



Descarbonização da Indústria via Gases Renováveis

Rui Costa Neto, Doutor Eng. Prof.

Investigador IST IN+ , Prof. ULHT

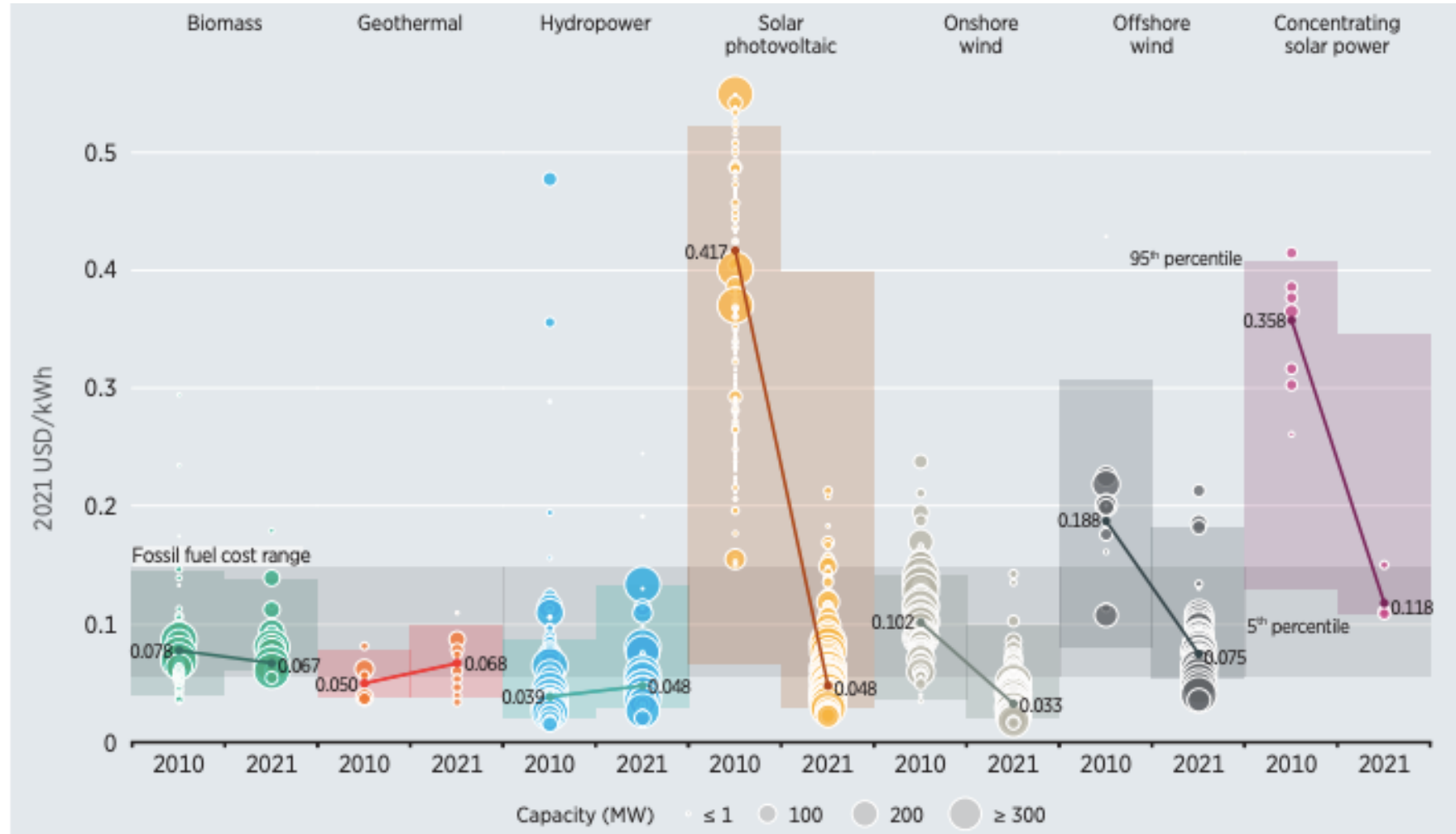
costaneto@tecnico.ulisboa.pt



Porquê apenas agora Hidrogénio ?

- Antes **não fazia sentido** produzir hidrogénio cinza a partir do petróleo.
- Em **11 anos** (2010 a 2021) o **preço do PV** caiu **9x** (de 0,42 EUR/W para 0,048 EUR/W).
- **Custo das renováveis** em 2019 baixou no carvão, **conjugando todas as estrelas na direção da economia do hidrogénio**

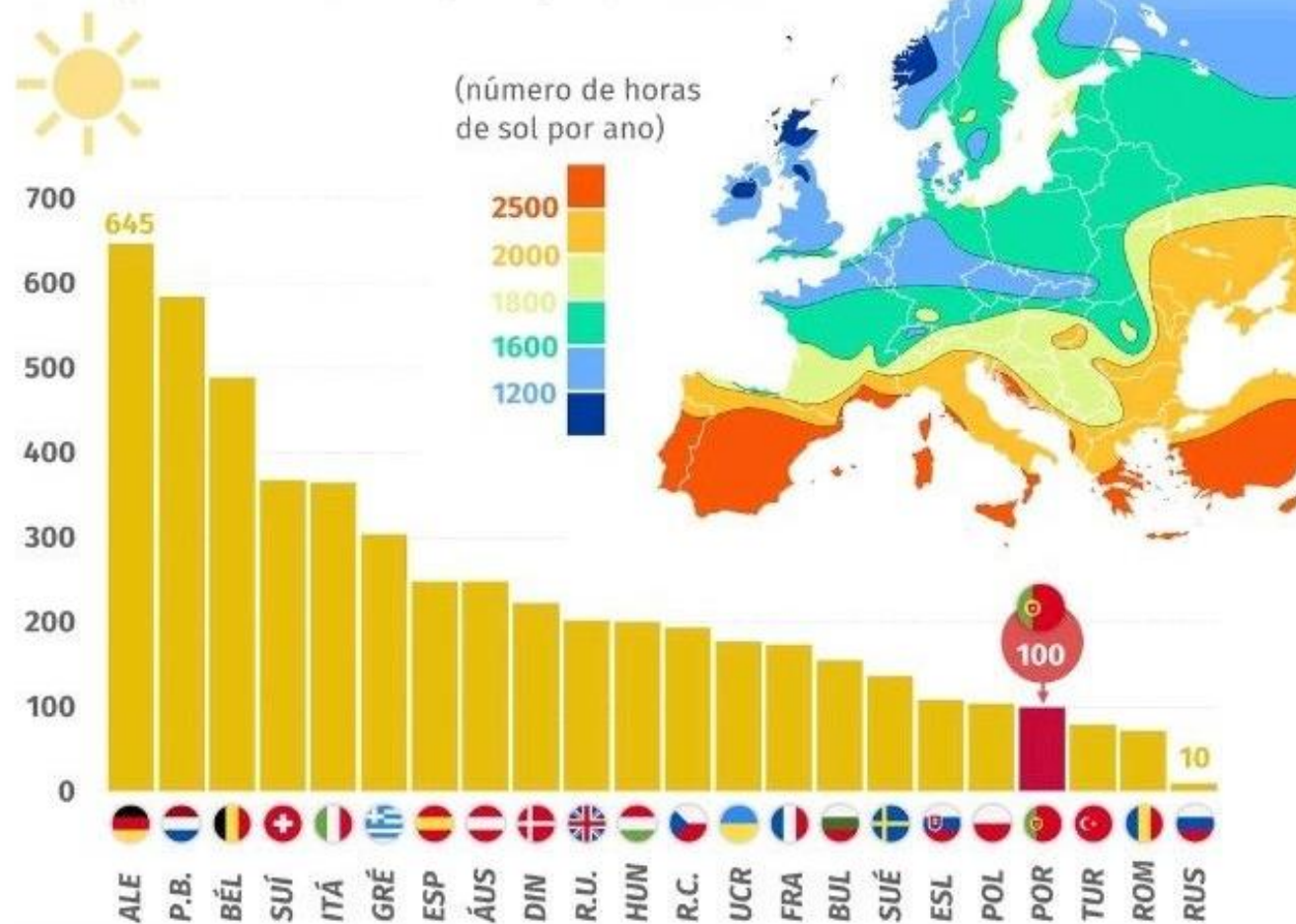
Limites globais de LCOE por tecnologia de geração renovável entre 2010 e 2021



Energia solar PV em Portugal face à Alemanha

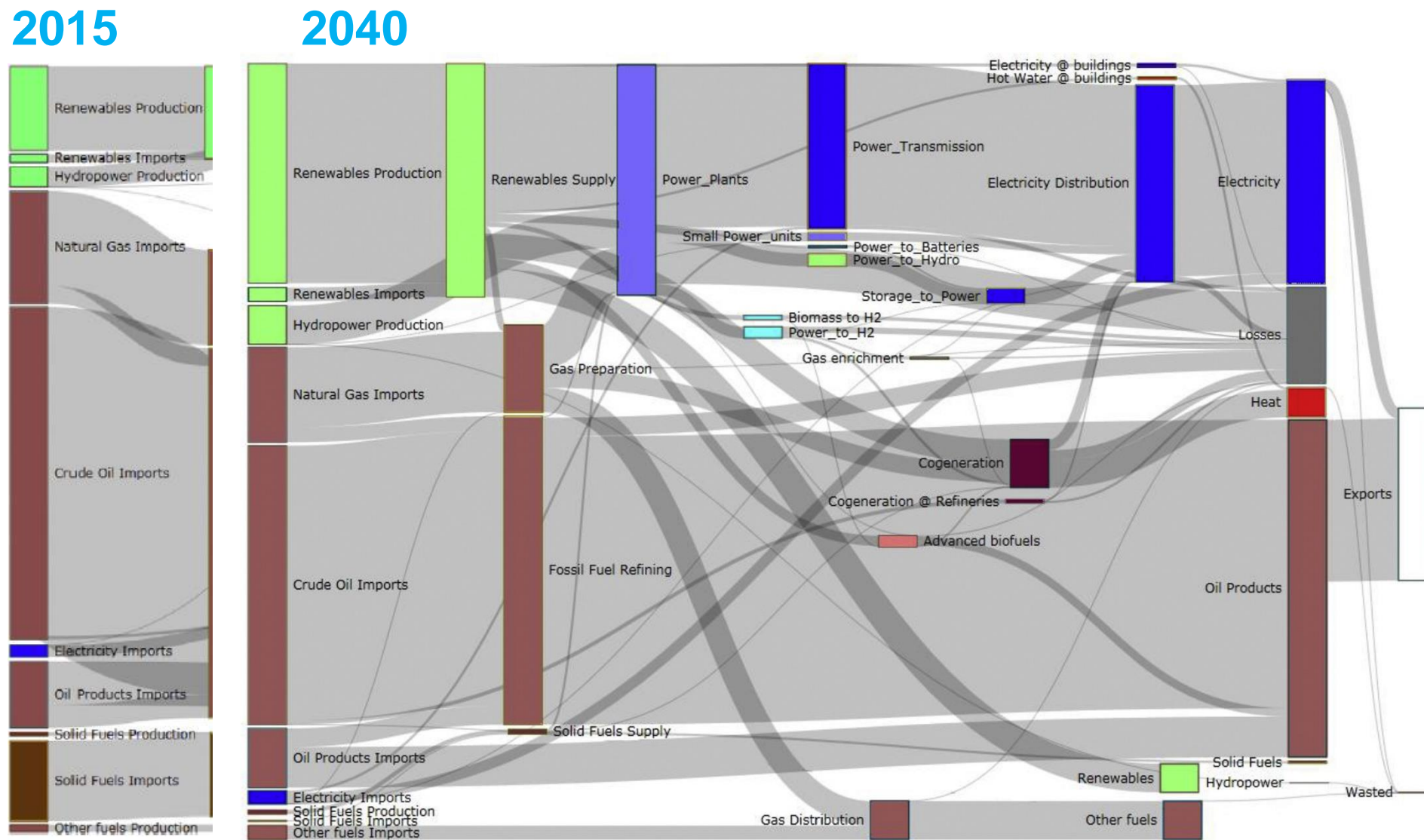
- Em **Portugal** temos **2X** mais horas solares anuais, mas em relação à **Alemanha**
- Mas em 2022 tínhamos **6,4X** menos capacidade instalada por pessoa.
- O que é que estamos a fazer de errado?

Capacidade de energia solar instalada na Europa em 2020 (watts per capita)



Dependência Energética de Portugal, 2015 e 2040

P. Partidario, R. Aguiar, P. Martins, CM Rangel, I. Cabrita,
The Hydrogen roadmap in the Portuguese energy system e Developing the P2G case ,
 International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Edição 47, 2020, 25646-25657.



Dependência Energética de Portugal, 2015 e 2040

2015

2040

Oil Production

BY COUNTRY IN 2022

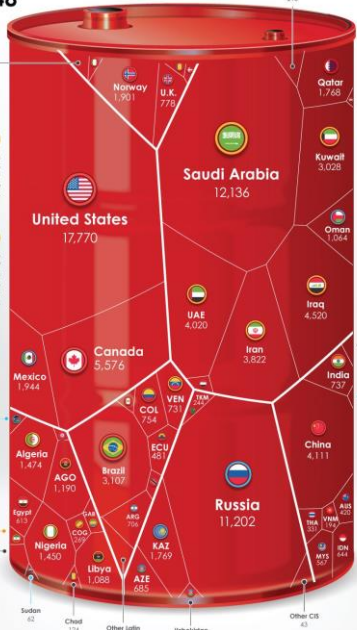
In Thousand barrels per day (B/D)

● OPEC Countries
 ● Non-OPEC Countries
 ● OPEC + Countries

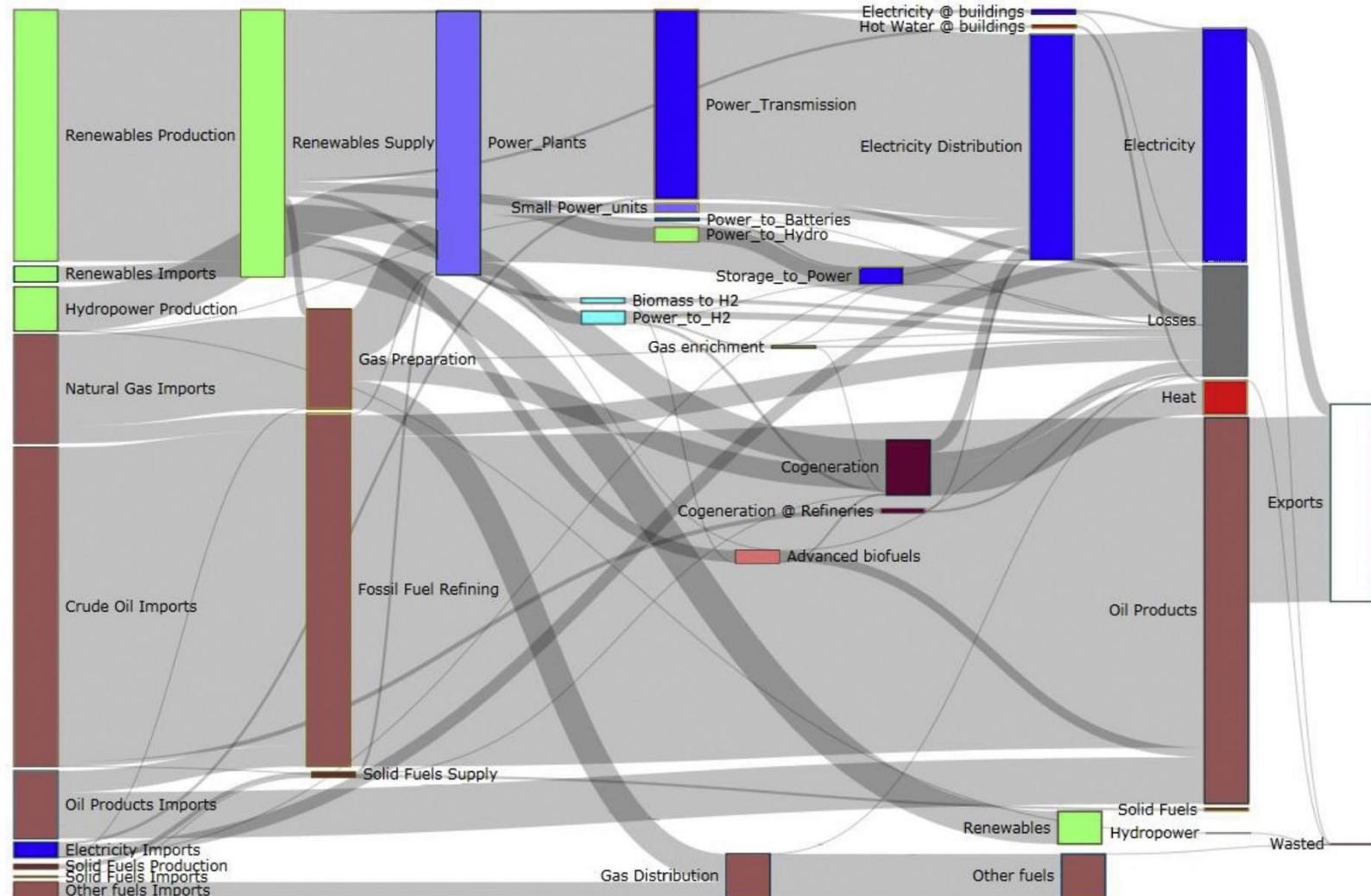
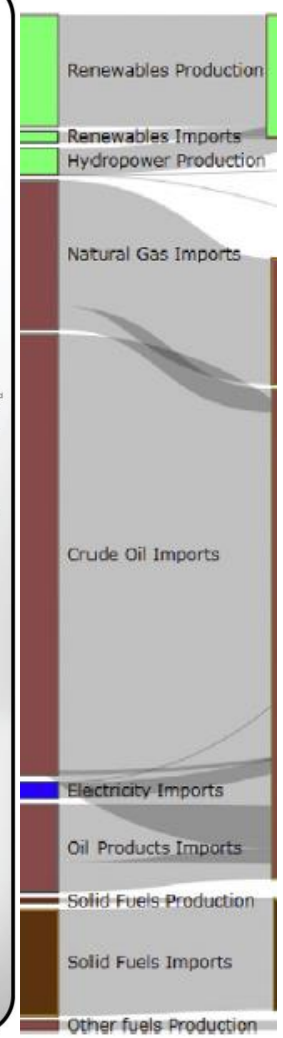
Global oil production grew by 3.8 million barrels per day (B/D) between 2021 and 2022, a 4.2% rise led by supply increases from the top 10 oil producing nations.

Total Production (Thousand B/D)

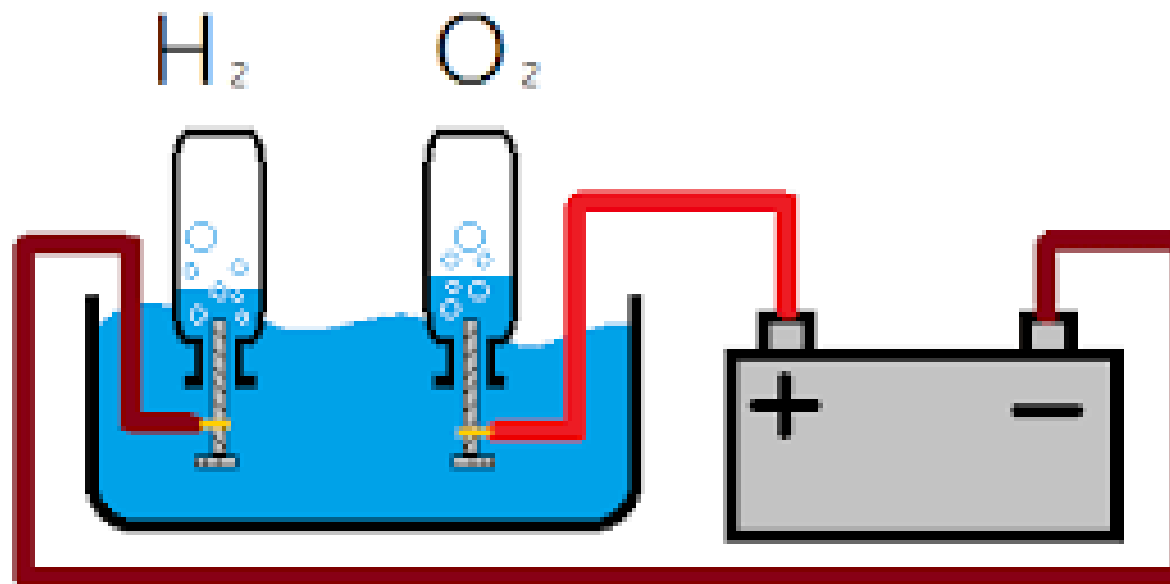
93,848



The Middle East's oil production declined by 8.6% in 2022, and only contributed 3.3% of global supply.
 The U.S. is responsible for nearly one-fifth of global oil production and is also the world's biggest oil consumer, followed by China.
 The top 10 oil producing nations account for 70% of world oil supply.
 Includes crude oil, shale oil, oil sands, condensates that require further refining and natural gas liquids. Excludes liquid fuels from other sources and oil products extracted in solid form.
 Source: Energy Institute Statistical Review of World Energy 2023.



A solução é a Conversão de Eletricidade Renovável em Hidrogênio e Oxigênio Verdes



- Vento , Sol e Água são **Infinitos**
- Só necessitamos ter os **dispositivos** para **capturar** sua energia
- Podemos gerar energia elétrica **descentralizada em qualquer lugar** . Mesmo no nosso **quintal**

Eletrólise da água Alcalina

Contexto histórico da evolução da produção de hidrogénio



COAL GASIFICATION



1800's – 1920's



WATER ELECTROLYSIS



1920's – 1960's



GAS REFORMING



1950's – TODAY



H₂ ECONOMY?



2010 –

Source: Henning G. Langås,
NEL Hydrogen

A eletrólise alcalina teve um domínio de **40 anos** entre a década de 20 e a década de 60.

Foi destronada pela **reformação de metano com vapor de água** na **década de 50**. Porque o gás natural tornou-se muito barato.

Transformando H₂O e Eletricidade em Capital Financeiro



1 MW 1h →

178 kg/h H₂O →
(178 l/h)



→ H₂ 20 kg/h

(222 410 l/h)

→ O₂ 158kg/h

(111 205 L/h)

178 kg/h H₂O → ~20 kg/h H₂ 20 - 100 €/kg.h (1,0 – 5,0 €/kg de H₂)

~158 kg/h O₂ { 16 - 63 €/kg.h (O₂ industrial) (0,1 – 0,4 €/kg de O₂)
111 - 316 €/kg.h (O₂ médico) (0,7 – 2,0 €/kg de O₂)

Custos eletricidade Verde 8000 horas (40 €/MWh): 320 000 €

Custos com água 8000 horas (2€/1000 kg): 1 424 000 kg creme : 2 848€

Em 8000 horas de operação, um eletrolisador pode gerar receitas mínimas :

160.000 - 800 000 €/ano H₂ → 160.000€/ano

113 760 - 455 040 €/ano (O₂ industrial) → 90% 113 760 € €/ano

88 480 - 252 800 €/ano (O₂ médico) → 10% 88 480 €/ano

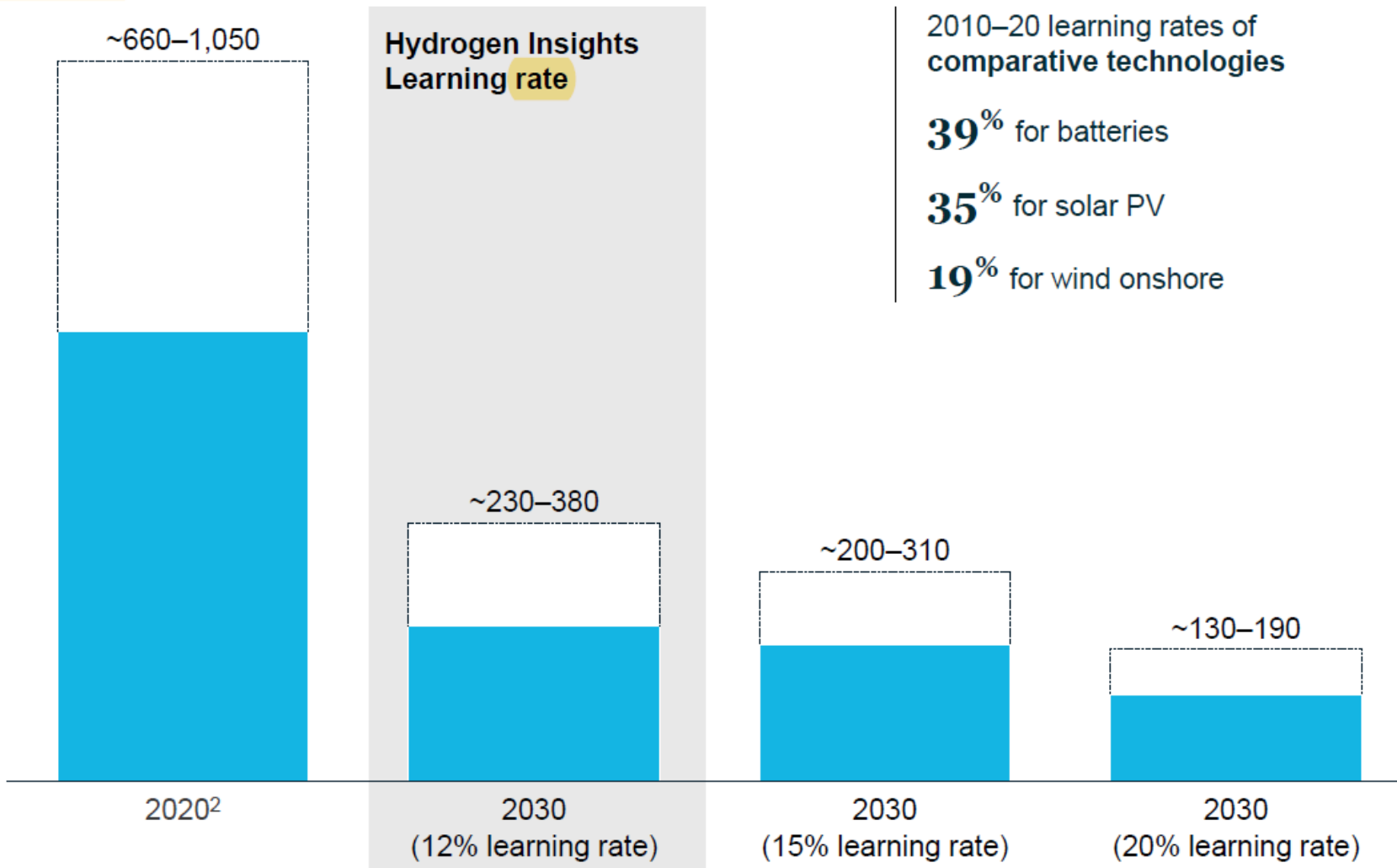
receita

362 240 - 1 507 840 €/Ano
8000 h/ano



Redução de custo dos eletrolisadores em 10 anos

Electrolyzer system capex¹ for different learning rates
USD/kW

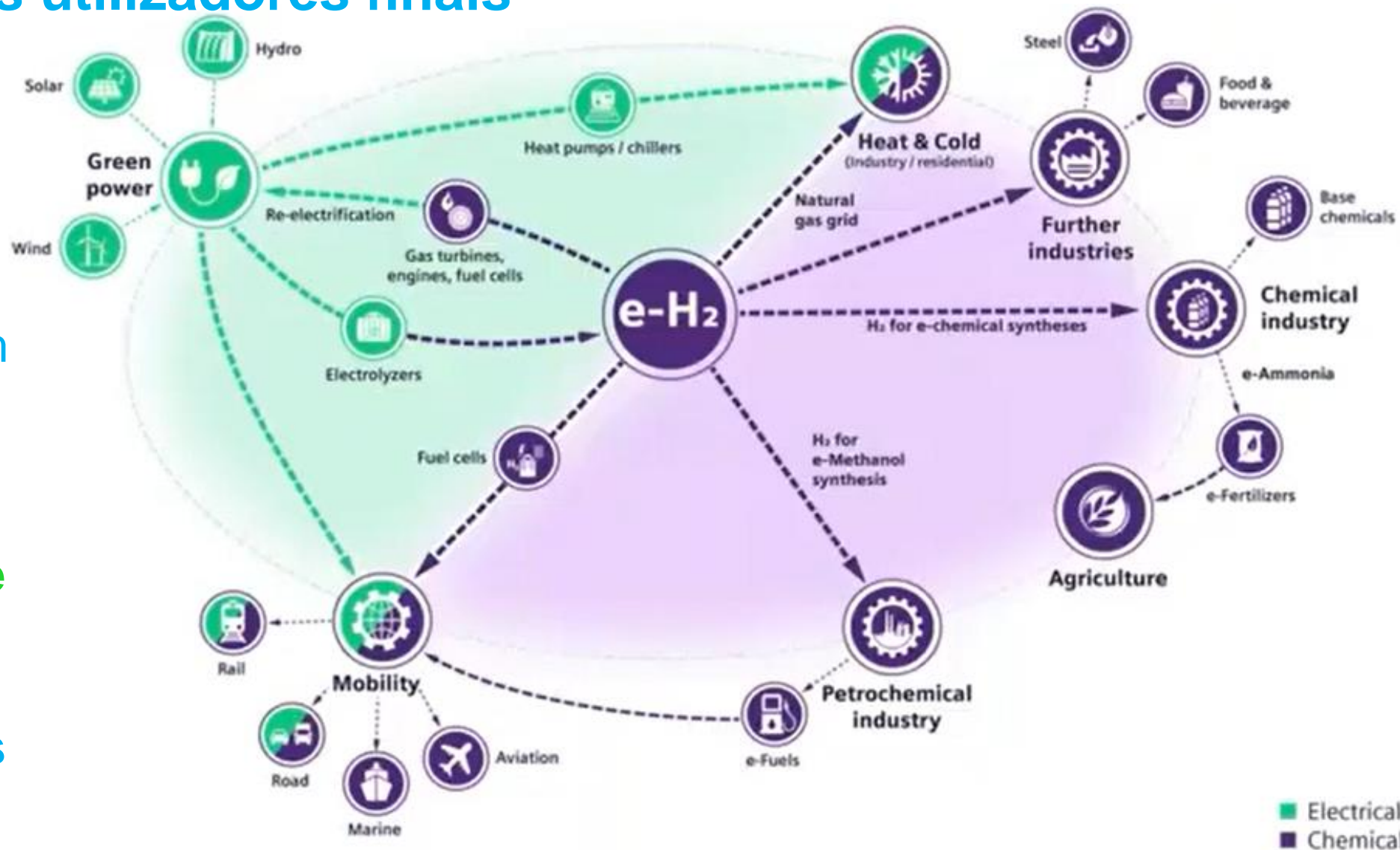


Cenários de taxa de aprendizagem e CAPEX da eletrólise

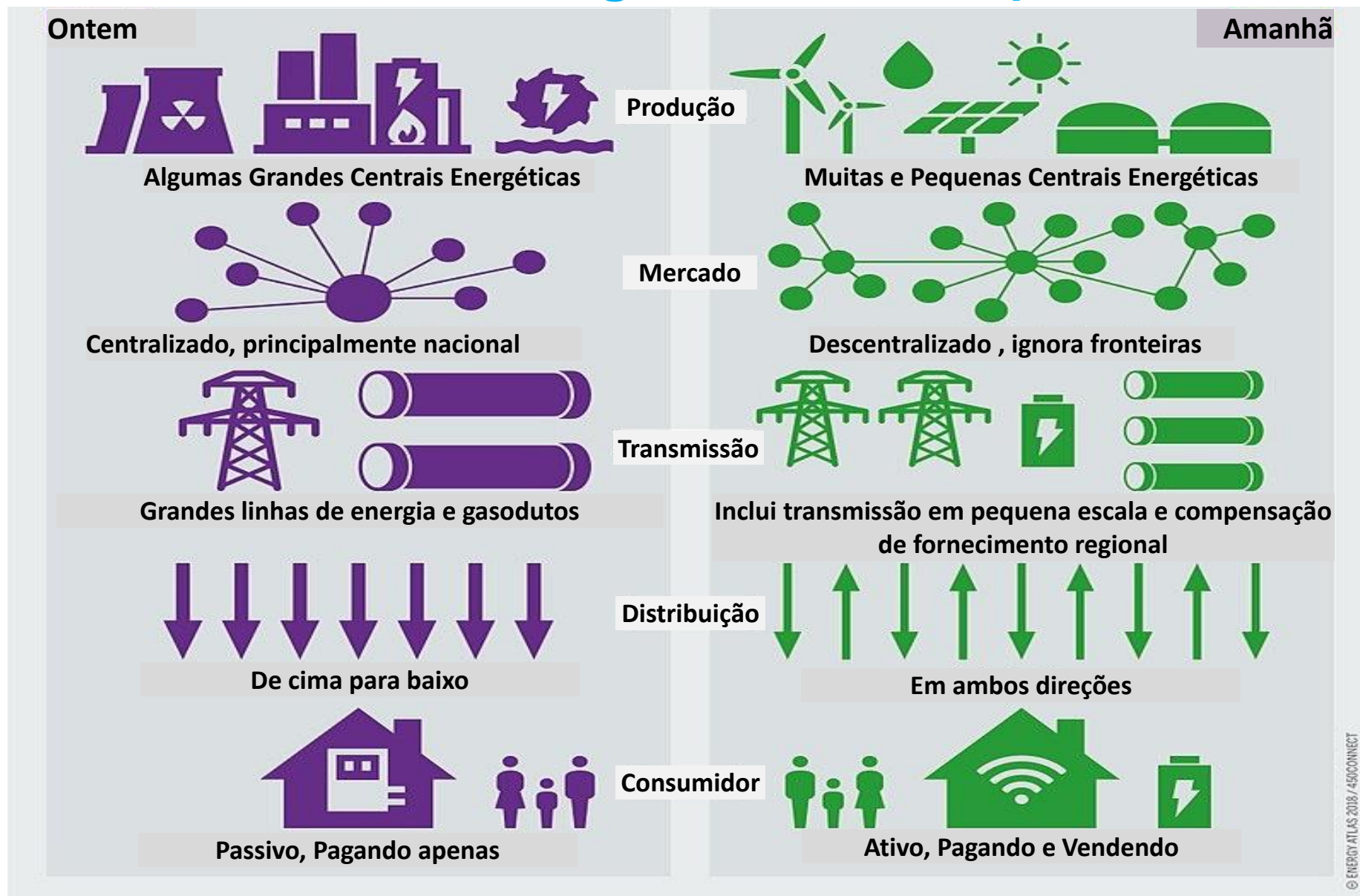
1. Only includes stack and balance of plant. No installation and assembly, building, indirect cost or transportation site
2. Range based on different electrolyzer size classes of 2–20 MW

A UNIÃO dos Setores é a **alavanca chave** para **descarbonização** de todos os utilizadores finais

- Eletrolisadores são unificadores dos **eletrões** com as **moléculas**
- Uso de **eletrões** ou **moléculas de H₂** diretamente onde eles são **melhores e mais eficientes**



Características de um sistema de energia tradicional (esquerda) vs. rede inteligente (direita)





Diferenças fundamentais do Sistema de Geração

Extração

(Petróleo, Carvão, Gás Natural)

- Colapso, uma questão de tempo
- Recursos escassos - dependentes da geografia
- Precisa de escala e extensão
- Hierárquico centralizado
- Alto custo
- Desperdício alto
- Enormes fluxos físicos
- Economias de escala

Criação

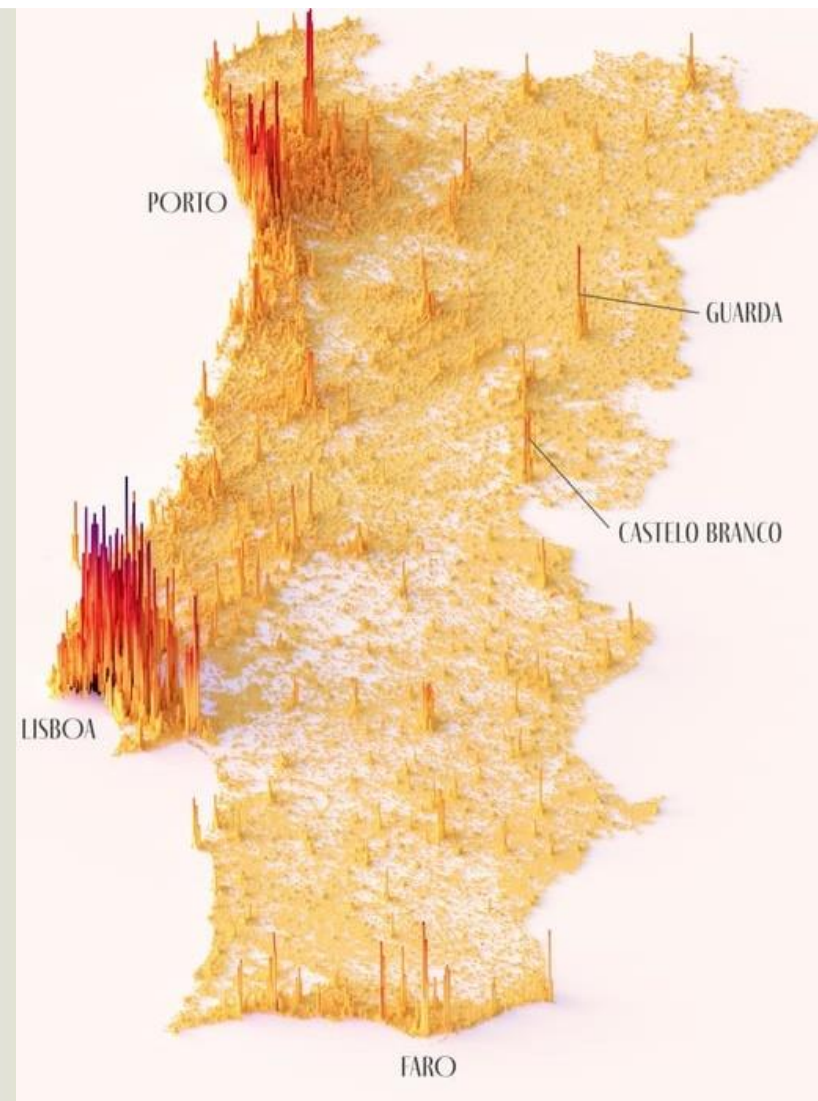
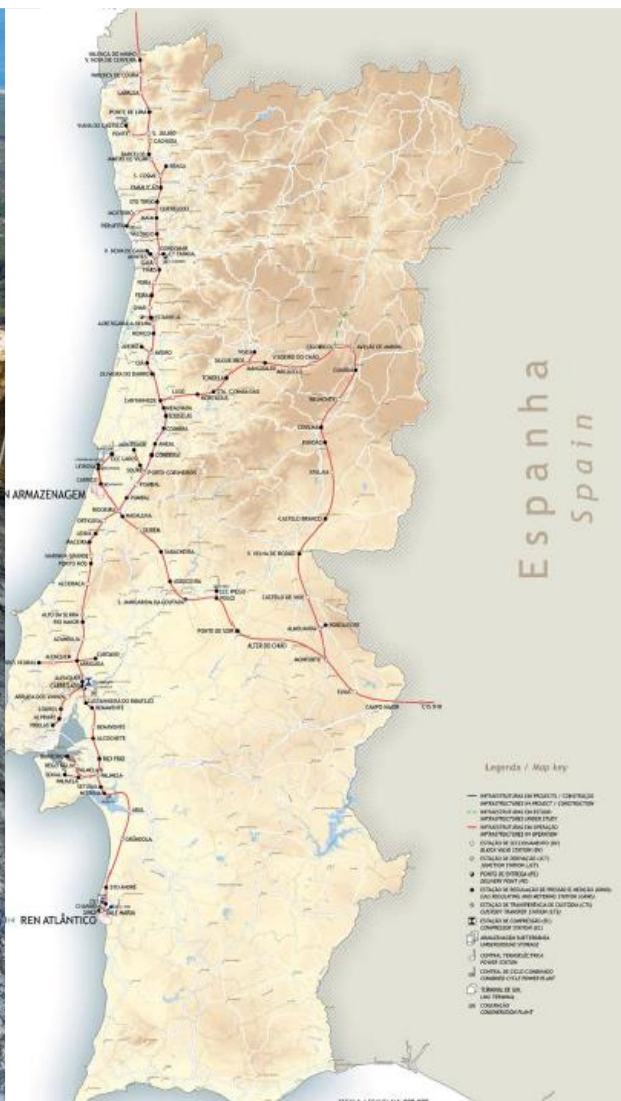
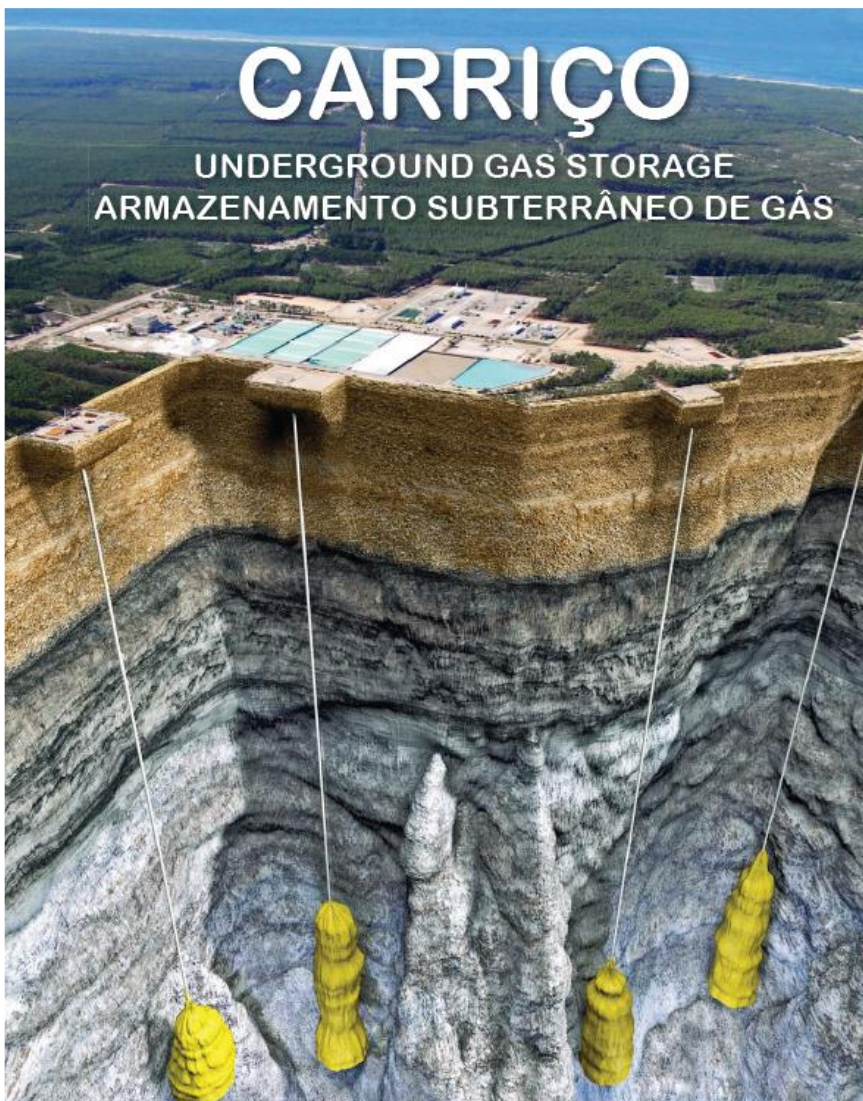
(Solar, Eólica, Hidráulica ...)

- Construído, gradual
- Recursos superabundantes - disponíveis em todos os lugares
- Autonomia local
- "Rede e nó" descentralizados .
- Custos quase zero (uma vez construída a infraestrutura)
- Desperdício reduzido
- Fluxos físicos limitados , fluxos de informação elevados
- Efeitos de rede

Pensando na internet das coisas (IoT): Internet da comida ,

Internet da Energia, Internet dos Transportes , Intenet de Redes • (Tony Seba Visão)

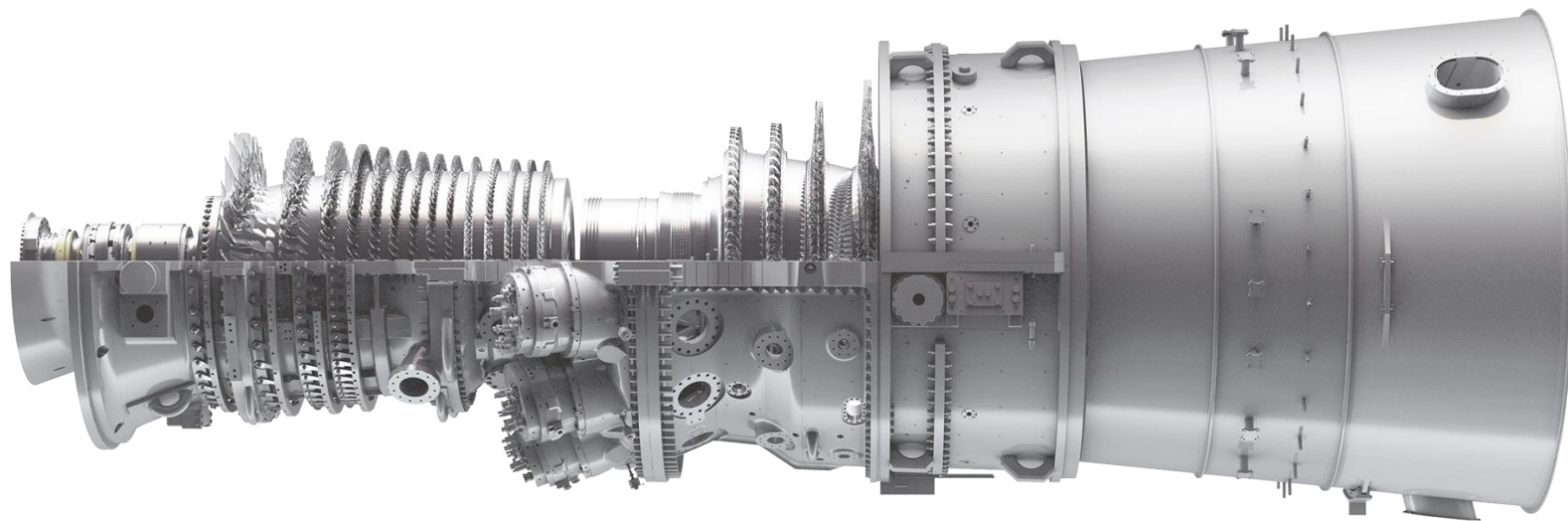
Onde as pessoas vivem em Portugal, será onde haverá maior consumo de hidrogénio e oxigénio verdes





Turbinas a Gás

Podemos gerar
eletricidade
rapidamente
através da
combustão de
hidrogénio puro ou
em **misturas** com
Gás Natural
para **fornecer**
eletricidade à rede

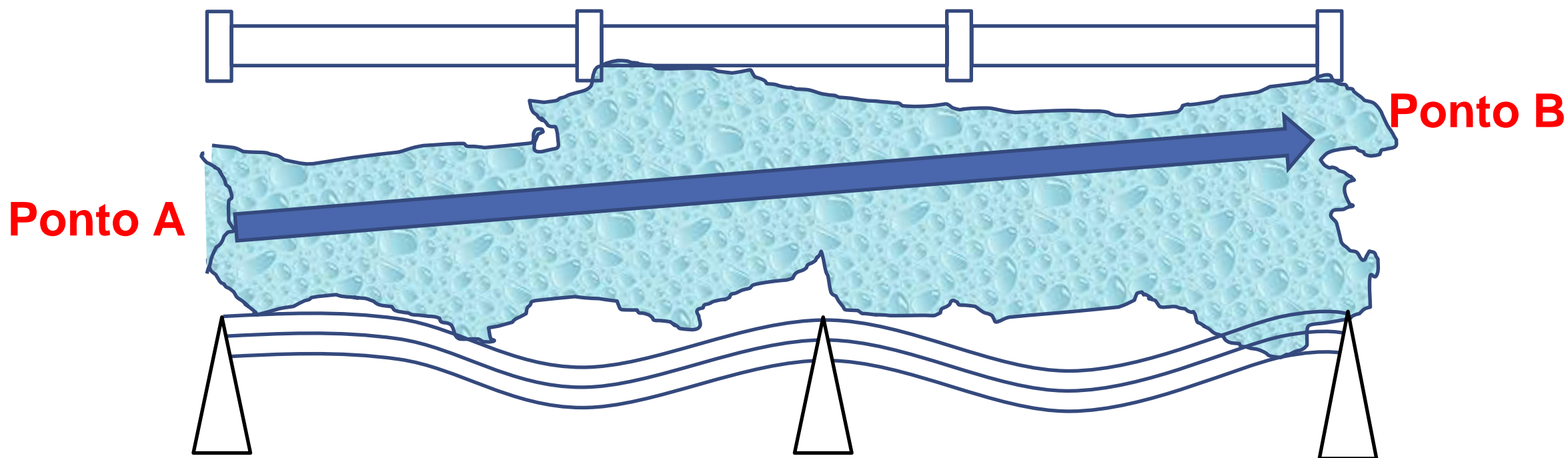




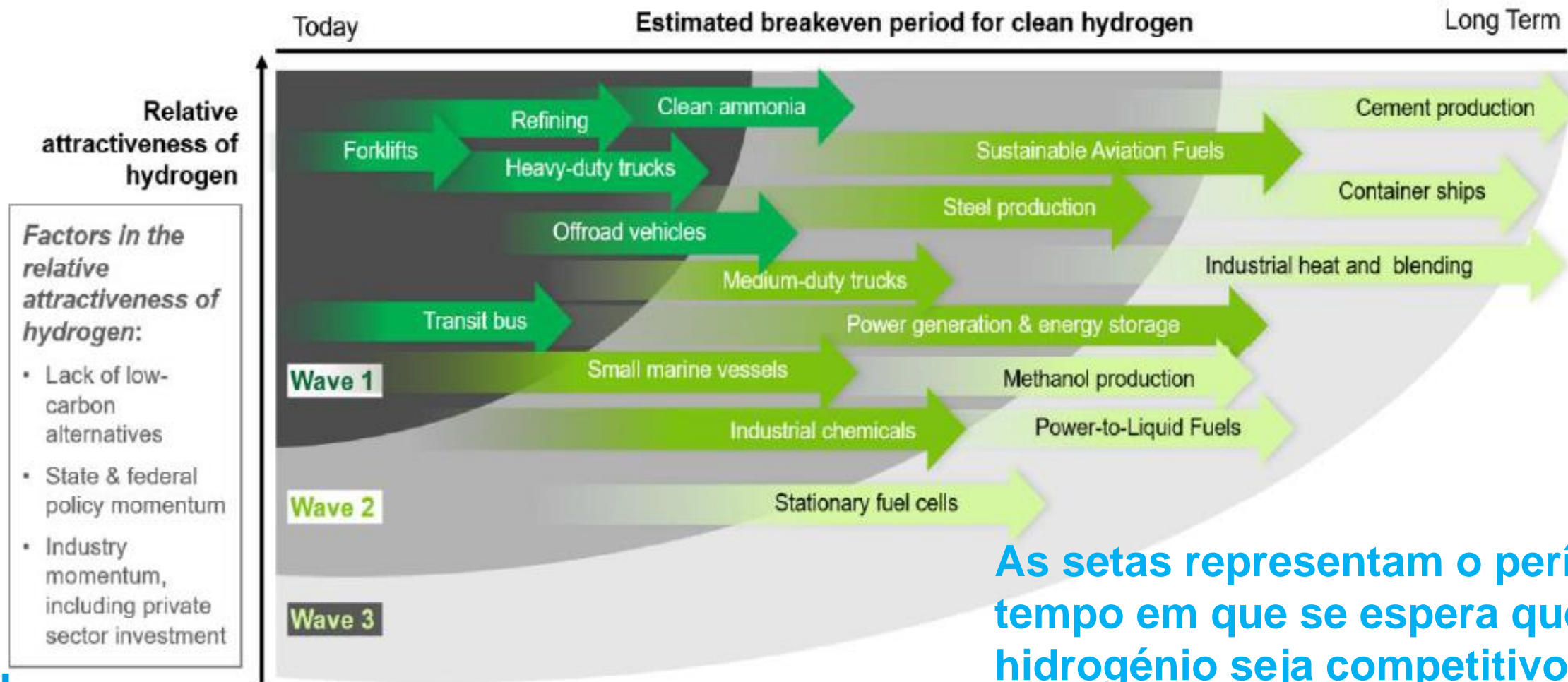
Transportar 500 MW de potência ao longo de 500 km de Portugal

A quantidade de energia transportada pelo gás é **10 a 50 X maior** que a transmissão elétrica com o **mesmo CUSTO**

O gasoduto atua como **rota de distribuição** e **tanque de armazenamento de energia**

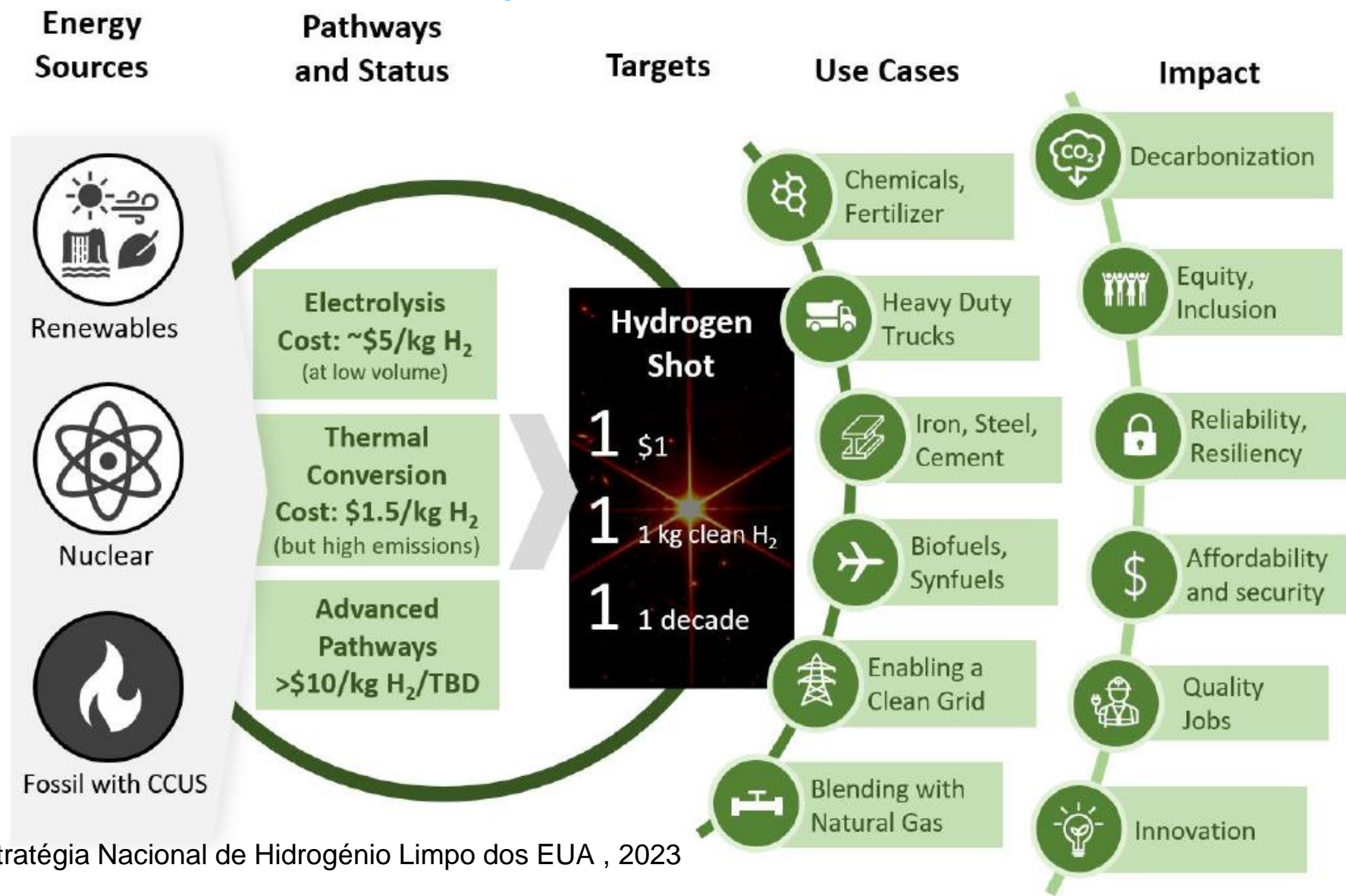


O hidrogénio verde será desenvolvido em ondas, com base na atratividade relativa em cada aplicação de uso final



As setas representam o período de tempo em que se espera que o hidrogénio seja competitivo com as tecnologias existentes em escala americana.

O objetivo da iniciativa Hydrogen Shot é baseado no progresso de uma série de rotas , permitindo uma variedade de utilizações e impactos .



Roteiro de Estratégia Nacional de Hidrogénio Limpo dos EUA , 2023

Evolução do preço do CO2 (€/ton) e do gás natural (€/MWh) da UE





Combustão de Gás Natural **Enriquecida** com **oxigénio puro** de **eletrólise**

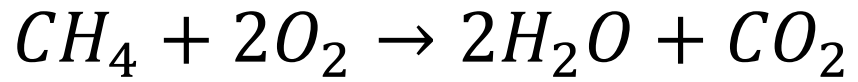


Combustão de Gás Natural **Enriquecido** com **oxigênio puro** da **eletrólise**

$$Vn = \frac{V}{n}$$

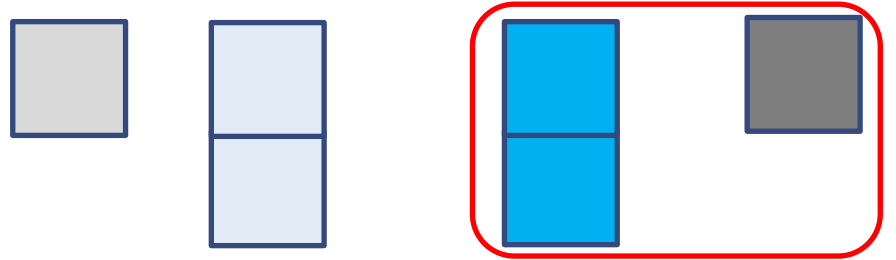
$$n \cdot 22,4 \text{ L/mol} = V$$

$$0,0446 \text{ mol} \times 22,4 \text{ L/mol} = 1 \text{ L}$$



$$\Delta H = -891 \text{ kJ/mole}$$

$$1 \text{ L} = \square$$

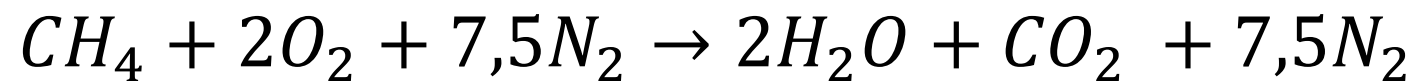


$$\Delta H = -891 \text{ kJ/mole metano}$$

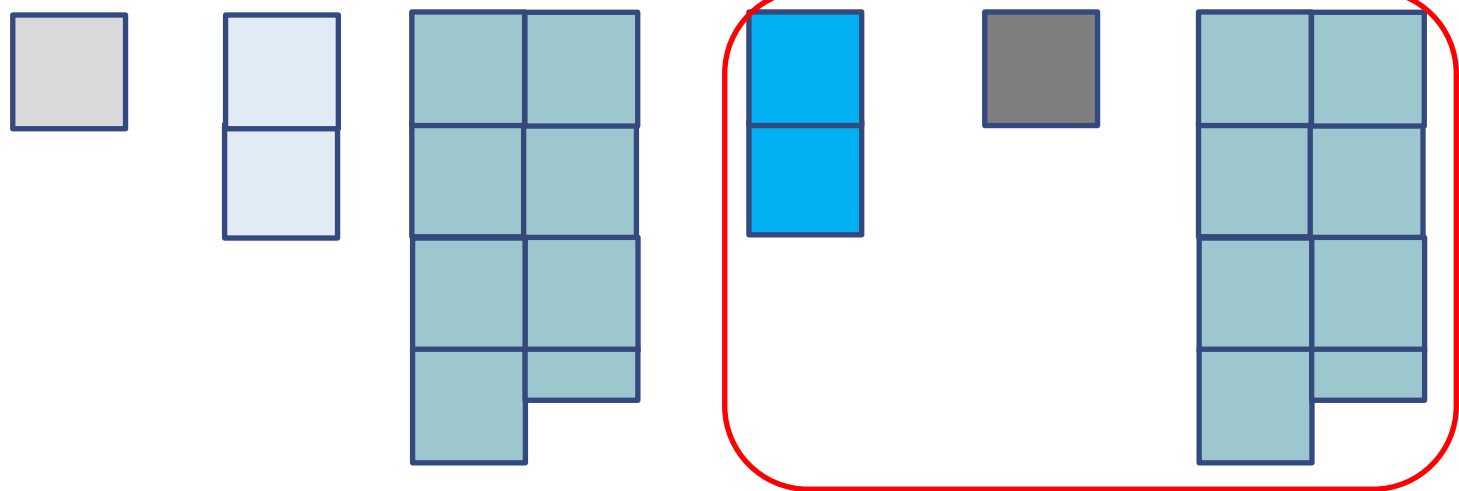
$$\Delta H = -40 \text{ kJ/L metano}$$

$$\Delta H = -13 \text{ kJ/L gases de escape}$$

3,4x



$$\Delta H = -891 \text{ kJ/mole}$$



$$\Delta H = -891 \frac{\text{kJ}}{\text{mole}} \text{ metano}$$

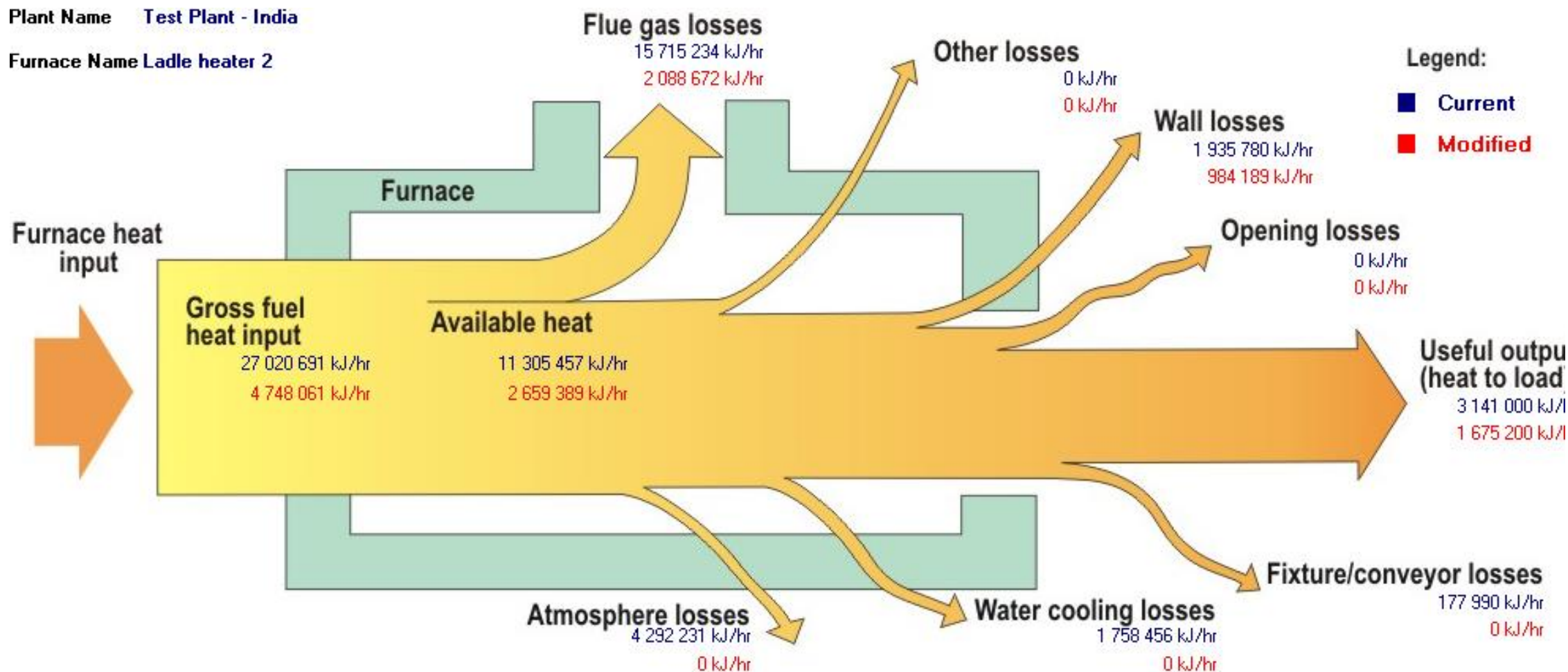
$$\Delta H = -40 \text{ kJ/L metano}$$

$$\Delta H = -4 \text{ kJ/L Gases de escape}$$

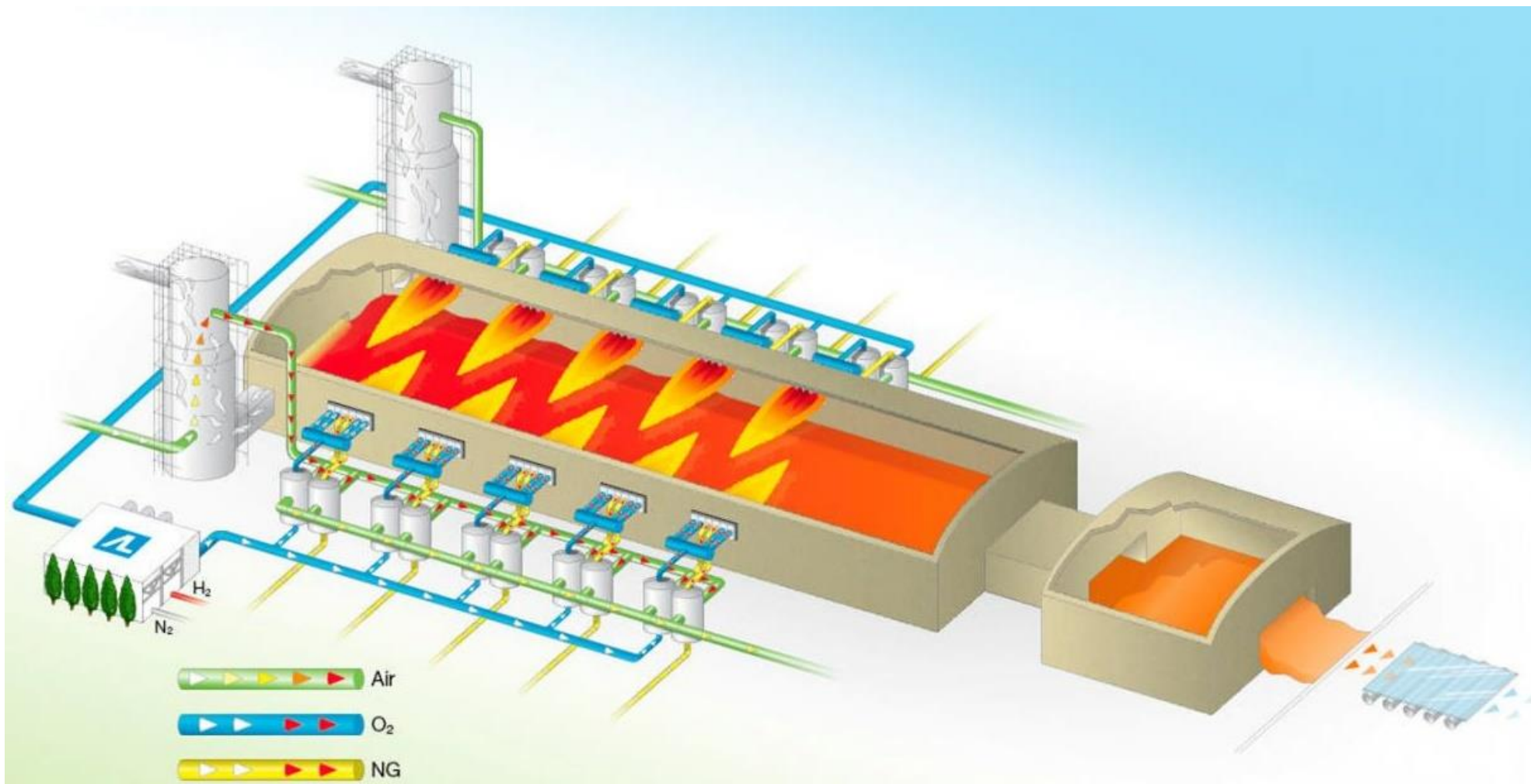
Combustão de Gás Natural **Enriquecido** com **oxigênio puro** de **eletrólise**

Plant Name Test Plant - India

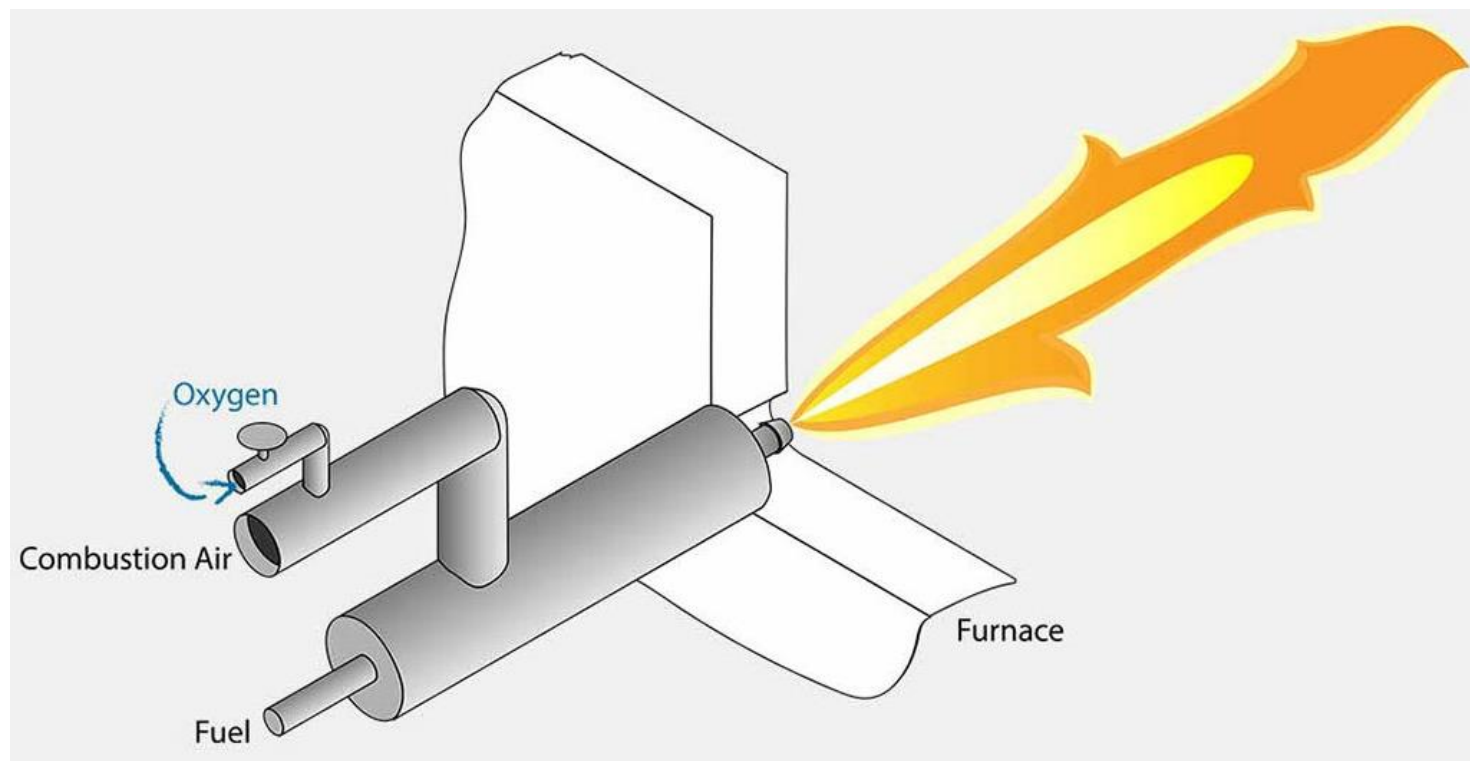
Furnace Name Ladle heater 2



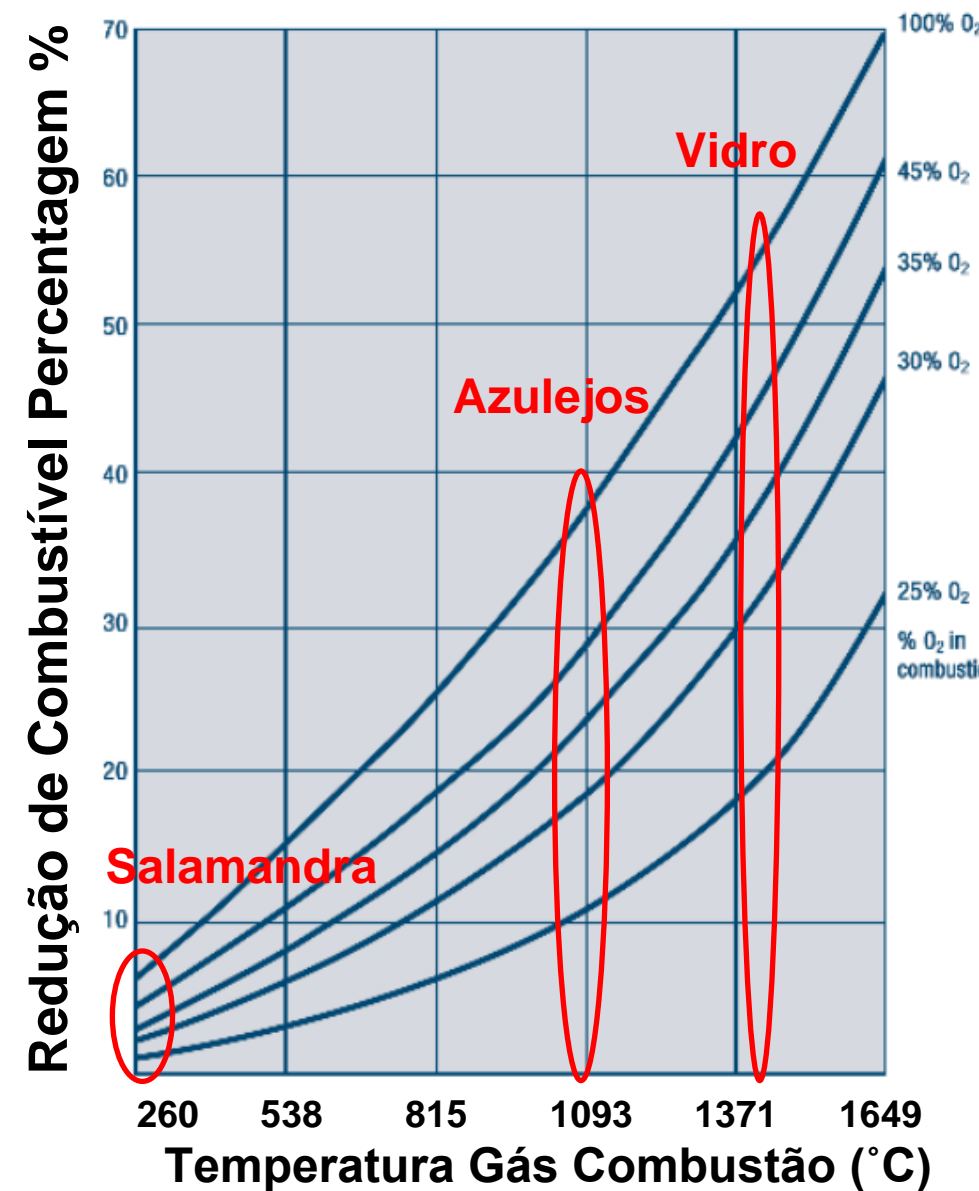
Combustão de Gás Natural **Enriquecido** com **oxigênio puro** da **eletrólise**



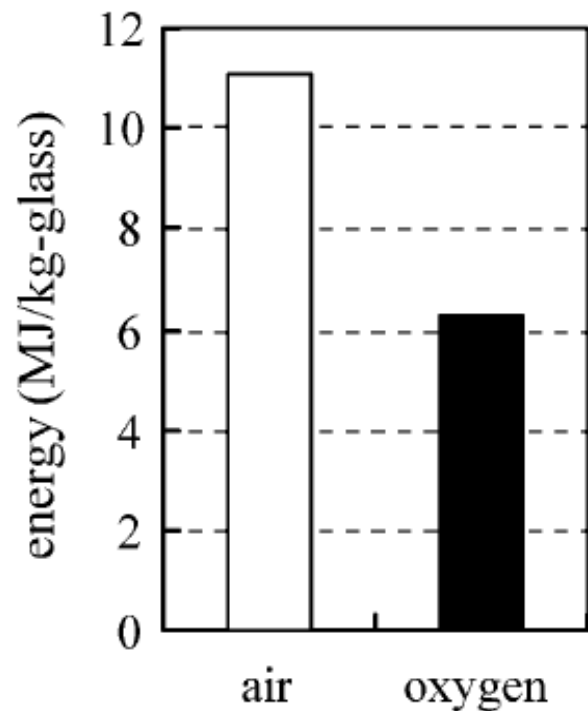
Combustão de Gás Natural **Enriquecido** com **oxigênio puro** da **eletrólise**



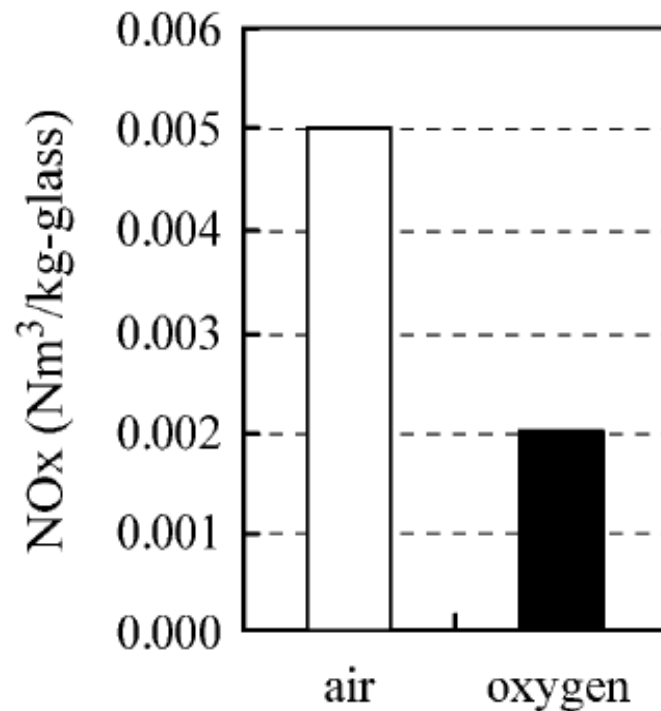
**Oxi combustão em vidro e
Cerâmica é eficiência energética**



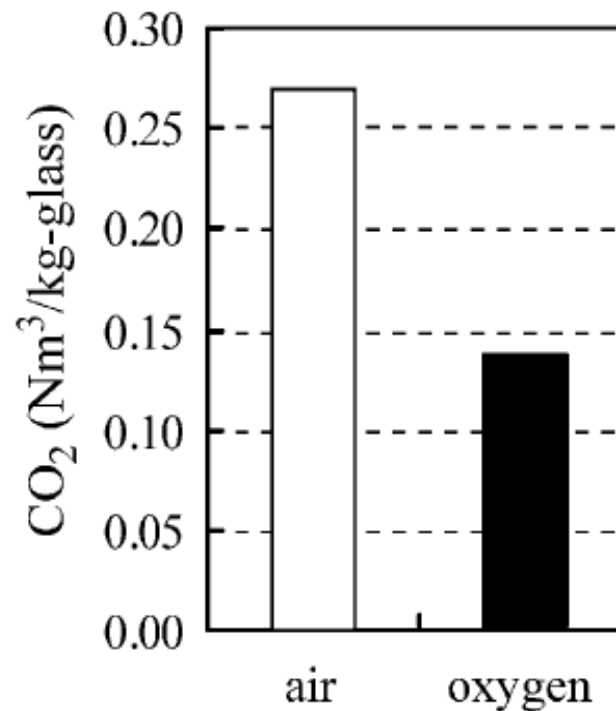
Combustão de Gás Natural **Enriquecido** com **oxigénio puro** da **eletrólise**



(a) Energy consumption



(b) NO_x emission



(c) CO₂ emission

Comparação entre **combustão de GN com ar** e **combustão com oxigénio** na fusão do vidro.



Benéficos gerais da Oxi-combustão ou combustão enriquecida com oxigénio

O ar é constituído por aproximadamente 79% N₂ e 21% O₂, por volume. **Apenas o oxigénio é necessário** na reação de combustão.

Ao **eliminar o N₂**, muitos **benefícios podem ser realizados**. Estes **benefícios incluem**

- **aumento da produtividade,**
- **eficiência energética,**
- **taxa de redução, e**
- **estabilidade da chama, com**
- **redução do volume de gases de escape e das emissões poluentes.**

- A **combustão por oxigénio/combustível** tem sido utilizada em muitas aplicações na **indústria siderúrgica**. Foram relatadas **poupanças de combustível até 60%**.
- Outro exemplo, da **indústria vidreira**, é o Spectrum Glass, que relatou **poupanças de combustível de 50%** quando convertidos de ar/combustível em oxy/combustível nos seus fornos de fusão de vidro

Industrial Applications of Oxygen-Enhanced Combustion

Industry	Furnaces/Kilns	Primary Benefits ^a
Aluminum	Remelting	1, 2
	Coke calcining	1
Cement	Calcining	1
Chemical	Incineration	1, 2, 3, 4
Clay	Brick firing	1, 2, 3
Copper	Smelting	1, 2, 3
	Anode	2
Glass	Regenerative melters	1, 2, 4
	Unit melters	1, 2, 4
	Day tanks	1, 2, 4
Iron and steel	Soaking pits	2, 1
	Reheat furnaces	2, 1
	Ladle preheat	1
	Electric arc melters	1, 2
Petroleum	Forging furnaces	1, 2
	FCC regenerator	1
Pulp and paper	Claus sulfur	1
	Lime kilns	1, 2, 3
	Black liquor	1, 2

Source: Reed, R.J., *North American Combustion Handbook*, 1997.

^a Benefits of oxygen: 1, productivity improvement; 2, energy savings; 3, quality improvement; 4, emissions reduction.

eCombustible Pamesa Plant, Fábrica 100% a hidrogénio



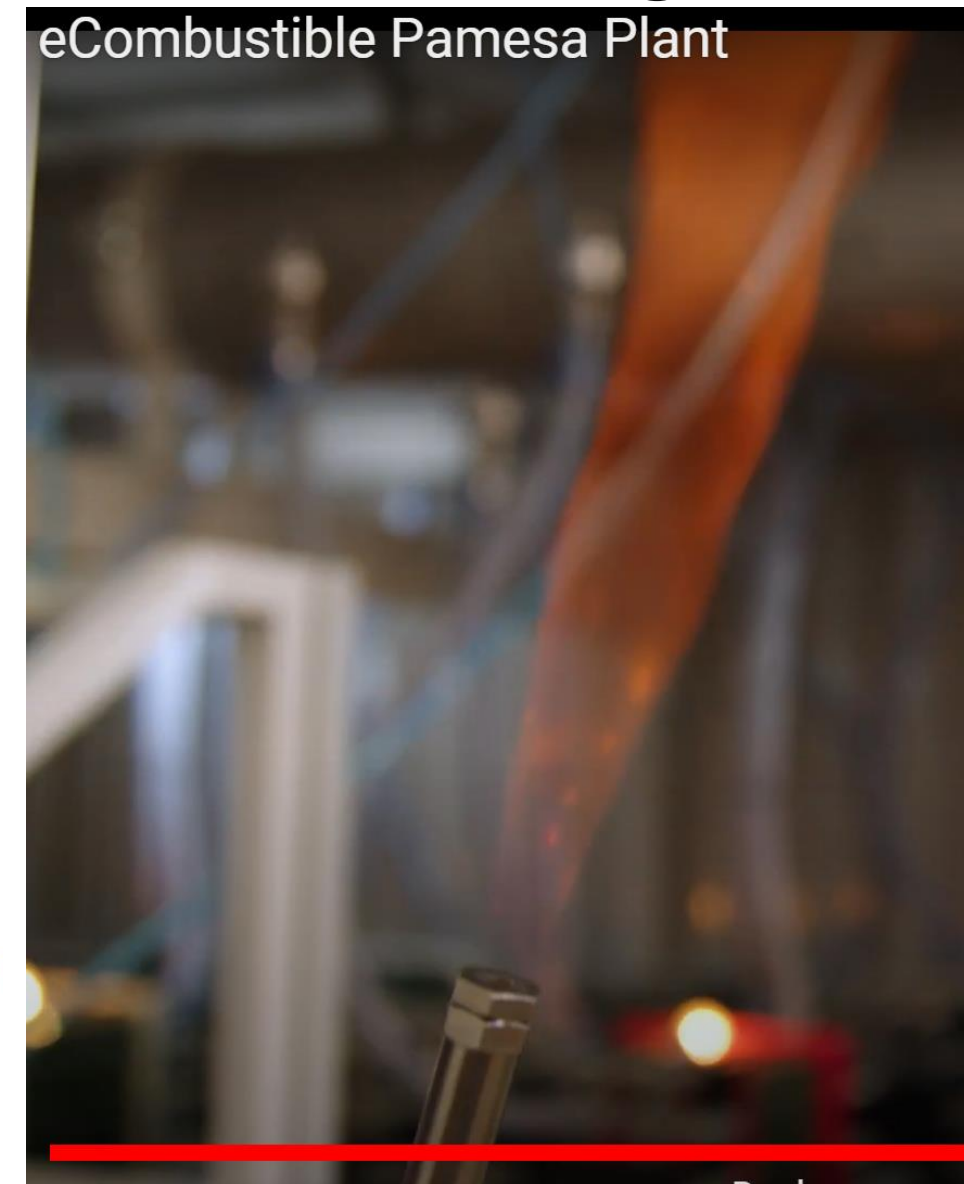
100%
FREE OF
CARBON EMISSIONS

- A Pamesa é a 1^a produtora de cerâmica da Europa e 4^a mundial

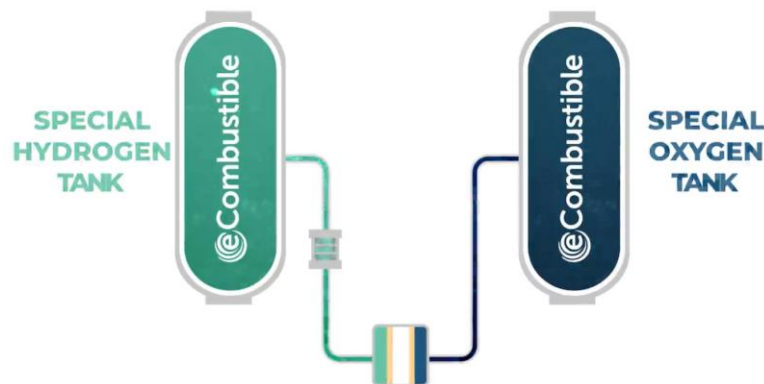




eCombustible Pamesa Plant, Fábrica 100% a hidrogénio



<https://www.ecombustible.com/technology/>





eCombustible Pamesa Plant, Fábrica 100% a hidrogénio

- A Pamesa é a 1ª produtora de cerâmica da Europa e 4ª mundial
- O **e-Combustible** é um novo **combustível à base de hidrogénio** substitui completamente o gás natural e outros combustíveis fósseis em **processos térmicos**, e é 100% livre de **emissões de carbono** e o combustível é diretamente produzido por **eletrólise** no **local da fábrica cerâmica**.
- O processo de combustão do **combustível hidrogénio e oxigénio**, gera apenas emissões de **vapor de água**, sem qualquer emissão de carbono.
- Segundo a Pamesa, a **central substitui os combustíveis fósseis, reduz custos de operação**, investe na **segurança energética** e os combustíveis podem ser configurados para ser utilizados em **equipamentos existentes sem modificações**.
- O presidente do Pamesa Grupo Empresarial, **Fernando Roig**, juntamente com o CEO da Ecocombustível, Jorge Arévalo, apresentaram a **primeira fábrica do mundo**, localizada em **Onda, Valencia, Espanha**, capaz de substituir 100% o gás natural, 22 de junho de 2023.



eCombustible Pamesa Plant, Fábrica 100% a hidrogénio

- **Fernando Roig**, Presidente da **Pamesa**, disse: “Demos um passo importante no Grupo Pamesa porque este projeto representa uma revolução energética ao sermos capazes de gerar nosso combustível à base de hidrogénio em nossas próprias instalações e a um **preço muito inferior** e mais competitivo que o gás natural, **sem subsídios...**” “Este é o início de uma nova era rumo a um futuro mais sustentável e estamos orgulhosos de liderar esta mudança.”
- Nas fábricas na **atomização** é produzida a **matéria-prima** com a qual os produtos cerâmicos são posteriormente fabricados: O processo consiste em misturar água reciclada com argila e depois evaporar aplicando temperatura e obtendo assim o material atomizado com o qual a cerâmica é produzida.
- A **atomização** representa **60%** do total da **energia térmica** consumida pelo setor cerâmico, e é justamente por isso que o Grupo Pamesa a escolheu como ponto de partida na sua transição energética.

Muito obrigado pela atenção

**Espero que minha apresentação tenha sido
clara**

Têm alguma questão?

Rui Costa Neto
IN+ Instituto Superior Técnico

<https://www.linkedin.com/in/rui-costa-neto-60106920>