021

\*CCUS – Carbon Capture, Utilization and Storage

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

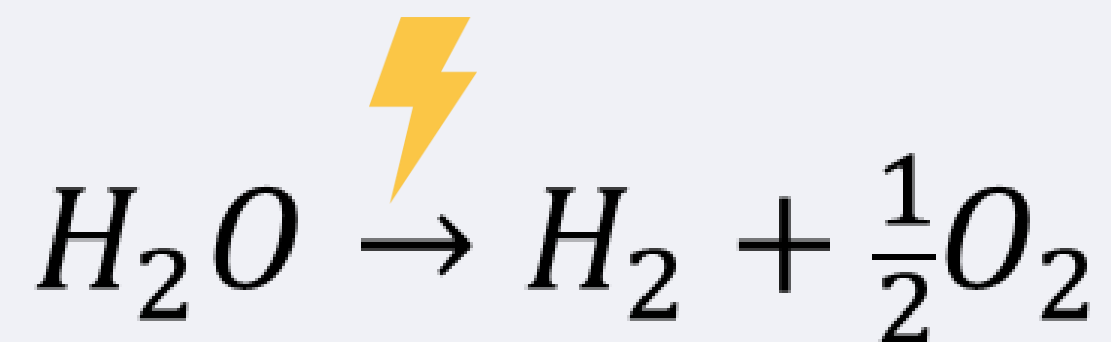
## CADEIA DO HIDROGÊNIO

O Hidrogênio é um vetor energético versátil



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## ELETRÓLISE DA ÁGUA



| Tipo de tecnologia          | Alcalina   | PEM<br>(Membrana de troca de prótons) | SOEC<br>(Óxido Sólido)              |
|-----------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Eletrólito                  | 20-40% m de KOH  | Membrana Polimérica                   | Cerâmico                            |
| Maturidade                  | Maduro   | Comercial                             | Demonstração                        |
| Consumo de energia elétrica | Maior  | Maior                                 | Menor                               |
| Custo de capital            | Menor  | Médio                                 | Maior                               |
| Principais pontos negativos | Ocupa mais espaço<br>Produz H <sub>2</sub> de menor pureza | Uso de metais nobres                  | Menor vida útil<br>Alta temperatura |

Fonte: Adaptado de Tenhumberg, 2020 . IEA, 2022.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

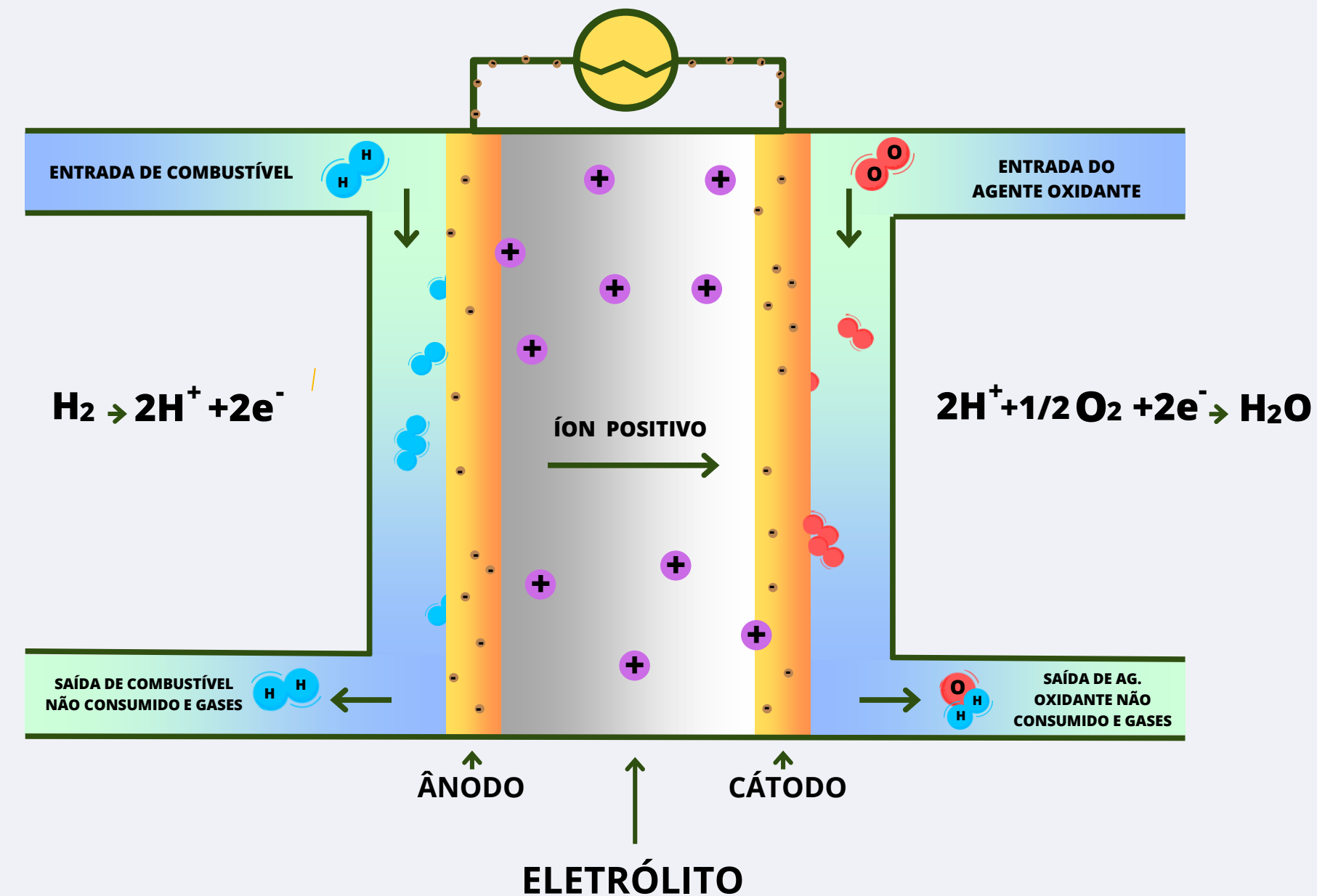
## CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

### Características dos diferentes tipos de célula a combustível

| Tipo de Célula               | Eletrólito e espécie que transporta a carga | Temperatura de operação °C | Reações  |
|------------------------------|---|----------------------------|--|
| Alcalina (AFC)               | KOH (30-50%)<br>$OH^-$                      | <100                       | $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$<br>$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ |
| Eletrólito polimérico (PEFC) | Membrana de Nafion® ( $H^+$ )               | 60-120                     | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$<br>$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$           |
| Óxido sólido (SOFC)          | $ZrO_2(O^{2-})$                             | 800-1000                   | $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$<br>$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$       |

Fonte: Adaptado de Quinelato e Junior, 2016. p. 127-144

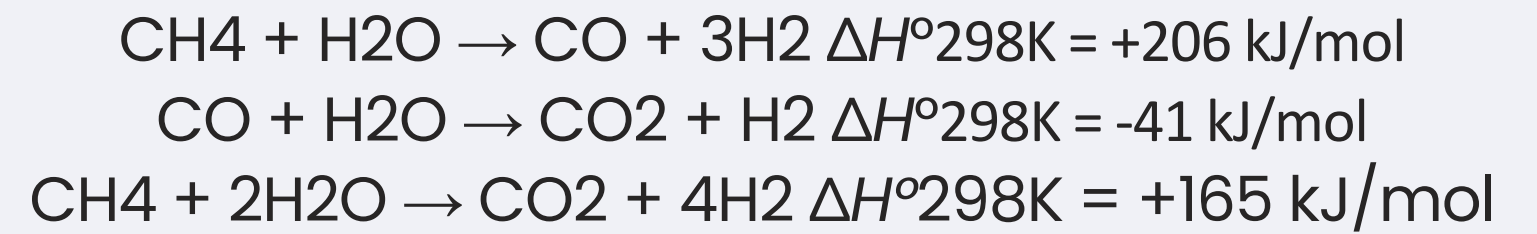
### Princípio de funcionamento



Fonte: Adaptado de Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), 2004.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

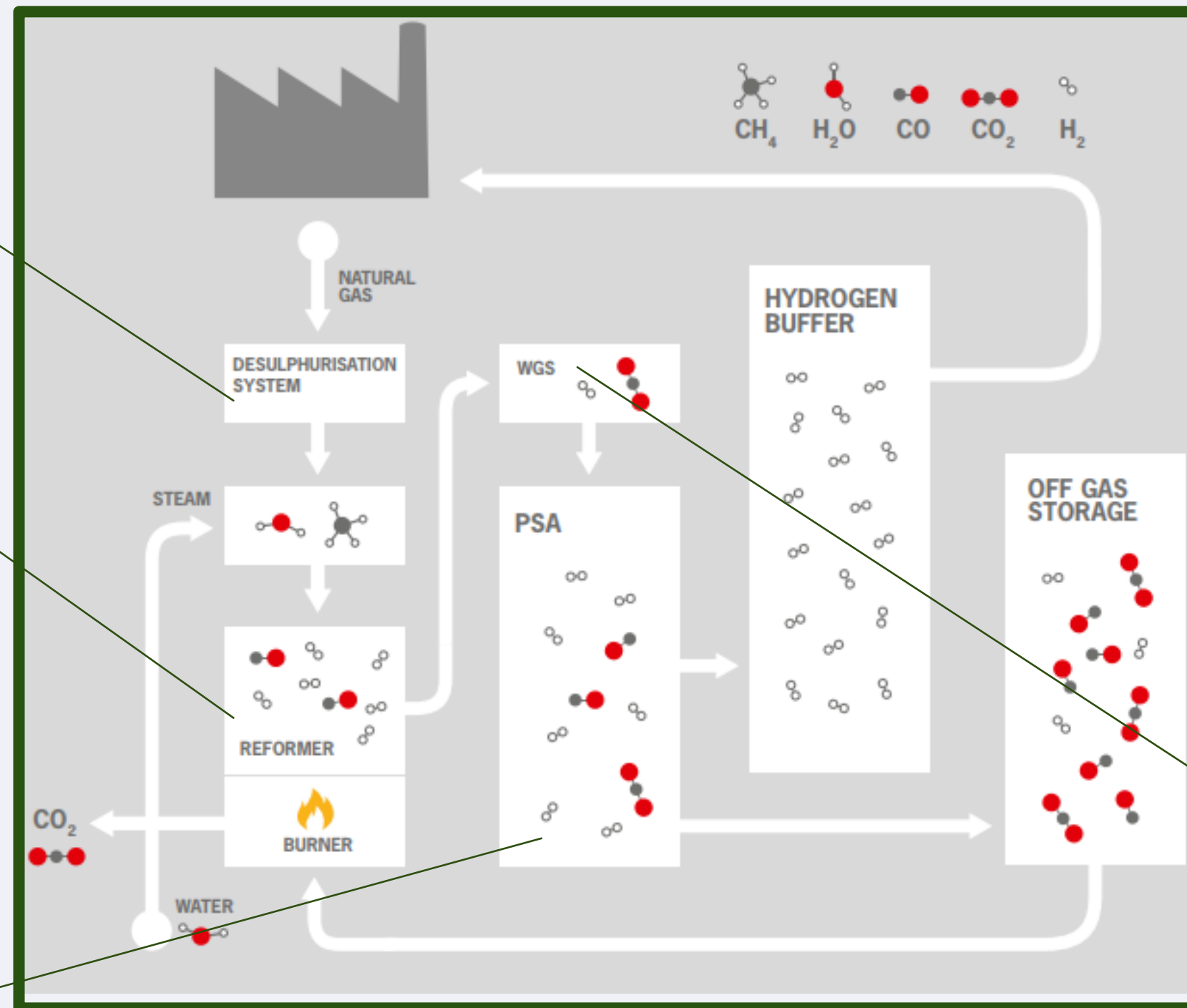
## REFORMA A VAPOR - METANO



Desulfurização

Reformador

PSA: Adsorção com variação de pressão



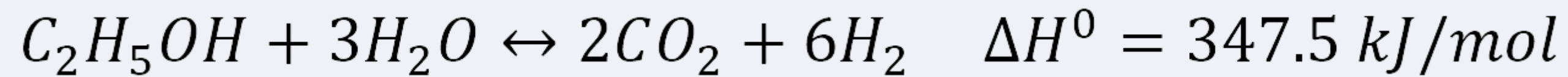
WGS – Reação de deslocamento de gás-água

Fonte: Folheto técnico da HYGEAR, Benu Engenharia., 2019.

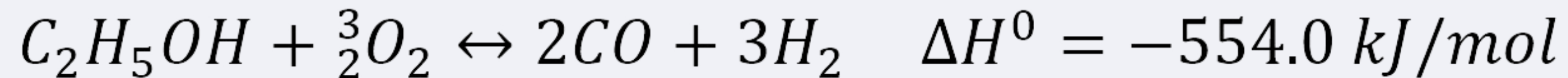
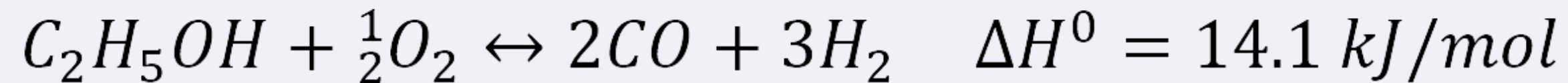
# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

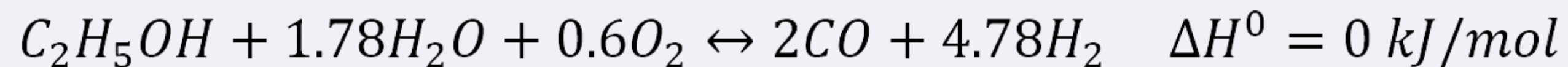
## **Reforma a Vapor do Etanol (SR)**



## **Reforma por Oxidação Parcial (POx)**

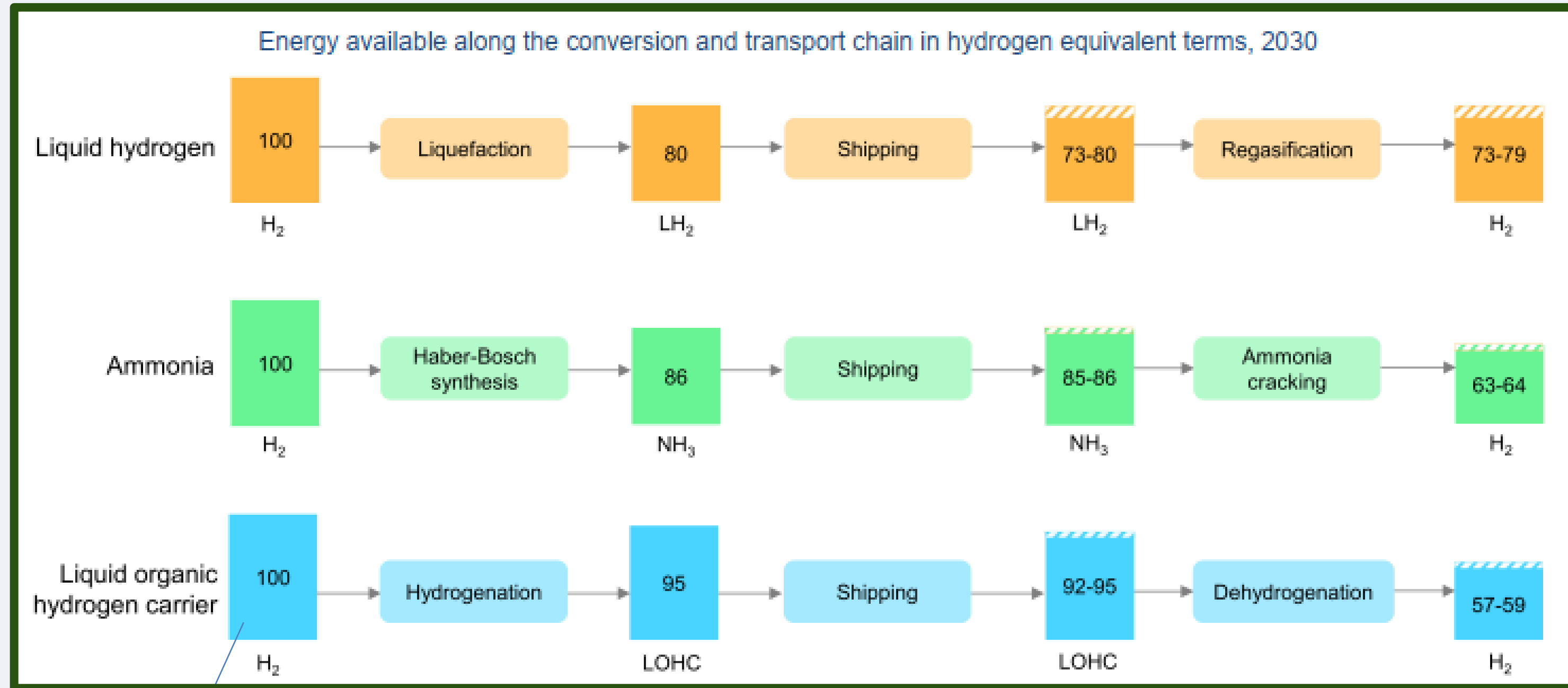


## **Reforma Autotérmica (ATR)**



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## DISTRIBUIÇÃO DE H<sub>2</sub> - DESAFIOS DE TRANSPORTE



Carregador de Hidrogênio líquido

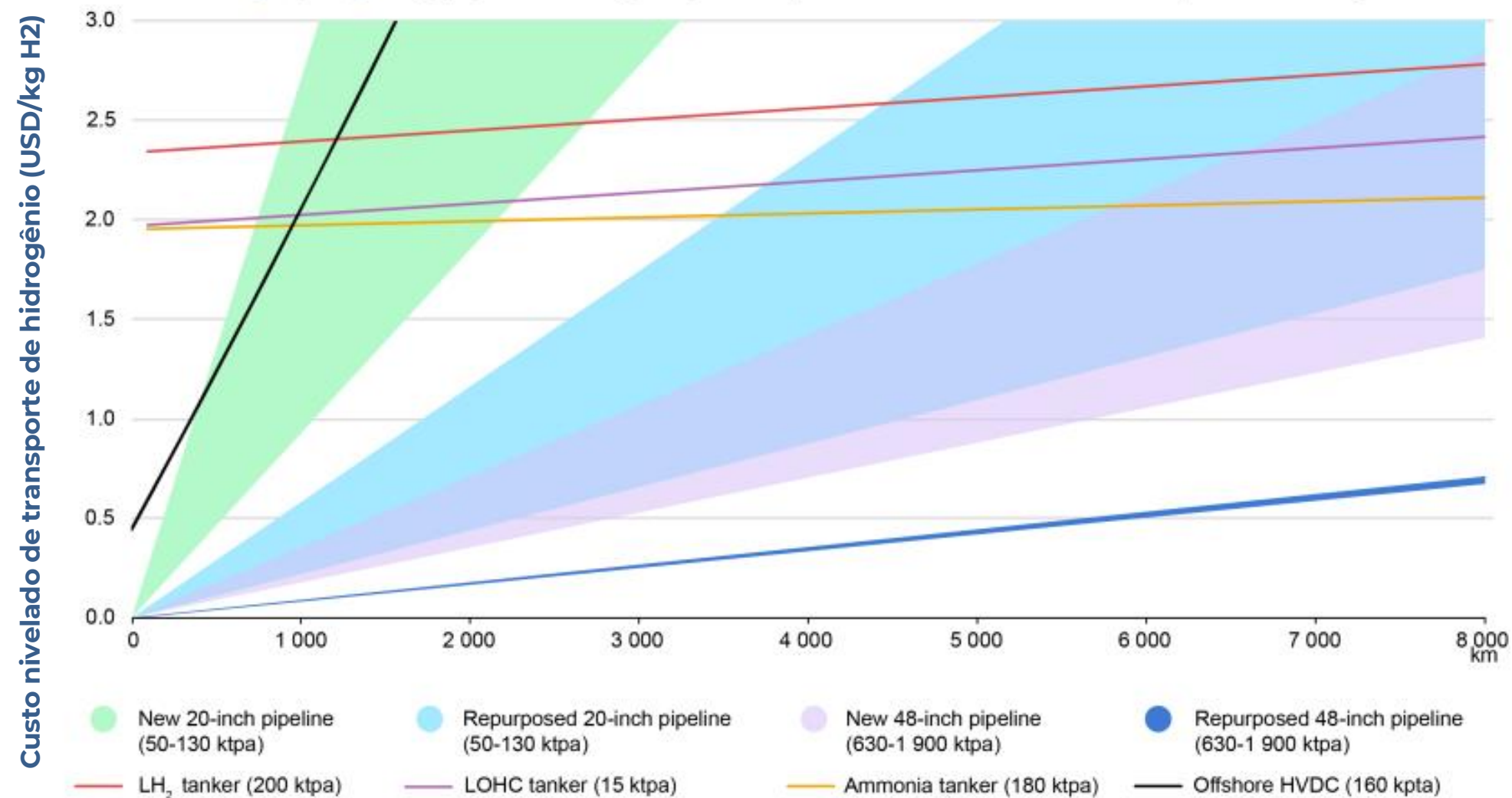
Fonte: IEA, Global Hydrogen Review 2022

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## DISTRIBUIÇÃO DE H<sub>2</sub> - DESAFIOS DE TRANSPORTE

### Cost of hydrogen delivery for various transport distances

Levelised costs of delivering hydrogen by pipeline and by ship as LH<sub>2</sub>, LOHC and ammonia carriers, and electricity transmission, 2030



IEA. All rights reserved.

Notes: ktpa = kilotonnes per year; LH<sub>2</sub> = liquefied hydrogen; LOHC = liquid organic hydrogen carrier. Includes conversion, export terminal, shipping, import terminal and reconversion costs for each carrier system (LH<sub>2</sub>, LOHC and ammonia). The import and export terminals include storage costs at the port. Pipelines refer to onshore transmission pipelines operating at ranges between 25% and 75% of their design capacity during 5 000 full load hours. Electricity transmission reflects the transmission of the electricity required to obtain 1 kg H<sub>2</sub> in an electrolyser with a 69% efficiency located at the distance represented by the x-axis.

Source: IEA analysis based on data from [Guidehouse \(2021\)](#) and [IAE \(2016\)](#).

Diante deste cenário, podemos encarar o etanol como um vetor de transporte de hidrogênio de forma descentralizada

# ESTRUTURA ATUAL

## ASPECTOS AMBIENTAIS E CERTIFICAÇÃO

A expansão do mercado do H2V está alinhada com as práticas do ESG e requer uma estrutura de certificação padronizada.

Estrutura atual:

- Empresas certificadoras, com destaque para a Europa;
- I-REC (Certificado Internacional de Energia Renovável) / REC / GO;
- Normas ISO 14067, GHG Protocol e etc.

TUV Rheinland  
(Alemanha)



Fonte: TÜV Rheinland

CERTIFHY  
(União Europeia)

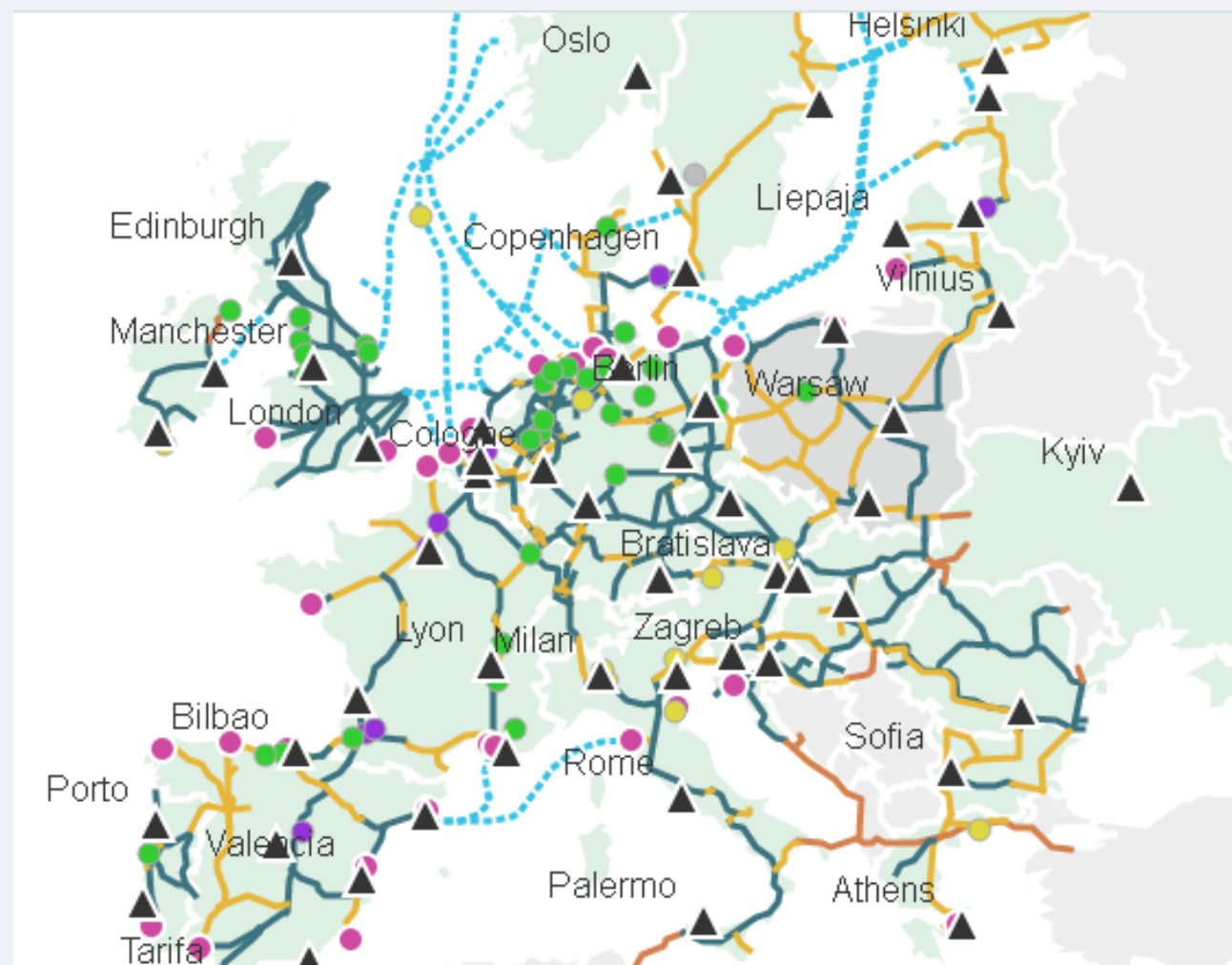


Fonte: CertifHy

# ESTRUTURA ATUAL

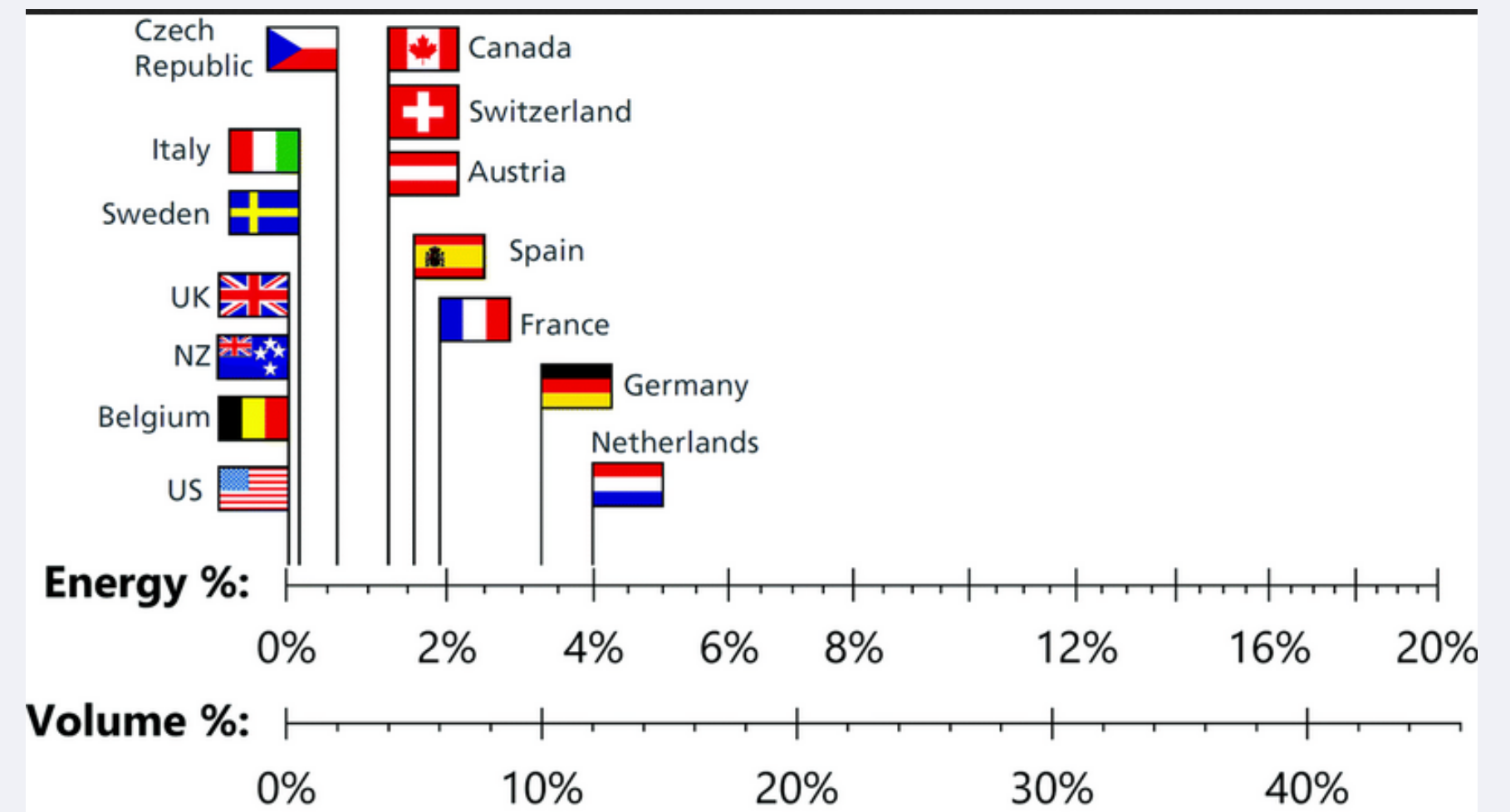
## INICIATIVAS - MERCADO INTERNACIONAL

### Consórcio European Hydrogen Backbone (EHB)



Fonte: European Hydrogen Backbone

### Volume percentual permitido de H2 na rede de gás natural de alguns países

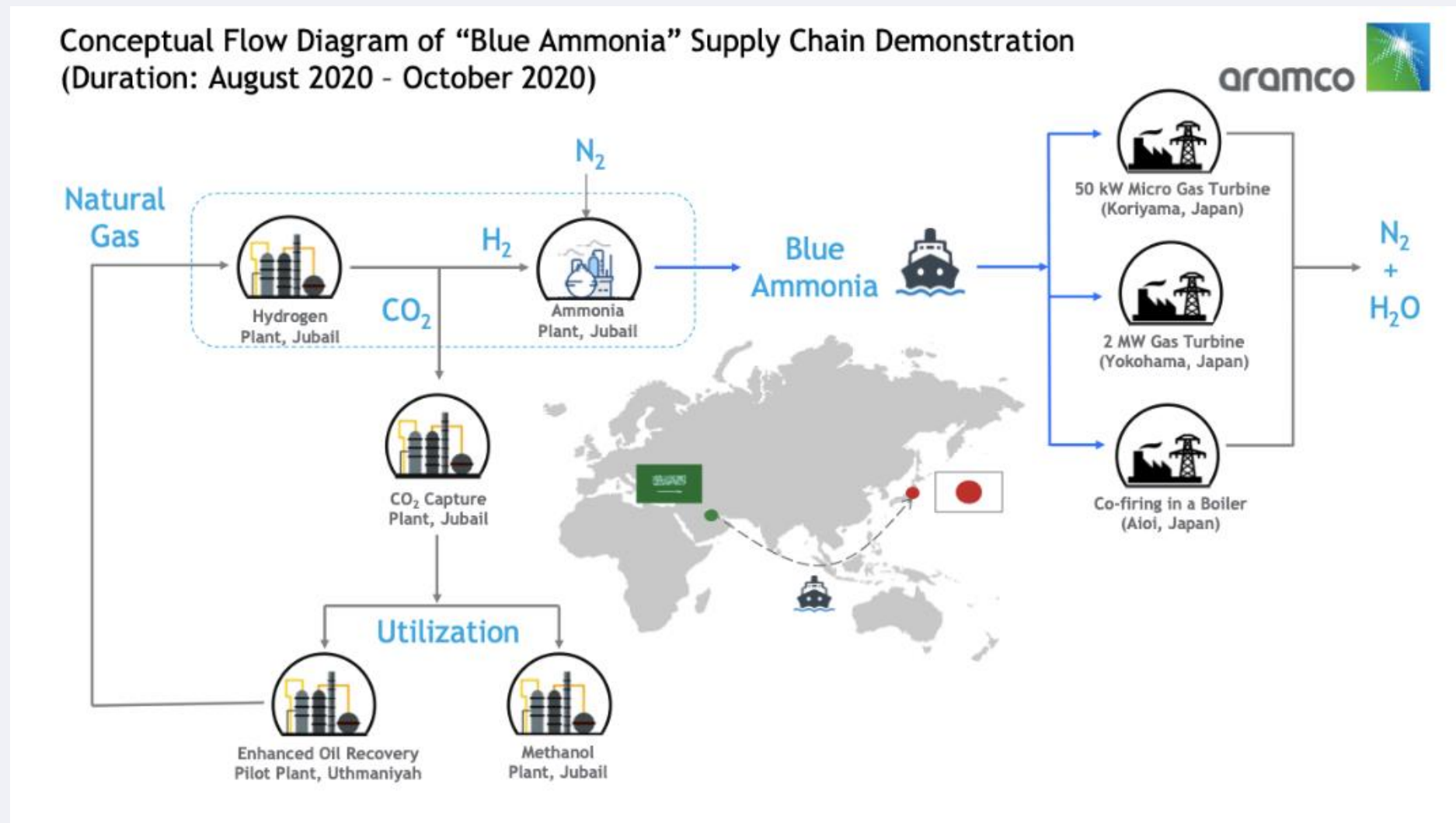


Fonte: The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, Saffell et al, 2019.

# ESTRUTURA ATUAL

## DESTAQUES INTERNACIONAIS

### Planta de amônia azul



Fonte: Arab News – Japan, 2021

### Planta amônia verde (Eletrólise – Energia solar)



Fonte: ACME group – Omã



# ESTRUTURA ATUAL

## INICIATIVAS BRASILEIRAS

Iniciativas para fomentar a economia do hidrogênio verde no Brasil, com o envolvimento do Governo Federal.



Fonte: Governo Federal, MME



Fonte: <https://cooperacaobrasil-alemanha.com>

Por meio da:



Fonte: <https://www.h2verdebrasil.com.br/>

# ESTRUTURA ATUAL

## DESTAQUES NO BRASIL

1ª certificação de H2V da América Latina:  
White Martins, Pernambuco.

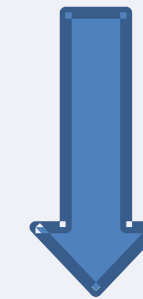
- Eletrólise da água
- Contratos de energia solar e I-REC.



Fonte: Revista RMAI, 2023

raízen

Biometano



Planta de H2  
e amônia



Fonte: Adaptado de novacana, 2021  
<https://www.novacana.com/noticias/raizen-fecha-yara-primeira-venda-biometano-longo-prazo-210921>

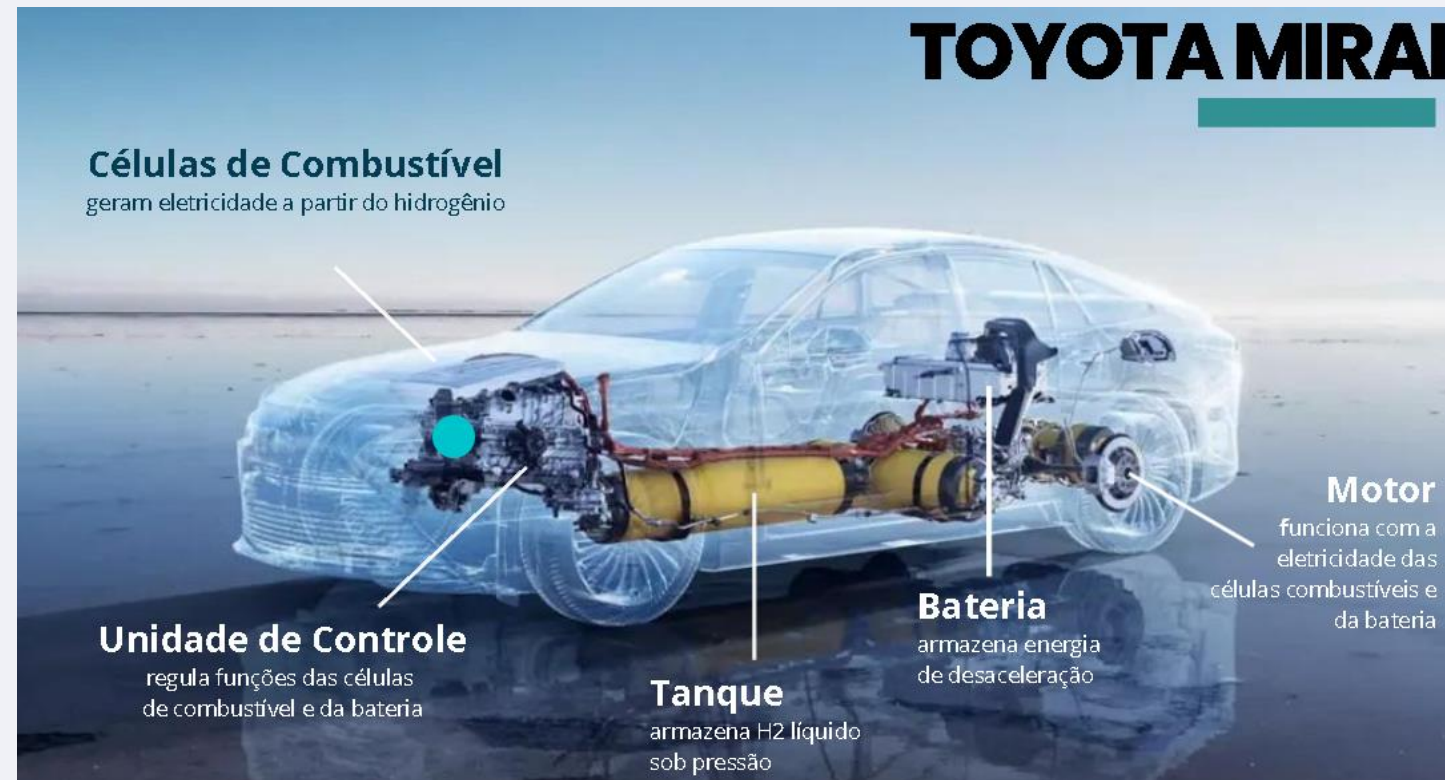
# ESTRUTURA ATUAL

## DESTAQUES NO BRASIL

| Projeto   | Empresa                            | Local               | Escala   | Estágio                    |
|---|------------------------------------|---------------------|--|----------------------------|
| Purificação de H <sub>2</sub> gerado  | Eletronuclear                      | Angra I e II - RJ   | 150-300 kg H <sub>2</sub> /d                     | P&D                        |
| H <sub>2</sub> V  | PTI                                | Foz do Iguaçu-PR    | Piloto   | P&D                        |
| H <sub>2</sub> V híbrido (UHE e FV)   | PTI                                | CESP – SP           | Piloto   | P&D                        |
| H <sub>2</sub> V híbrido (UHE e FV)   | Furnas                             | Itumbiara-GO        | Piloto   | P&D                        |
| Reforma a vapor de bioCH <sub>4</sub> para produzir bioH <sub>2</sub> e NH <sub>3</sub> V | Yara com CH <sub>4</sub> da Raízen | Interior de SP      | 20.000m <sup>3</sup> /d                          | Comercial em 2023          |
| H <sub>2</sub> V em transporte público  | Neoenergia                         | CE                  |  | MoU                        |
| Fertilizante (NH <sub>3</sub> V)  | Unigel                             | Camaçari – BA       | Comercial  | Conversão no final de 2022 |
| H <sub>2</sub> V e NH <sub>3</sub> V de eólica  | Enterprize Energy                  | RN                  | Comercial  | MoU                        |
| H <sub>2</sub> V  | Fortescue                          | Porto do Açu - RJ   | Comercial (300 MW e 250 kt NH <sub>3</sub> )     | MoU                        |
| H <sub>2</sub> V  | Fortescue                          | Porto do Pecém - CE | Comercial  | MoU                        |
| H <sub>2</sub> V  | Energix                            | Porto do Pecém - CE | Comercial (600 kt H <sub>2</sub> )               | MoU                        |
| H <sub>2</sub> V  | Qair                               | Porto do Pecém - CE | Comercial (540 MW)                               | MoU                        |
| H <sub>2</sub> V  | White Martins (Linde/Praxair)      | Porto do Pecém - CE | Comercial  | MoU                        |
| H <sub>2</sub> V  | EDP                                | Porto do Pecém - CE | Comercial (250 m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h) | MoU                        |
| H <sub>2</sub> azul e verde   | Qair                               | Porto de Suape - PE | Comercial (540 MW)                               | MoU                        |
| H <sub>2</sub> V  | Neoenergia                         | PE                  | Piloto   | MoU                        |

Fonte: PDE 2031 – EPE, 2022

# ESTRUTURA ATUAL



Fonte: Adaptado de Toyota, 2023.



Fonte: Auto evolution, 2022.

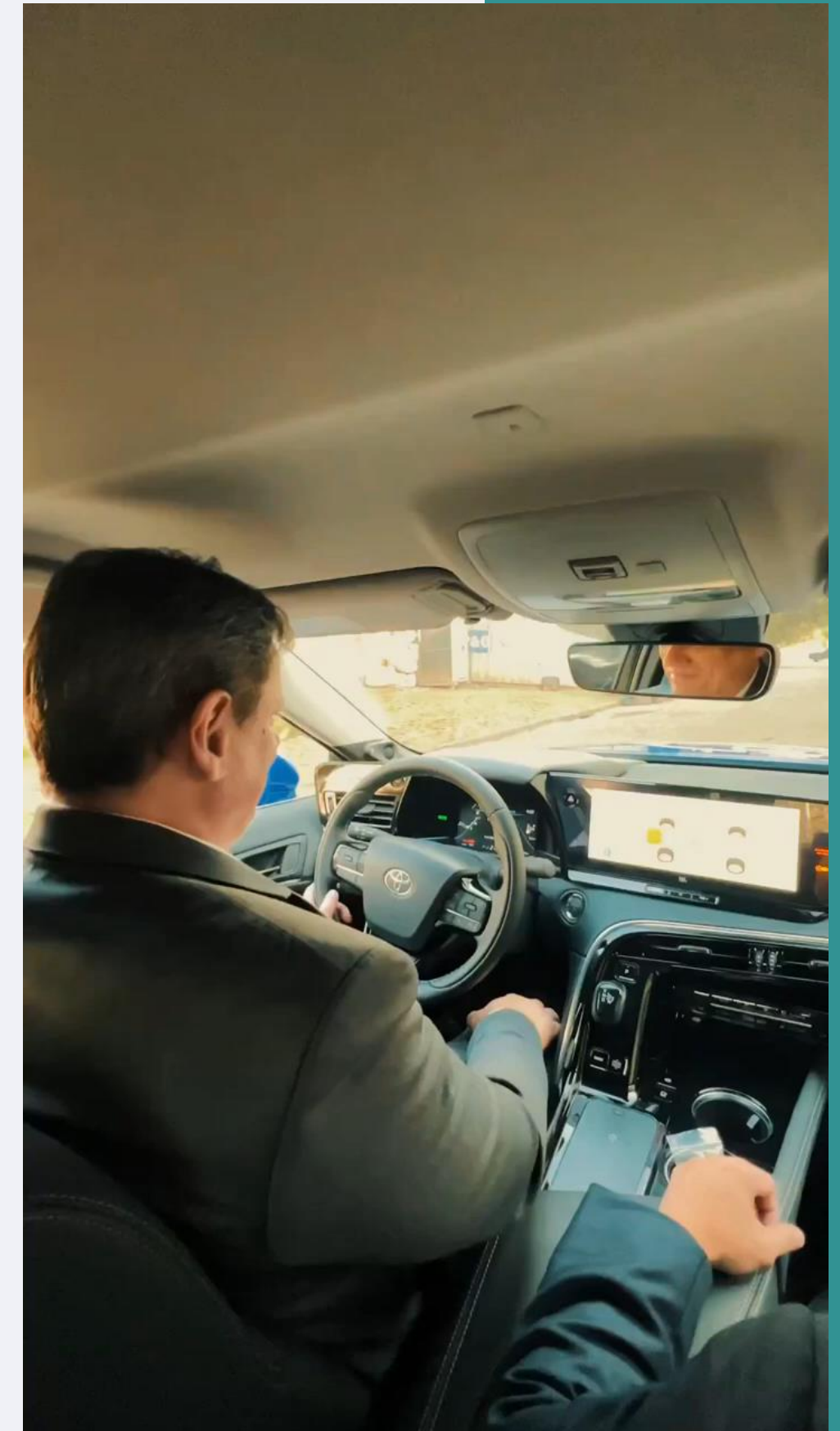
# MERCADO AUTOMOBILÍSTICO

Célula a combustível  
Utilizando H2:

Hyundai Nexu e  
Honda Clarity

Motor a combustão  
Utilizando H2

Toyota GR Yaris

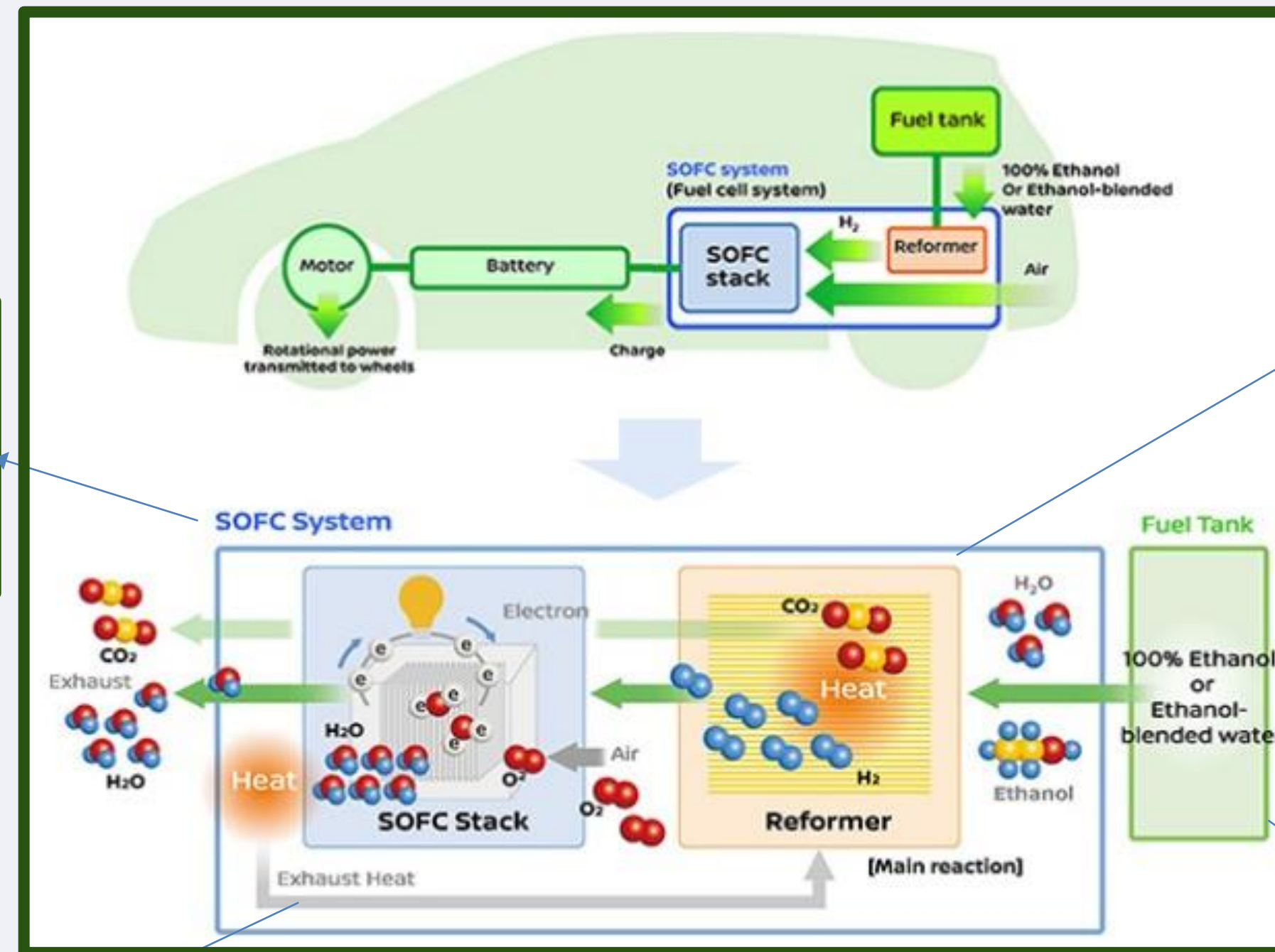


# ESTRUTURA ATUAL

## MERCADO AUTOMOBILÍSTICO

Nissan – e-Bio Fuel-Cell  
Informações preliminares:

- 20 km/L de etanol;
- Maturidade tecnológica até 2025.



Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)  
Célula a combustível de óxido sólido

Reforma de etanol a vapor

Mistura: 45% etanol e 55% água

Integração energética

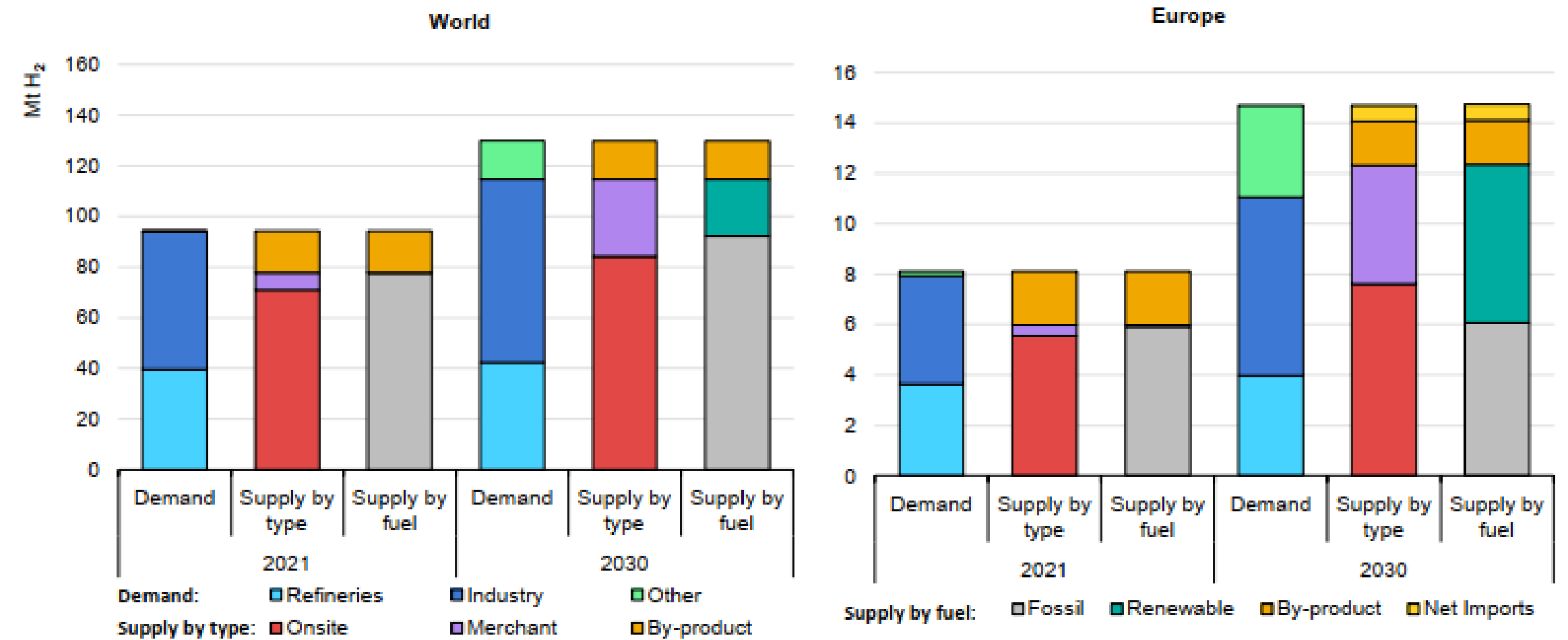
Fonte: Nissan (e-Bio Fuel-Cell).

# POTENCIAL E PERSPECTIVAS

## DEMANDA DE HIDROGÊNIO

### Hydrogen production today is concentrated and mostly integrated with onsite demand...

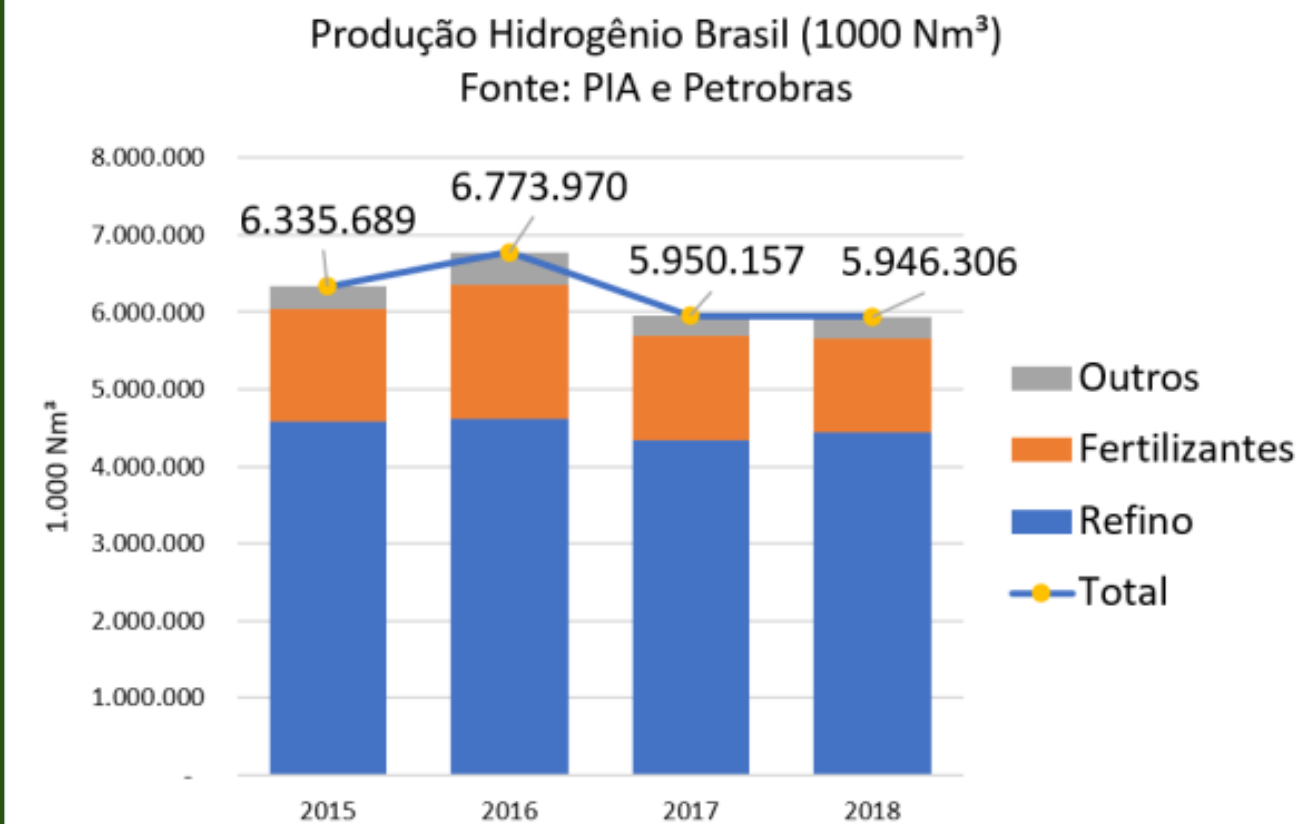
Global and European hydrogen demand by sector, and hydrogen supply by type and fuel in the Announced Pledges Scenario, 2021-2030



Notes: Other includes the transport, power generation and buildings sectors, and synthetic fuels. Europe includes the European Union, Albania, Belarus, Bosnia and Herzegovina, North Macedonia, Gibraltar, Iceland, Israel, Kosovo, Montenegro, Norway, Serbia, Switzerland, Republic of Moldova, Republic of Türkiye, Ukraine and United Kingdom.

Fonte: Global Hydrogen Review, 2022 - IEA

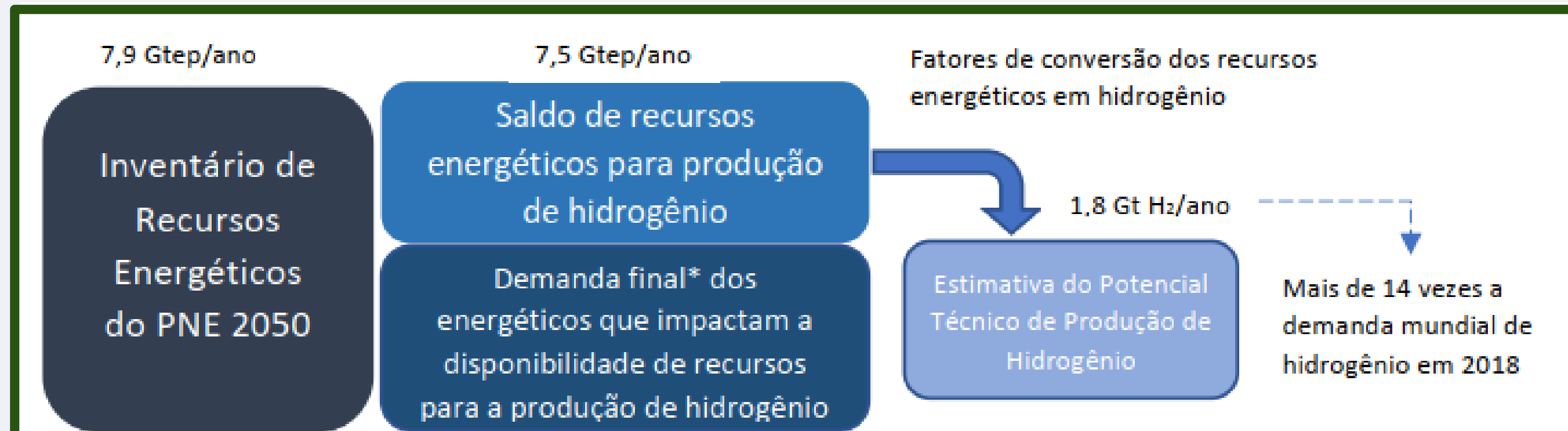
Brasil: 400 a 600 mil toneladas de H<sub>2</sub> / ano



Fonte: Global Hydrogen Review, 2022 - IEA

# POTENCIAL E PERSPECTIVAS

## POTENCIAL TÉCNICO DE PRODUÇÃO DE H2 NO BRASIL



\* Considerando cenário "Desafio da Expansão" e supondo atendimento de toda demanda elétrica com os recursos renováveis onshore.

| Recurso Energético            | Potencial de Hidrogênio Mt/ano |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Renovável – <i>Offshore</i> * | 1.715,3                        |
| Renovável – <i>Onshore</i> *  | 18,1**                         |
| Biomassa                      | 50,5                           |
| Nuclear                       | 6,9                            |
| Fósseis                       | 60,2                           |
| <b>Total</b>                  | <b>1.851</b>                   |

Notas:

\* Os recursos renováveis onshore e offshore considerados são o hidráulico, o solar e o eólico.

\*\*O potencial pode se revelar bastante superior ao apontado em caso de não ocorrência da suposição de atendimento à totalidade da demanda de energia por fontes dessa natureza, conforme premissa assumida neste trabalho

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

## Oportunidades e desafios – Setor sucroenergético

- Importância do Etanol e do Biometano na cadeia de Hidrogênio:
  - Provedores de hidrogênio de forma descentralizada;
  - Versatilidade;
  - Oportunidade de agregar valor ao produto final;
  - Alternativa forte frente ao crescimento do mercado de carros elétricos;
  - Fortalecimento da economia verde.
- Desafios:
  - Desenvolvimento tecnológico deverá estar alinhado com a viabilidade econômica;
  - Métodos seguros de armazenamento e transporte;
  - Políticas públicas, fomento do mercado e desenvolvimento de infraestrutura.



Agradecemos por dedicarem seu tempo e atenção.  
Esperamos um futuro mais sustentável.

**OBRIGADO!**



**REUNION**  
E N G E N H A R I A

**Murilo Gonçalves de F. C. Borges**

Gerente de Engenharia de Processos

(16) 99196 8664

[murilo@reunion.eng.br](mailto:murilo@reunion.eng.br)