

Masterclass Hidrogênio Verde:

Disseminando a Cadeia de Valor

Prof. Florian PRADELLE (PUC-Rio)



Por meio de

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit | GIZ GmbH

H2BRASIL



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Sumário

- **Estrutura do Mercado de Hidrogênio**
- **Rotas de produção**
- **Impactos ambientais**
- **Produção de derivados do H₂**
- **Conclusão**

Sumário

- **Estrutura do Mercado de Hidrogênio**
- Rotas de produção
- Impactos ambientais
- Produção de derivados do H₂
- Conclusão

Estrutura do Mercado de Hidrogênio

Demanda mundial anual de H₂: 94 Mt em 2021

- **Quase não se encontra na natureza**
- **Quase 100% de origem fóssil; menos de 0,1% obtido por eletrólise**

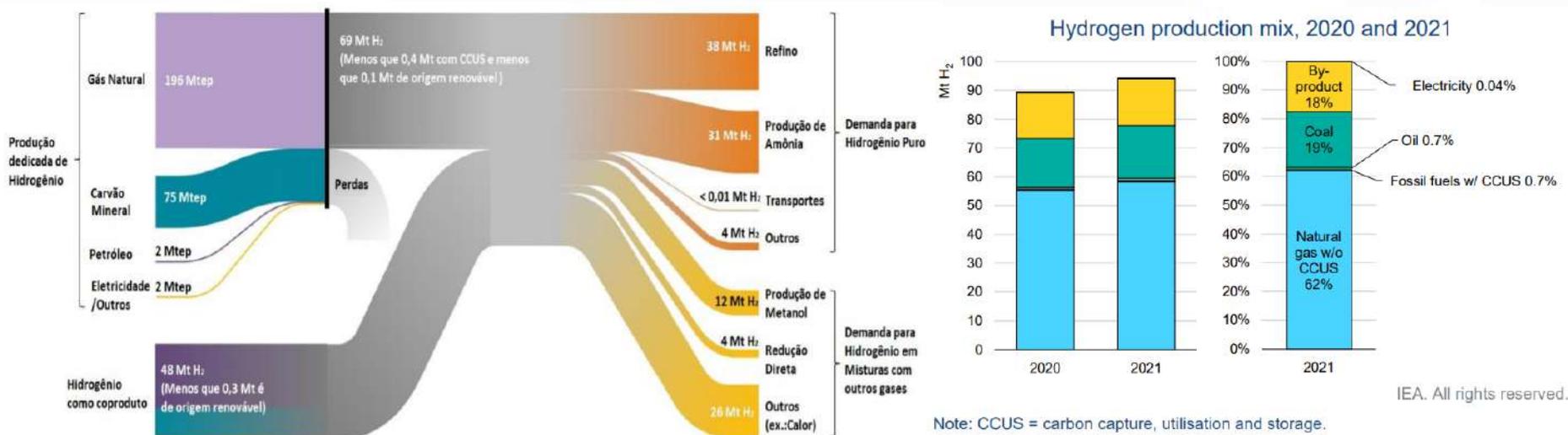


Figura 11 – Cadeia de valor do hidrogênio

Fonte: IEA (2019)

Estrutura do Mercado de Hidrogênio

Arco-íris das cores do H₂

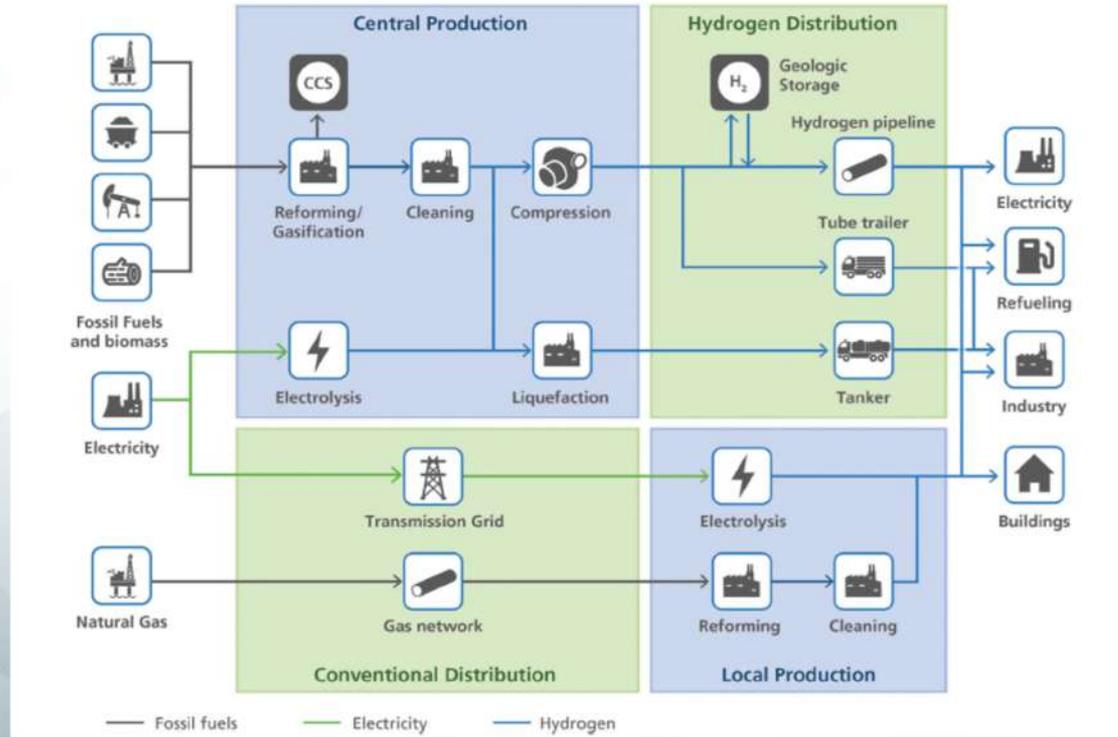
Tabela 1 – Classificação do hidrogênio em escala de cores

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
■	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: Elaborado a partir de IEA (2019a), H2-VIEW (2020), BAKER MCKENZIE (2020) e ZGONNIK (2020).

Estrutura do Mercado de Hidrogênio

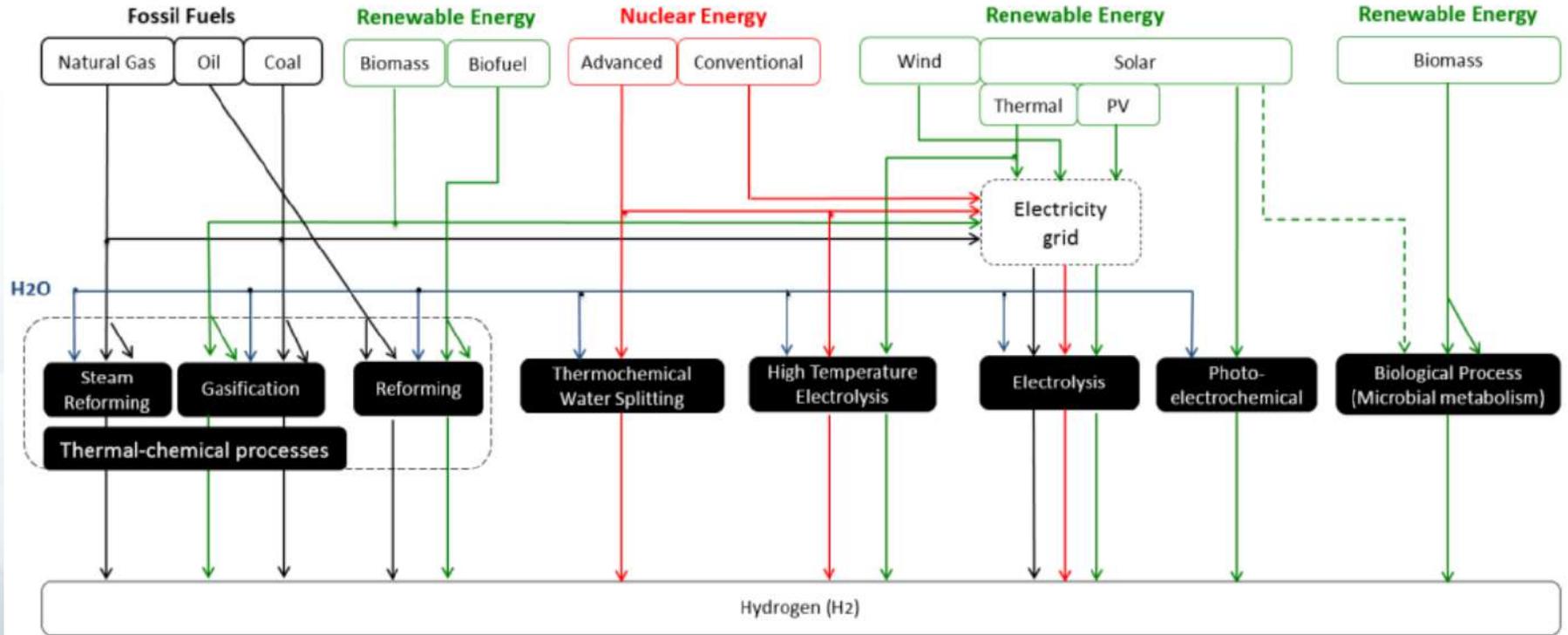
Produção centralizada vs distribuída



Sumário

- Estrutura do Mercado de Hidrogênio
- **Rotas de produção**
- Impactos ambientais
- Produção de derivados do H₂
- Conclusão

Rotas de produção – Visão geral



Rotas de produção – Eletrólise

Eletrólise da água

- **Processo conceitualmente simples e comercial desde 1890 (eletrólise alcalina)**
- **Fluxo de corrente contínua através de uma solução aquosa entre 2 eletrodos (anodo e catodo) separados por um eletrólito**
- **Equação global: $\text{H}_2\text{O}_{(\text{aq})} = \text{H}_{2(\text{g})} + \frac{1}{2} \text{O}_2$**
- **3 tecnologias:**

Alcalina

PEM (*Proton Exchange Membrane*)

SOEC (*Solid Oxide Electrolysis Cell*)

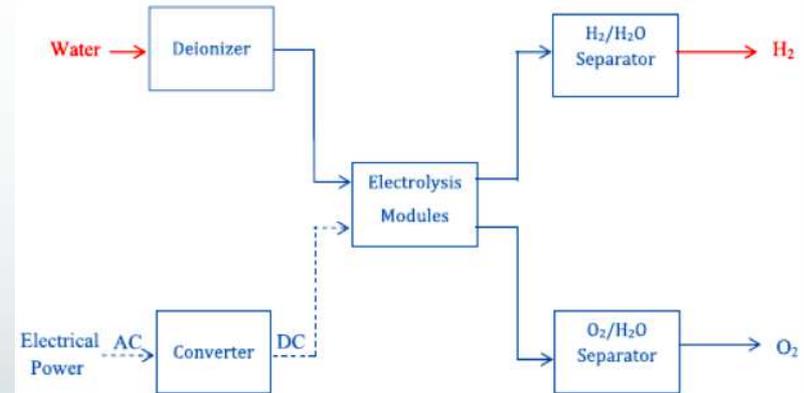


Fig. 19. Flow diagram of the water electrolysis process.

Rotas de produção – Eletrólise

Diferentes tipos de eletrolisadores

Alcalina

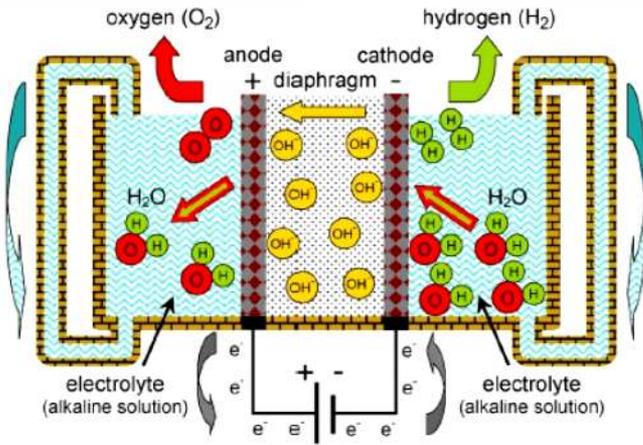


Fig. 4. Scheme of the operating principle of an alkaline electrolysis cell [44].

PEM

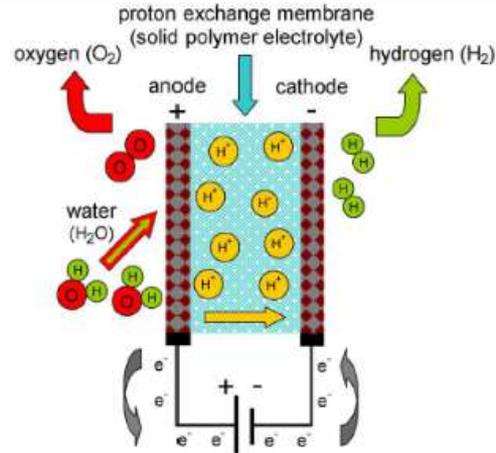


Fig. 5. Scheme of the operating principle of a proton exchange membrane (PEM) electrolysis cell [44].

SOEC

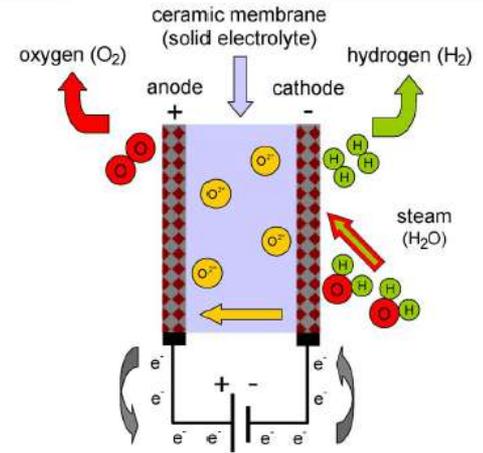


Fig. 6. Scheme of the operating principle of a solid oxide (SOE) electrolysis cell [44].

Rotas de produção – Eletrólise

Características dos eletrolisadores

Tipo de tecnologia	Alcalina	PEM	SOEC
Eletrólito	20-40 %m de KOH	Membrana polimérica	Cerâmico
Portador de carga	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Temperatura de operação (°C)	60 - 150	50 - 90	600 – 1000
Pressão de operação (bar)	10 - 30	20 - 50	1 - 15
Densidade de corrente (A.cm ⁻²)	0,2 - 0,4 / 1,2	0,6 – 2,0	0,3 – 2,0
Área da célula (m ²)	< 4	< 0,3	< 0,01
Menor faixa dinâmica (%)	10-10 / < 10	0 – 10	> 30
Pureza do gás	> 99,50 / > 99,95	99,99	99,90
Tempo de resposta	Segundos	Milissegundos	Segundos
Duração da partida a fria (min)	< 60 / < 1-50%	< 20	< 60
Vida útil (h)	60.000 – 90.000	40.000 – 80.000	< 20.000
Maturidade	Madura	Comercial	Demonstração
Eficiência (kWh _{el} / kg de H ₂)	50-78	50-83	45-55
Custo de capital (US\$.kW ⁻¹)	500 – 1 400	1 100 – 1 800	2 800 – 5 600

Rotas de produção – Eletrólise

**Eletrólise da água + Eletricidade renovável (solar, eólica, hídrica, ...)
= Produção de H₂ sustentável (H₂ verde)**

Desafios para o H₂ de baixo custo

- **Custo elevado da energia elétrica;**
- **Aumento da eficiência do processo de eletrólise (kWh/kg H₂).**

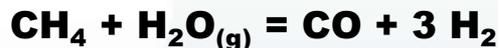
Oportunidades

- **Novas tecnologias de eletrolisadores;**
- **Otimização (intermitências) da produção de EE por fontes renováveis.**

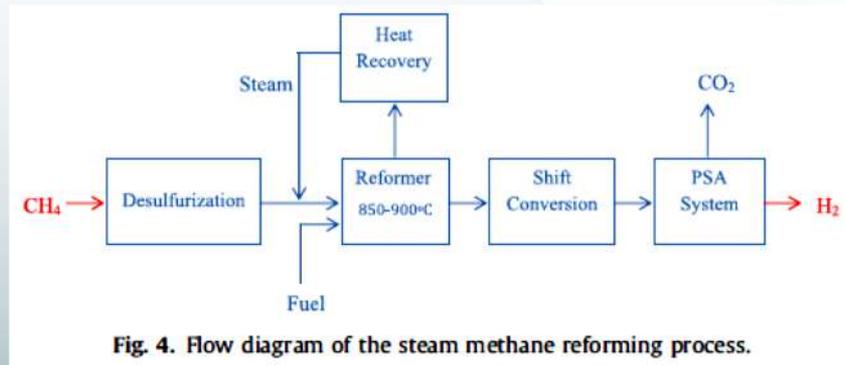
Rotas de produção – Reforma de metano

- **GN**, hidrocarbonetos leves, hidrocarbonetos oxigenados, metanol, **etanol**, **biogás**
- **Alta pressão (35 bar) e alta demanda energética (30-35% do GN)**
- **Eficiência 70 a 85%**

Para o **metano** (*steam methane reforming – SMR*)

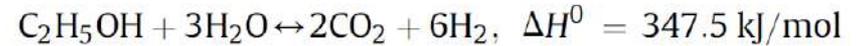


CCS - Captura de CO₂ (transição)

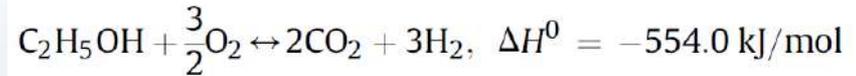
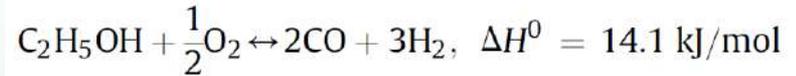


Rotas de produção – Reforma de etanol

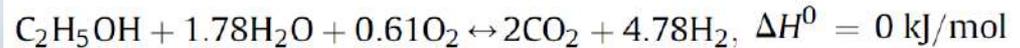
- **Reforma a vapor do etanol (SR)**



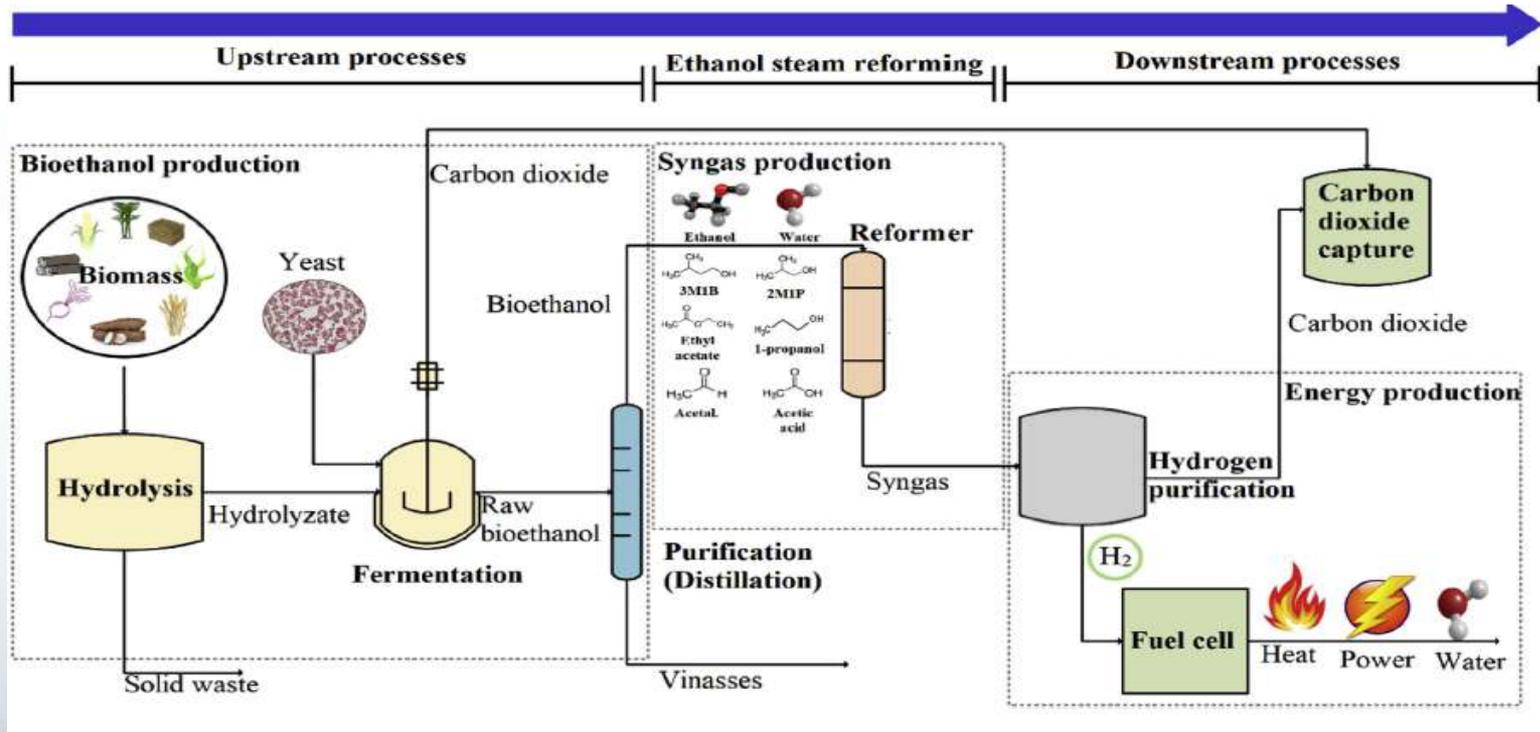
- **Reforma por oxidação parcial (POx)**



- **Reforma autotérmica (ATR)**



Rotas de produção – Reforma de etanol



Rotas de produção – Desafios da reforma

- **Aumentar a eficiência dos catalisadores;**
- **Desenvolver processos de baixo custo voltados para a purificação do reformado;**
- **Melhorar a qualidade das matérias primas utilizadas nos processos (requer desulfurização para evitar o envenenamento dos catalisadores);**
- **Otimizar as operações para atendimento de uma demanda variável;**
- **Desenvolver sistemas modulares e de baixo custo;**
- **Automatizar os processos;**
- **Aumentar a confiabilidade dos equipamentos;**
- **Minimizar as perdas energéticas.**

Rotas de produção – Gaseificação

- **Processo maduro tecnologicamente;**
- **Operação acima de 700°C, entre 1 e 30 bar, sem combustão e na presença (controlada) de O₂ e vapor;**
- **Eficiência em função da qualidade da biomassa: 25-52%;**
- **Disputas sobre uso da terra (energia vs alimentos).**

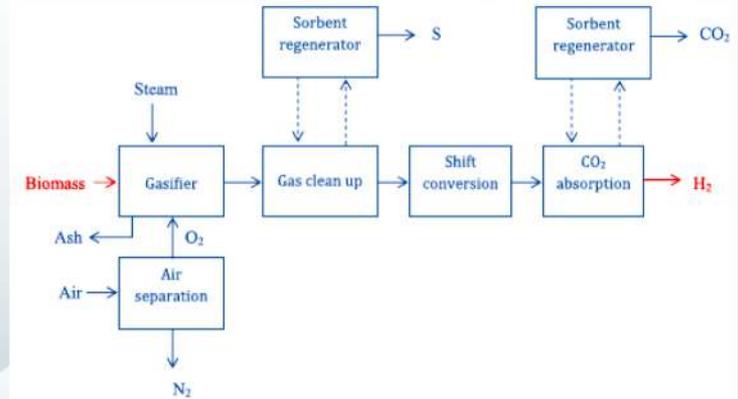
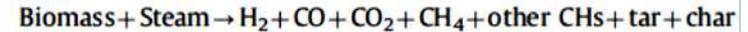
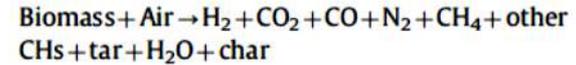


Fig. 12. Flow diagram of the biomass gasification process.

Rotas de produção – Desafios da gaseificação

- **Desenvolver sistemas de baixo custo para separação e purificação do gás de síntese;**
- **Melhorar a tolerância dos catalisadores às impurezas presentes na matéria-prima;**
- **Reduzir o custo de armazenamento, preparação e manuseio da biomassa;**
- **Aumentar a disponibilidade de biomassa;**
- **Desenvolver alternativas para captura e armazenamento do CO₂ gerado no processo.**

Rotas de produção – Processos térmicos

Pirólise da biomassa

- **Decomposição na ausência de O_2 , seguida de reforma a vapor;**
- **Eficiência entre 35-50%.**

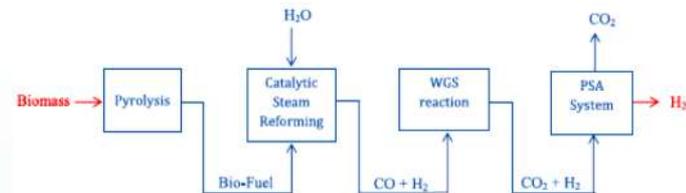


Fig. 10. Flow diagram of the biomass pyrolysis process.

Decomposição termoquímica da água

- **Em desenvolvimento desde 1970 na crise do petróleo;**
- **Temperatura entre 500 e 2000°C;**
- **Eficiência entre 14-21% (solar térmico) e aproximadamente 45% (nuclear).**

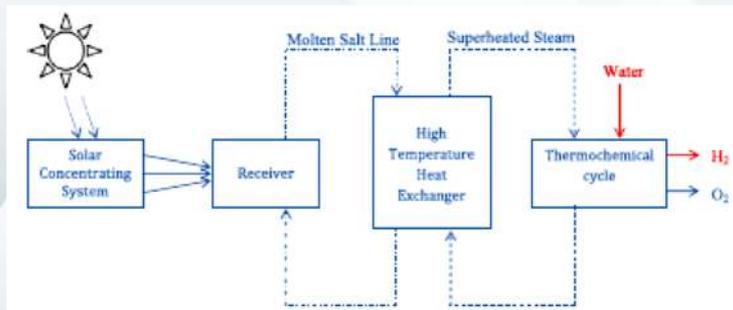


Fig. 20. Flow diagram of the solar-based thermochemical water splitting process.

Rotas de produção - Tecnologias fotolíticas

Decomposição fotoeletrolítica

- **Utiliza fotoeletrodos (semicondutores) para, na presença da radiação solar, atingir a tensão de decomposição da H_2O .**

- **Problema: fotocatalisador pouco eficiente (0,06%)**

Decomposição fotobiológica

- **Utiliza o metabolismo de algas e bactérias (microorganismos fotossensíveis) para produção de H_2 na presença de uma fonte luminosa.**
- **Problema: penetração da luz na água, demanda de grande área, contaminação com metais, disponibilidade de ácido (eficiência de conversão = 0,1%)**

Fontes: Dutta, 2014; Nikolaisi, 2017

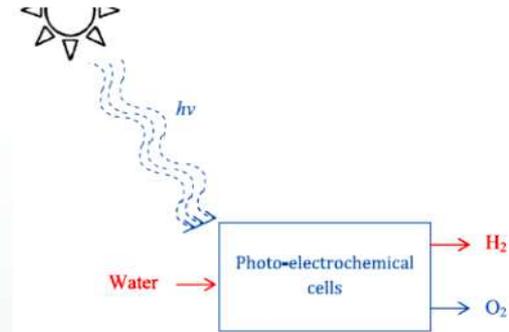


Fig. 21. Flow diagram of the photo-electrolysis process.

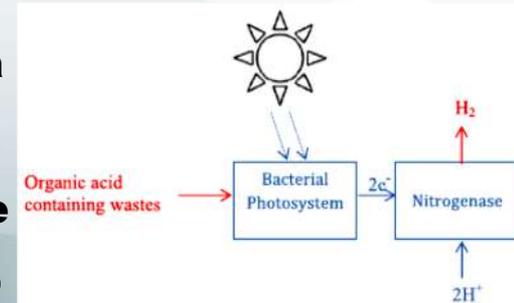


Fig. 16. Flow diagram of the photofermentation process.

Rotas de produção – Maturidade e custos

Leque amplo de tecnologias ...

Table 5
Comparison of the different hydrogen production processes.

Process	Efficiency (%)	Major advantages	Major disadvantages
SR	74–85	Most developed technology, existing infrastructure.	CO ₂ byproduct, dependence on fossil fuels.
POX	60–75	Proven technology, existing infrastructure.	CO ₂ byproduct, dependence on fossil fuels.
ATR	60–75	Proven technology, existing infrastructure.	CO ₂ byproduct, dependence on fossil fuels.
CHs pyrolysis	–	Emission-free, reduced-step procedure.	Carbon byproduct, dependence on fossil fuels.
Biomass pyrolysis	35–50	CO ₂ -neutral, abundant and cheap feedstock.	Tar formation, varying H ₂ content due to seasonal availability and feedstock impurities.
Biomass gasification	–	CO ₂ -neutral, abundant and cheap feedstock.	Tar formation, varying H ₂ content due to seasonal availability and feedstock impurities.
Bio-photolysis	10	CO ₂ -consumed, O ₂ is the only byproduct, operation under mild conditions.	Requires sunlight, low H ₂ rates and yields, requirement of large reactor volume, O ₂ sensitivity, high raw material cost.
Dark fermentation	60–80	CO ₂ -neutral, simple, can produce H ₂ without light, contributes to waste recycling, no O ₂ limitation.	Fatty acids removal, low H ₂ rates and yields, low conversion efficiency, requirement of large reactor volume.
Photofermentation	0.1	CO ₂ -neutral, contributes to waste recycling, can use different organic wastes and wastewaters.	Requires sunlight, low H ₂ rates and yields, low conversion efficiency, requirement of large reactor volume, O ₂ sensitivity.
Electrolysis	40–60	No pollution with renewable sources, proven technology, existing infrastructure, abundant feedstock, O ₂ is the only byproduct, contributes to RES integration as an electricity storage option.	Low overall efficiency, high capital costs.
Thermolysis	20–45	Clean and sustainable, abundant feedstock, O ₂ is the only byproduct.	Elements toxicity, corrosive problems, high capital costs.
Photo-electrolysis	0.06	Emission-free, abundant feedstock, O ₂ is the only byproduct.	Requires sunlight, low conversion efficiency, non-effective photocatalytic material.

Rotas de produção – Maturidade e custos

... com níveis de maturidade e custos diferentes

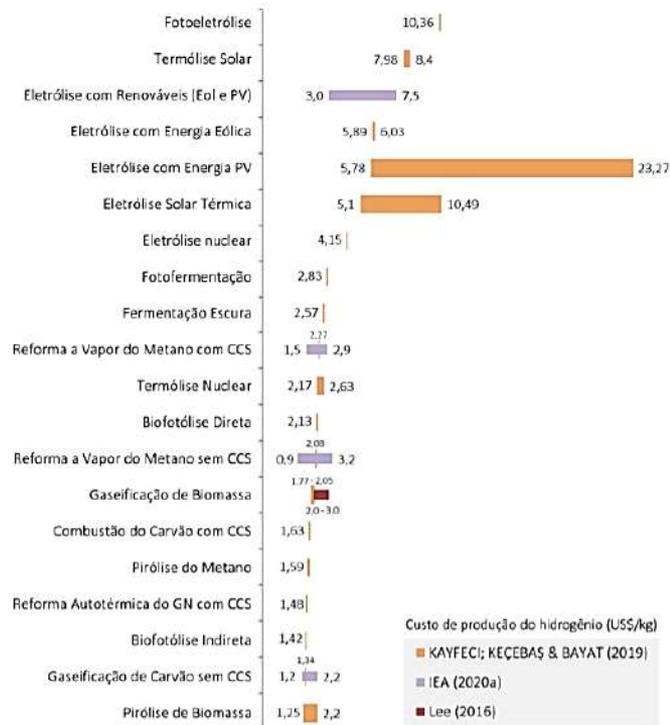
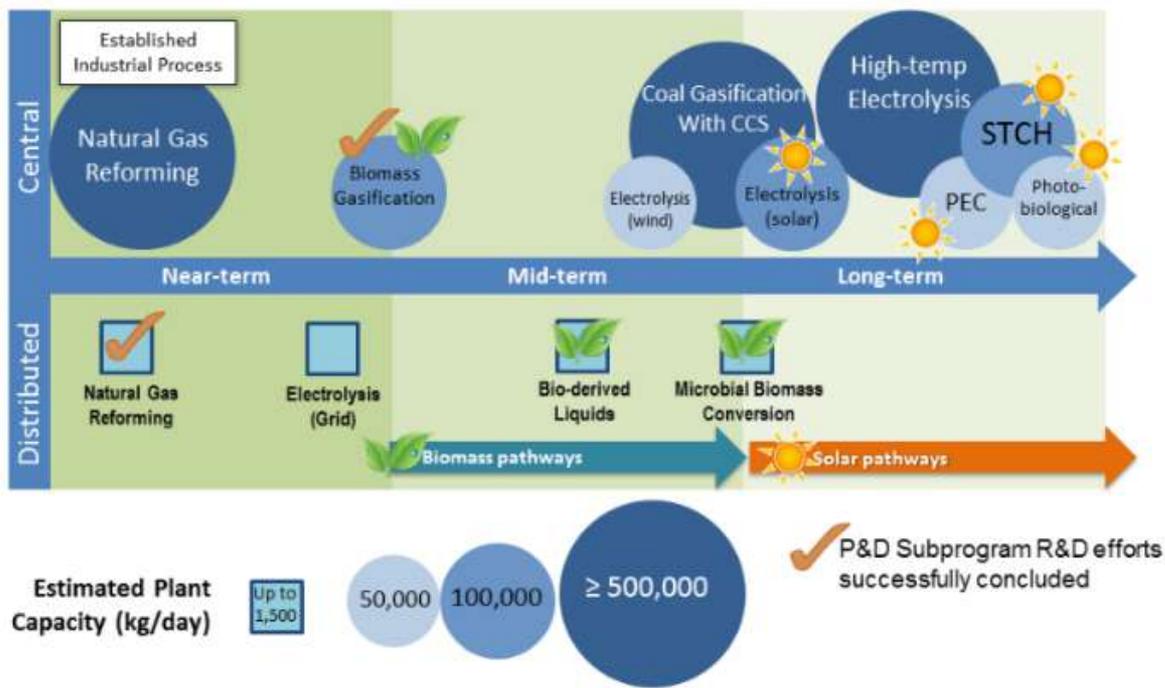
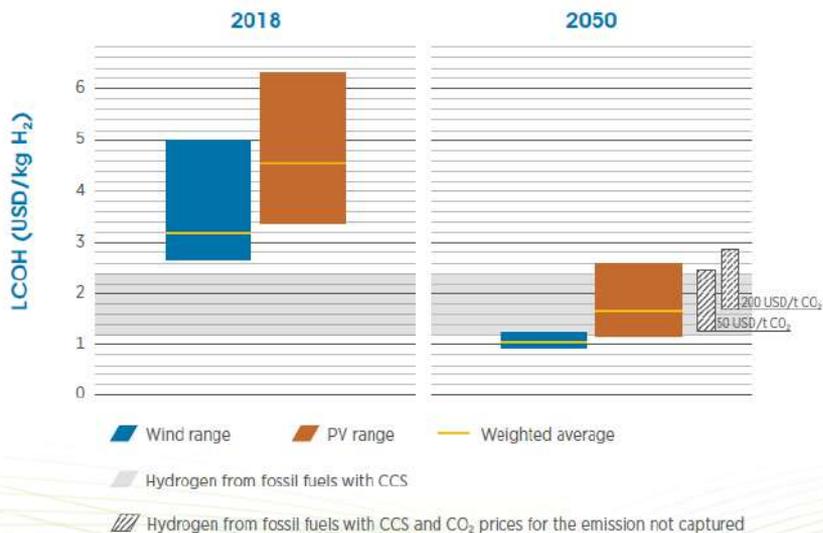


Figura 6 – Faixas de custos da produção de hidrogênio

Rotas de produção – Maturidade e custos

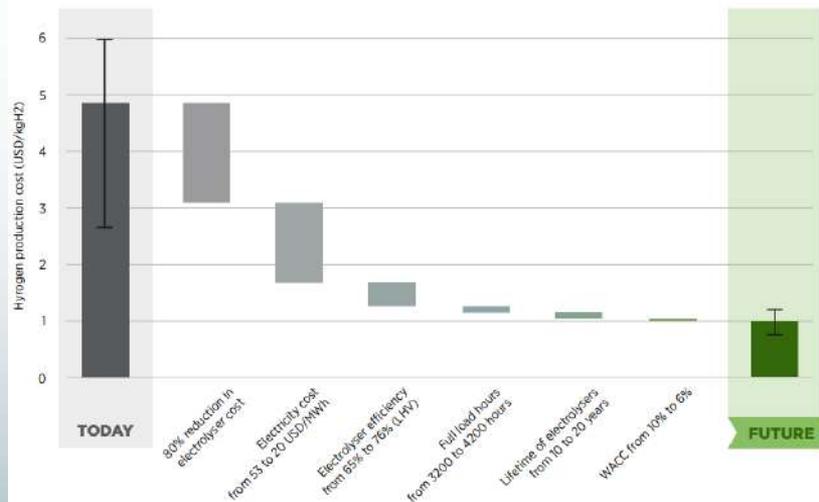
... com uma competitividade a conquistar

Figure 11: Cost of producing hydrogen from renewables and fossil fuels, 2018 and 2050



Source: IRENA analysis

Figure ES1. A combination of cost reductions in electricity and electrolysers, combined with increased efficiency and operating lifetime, can deliver 80% reduction in hydrogen cost.



Note: 'Today' captures best and average conditions. 'Average' signifies an investment of USD 770/kilowatt (kW), efficiency of 65% (lower heating value – LHV), an electricity price of USD 53/MWh, full load hours of 3200 (onshore wind), and a weighted average cost of capital (WACC) of 10% (relatively high risk). 'Best' signifies investment of USD 130/kW, efficiency of 76% (LHV), electricity price of USD 20/MWh, full load hours of 4200 (onshore wind), and a WACC of 6% (similar to renewable electricity today).

Sumário

- Estrutura do Mercado de Hidrogênio
- Rotas de produção
- **Impactos ambientais**
- Produção de derivados do H₂
- Conclusão

Impactos Ambientais - ACV

Avaliação de ciclo de vida (ACV)

- Enquadrado por normas (ISO14040 e ISO14044)

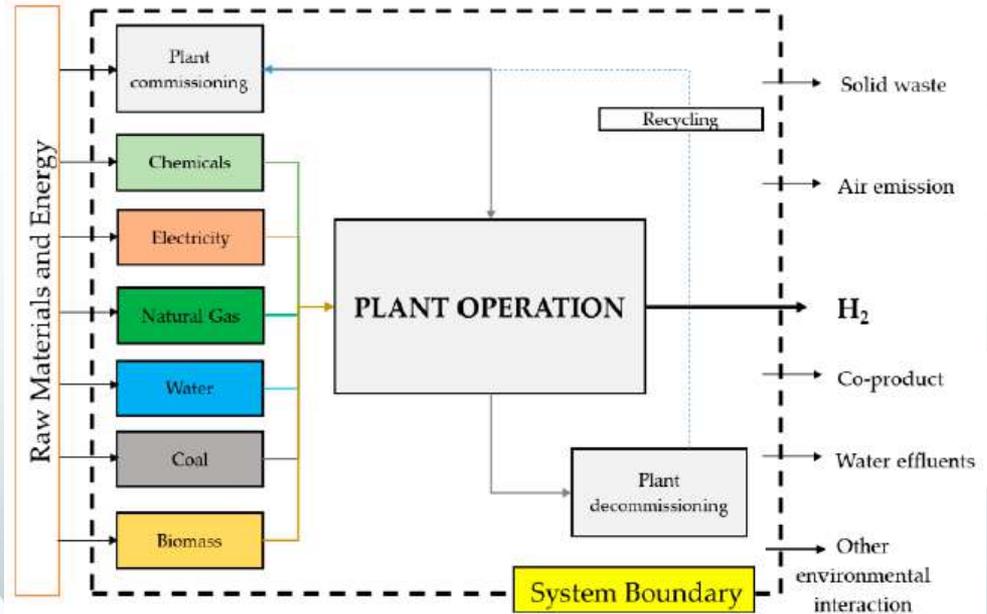
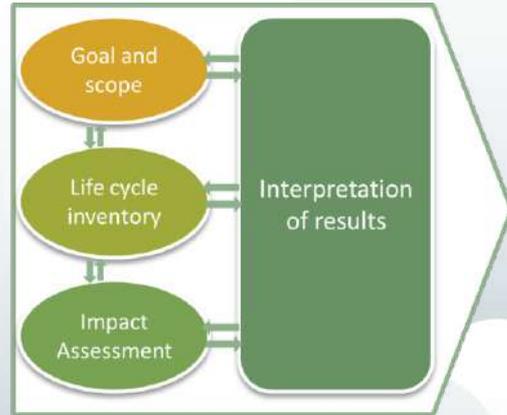


Figure 1. Generic illustration of life cycle analysis (LCA) process and graphical definition of system boundary of evaluated hydrogen pathways (modified from [23]).

Impactos Ambientais - ACV

Table 2. Midpoint life-cycle environmental indicators of hydrogen production pathways (values for 1 kg of H₂).

Impact Category ²	Unit	H ₂ Production Pathways ¹											
		SMR	CG	BMG	BDL-E-Corn	BDL-E-Wheat	E-PEM	E-PEM-R	E-SOEC	E-SOEC-R	DF-MEC w/out ER	DF-MEC w/ER	DF-MEC w/H ₂ Recovery
GWP	kg CO ₂ -eq	12.13	24.2	2.67	9.193	14.02	29.54	2.21	23.32	5.10	16.29	6.60	14.57
ODP	kg CFC-11-eq	2.99×10^{-6}	3.35×10^{-6}	2.18×10^{-5}	1.70×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.22×10^{-5}	1.40×10^{-6}	9.36×10^{-6}	2.16×10^{-6}	4.16×10^{-5}	3.79×10^{-5}	4.11×10^{-5}
IRP	kBq Co-60-eq	0.501	1.188	0.406	0.835	0.87	19.33	0.52	12.8505	0.3142	7.53	2.11	7.50
EOFP	kg NO _x -eq	0.0085	0.055	0.00375	0.037	0.0424	0.0487	0.0039	0.0349	0.0050	0.0247	0.01055	0.024
PMFP	kg PM _{2.5} -eq	0.002	0.039	0.00284	0.007	0.021	0.0337	0.0041	0.0222	0.0025	0.0172	0.008266	0.016989
HOFP	kg NO _x -eq	0.0089	0.055	0.00382	0.037	0.043	0.0492	0.0041	0.0353	0.0052	0.025	0.010696	0.023983
TAP	kg SO ₂ -eq	0.0087	0.139	0.03706	0.124	0.112	0.1087	0.0118	0.0724	0.0078	0.104	0.074636	0.103
FEP	kg P-eq	0.0007	0.008	0.00081	0.003	0.00568	0.0242	0.0014	0.0162	0.0009	0.0098	0.00312	0.009749
TETP	kg 1,4-DCB-eq	0.0005	0.003	0.0003	0.007	0.142	0.012	0.0048	0.0078	0.0030	0.0041	0.001442	0.003977
FETP	kg 1,4-DCB-eq	0.0208	0.268	0.01875	0.162	0.646	0.7519	0.15	0.4974	0.097	0.268	0.080308	0.27
METP	kg 1,4-DCB-eq	0.0423	0.377	0.02706	0.227	0.483	1.07	0.22	0.7111	0.145	0.384	0.12	0.38
HTP _c	kg 1,4-DCB-eq	0.0803	0.64	0.0433	0.128	0.357	1.58	0.43	1.1213	0.356	0.565	0.16	0.55
HTP _{nc}	kg 1,4-DCB-eq	21.36	277.6	19.69	284.129	268.94	764.98	157.25	507.42	102.26	272.6	82.10	269.3
LOP	m ² a crop-eq	0.008272	0.235	0.02062	23.518	20.2	0.22	0.05	0.1525	0.04	0.104	0.043	0.102467
SOP	kg Cu-eq	0.00389	0.004	0.00186	0.028	0.04	0.12	0.16	0.0632	0.09	0.0153	0.006	0.014159
FFP	kg oil-eq	4.45	4.914	0.655	1.524	3.042	7.81	0.62	6.5058	1.72	4.38	1.68	3.78
WCP	m ³ consumed	5.77	13.1	4.94	2.246	3.875	223.39	16.40	146.82	8.82	84.9	23.98	84.50
WSF	m ³	247.5	570.2	212.4	94.61	149.4	9604.3	629.8	6312.3	379.3	3650.2	1030.8	3632.9

¹ SMR: Steam methane reforming; CG: Coal gasification; BMG: Biomass Gasification; BDL: Biomass Reformation; E-PEM: Electrolysis with Proton exchange membrane (PEM); E-PEM-R: Electrolysis with Proton exchange membrane with wind energy; E-SOEC: Electrolysis with Solid oxide electrolysis cells (SOEC); E-SOEC-R: Electrolysis with Solid oxide electrolysis cells with wind energy; DF-MEC: Dark fermentation + microbial electrolysis cell (MEC) without energy recovery, with energy recovery and H₂ recovery. ² Global warming potential (GWP); Stratospheric ozone depletion (ODP); Ionizing radiation (IRP); Photochemical oxidant formation: human health (HOFP); Photochemical oxidant formation: ecosystem quality (EOFP); Human toxicity potential: cancer (HTP_c); Human toxicity potential: non-cancer (HTP_{nc}); Terrestrial ecotoxicity freshwater ecotoxicity (TETP); Freshwater ecotoxicity (FETP); Marine ecotoxicity (MAETP); Freshwater eutrophication potential (FEP); Fine particulate matter formation (PMFP); Terrestrial acidification (TAP); Land use (LOP); Water consumption potential (WCP); Mineral resource scarcity (SOP); Fossil resource scarcity (FFP); Water Scarcity Footprint (WSF).

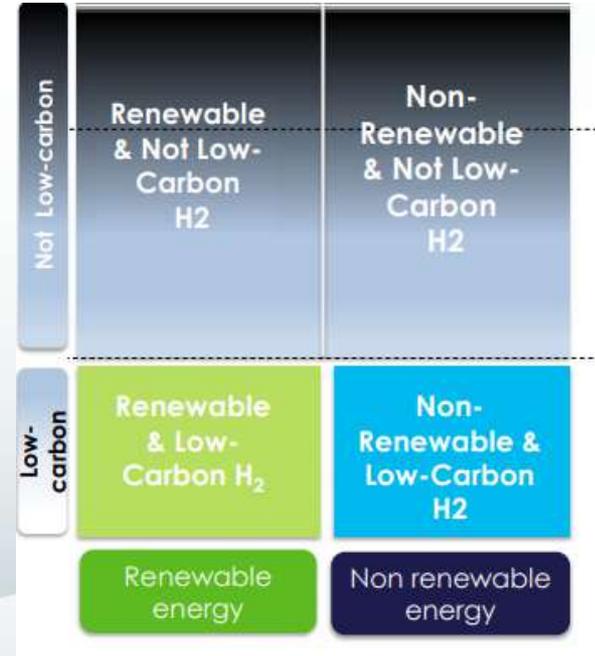
Impactos Ambientais - Certificação

- **Papel importante na transição energética, com a necessidade de uma estrutura padronizada;**
- **Existem 13 processos de certificação de H₂ atualmente (fonte: IRENA)**
- **Baseada nas praticas dos sistemas de Garantia de Origem (GO) Europeu e dos Certificados de energia renovável (REC) norte-americano;**
- **O CertifHy GO fornece informações sobre a planta de produção de H₂, tempo de produção, fonte de energia e intensidade do GHG, atestando ser o H₂ Verde ou de baixo teor de carbono com base nos rótulos definidos**

Impactos Ambientais - Certificação

- **Certificação Internacional de Energia Renovável (I-REC)**

- **Baseado na intensidade do GHG e a origem da energia**
- **Valor de referência: 36,4 gCO₂eq/MJ (40% do valor na produção de H₂ via gás natural);**
- **H₂ verde: Se o H₂ for produzido a partir de fontes de energia renováveis (biogás, hídrica, eólica, solar, ...);**
- **H₂ de baixo carbono: H₂ proveniente de fontes de energia não renováveis de baixo carbono (por exemplo, nuclear, fóssil com CCS).**



Sumário

- Estrutura do Mercado de Hidrogênio
- Rotas de produção
- Impactos ambientais
- **Produção de derivados do H2**
- Conclusão

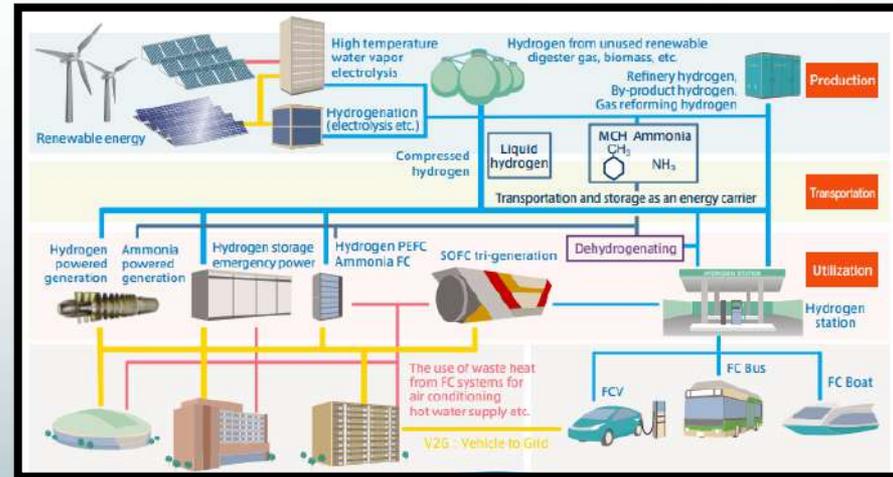
Produção de derivados do H₂ - Amônia Verde

Amônia

- Grande parte da amônia produzida hoje em dia é através do processo Haber-Bosch a partir de gás natural



- Carreador ou uso direto para geração, no setor de transporte por combustão direta em um motor ou por reação química com oxigênio em uma célula de combustível;
- É vista como uma solução no setor marítimo, onde grande quantidade de energia é necessária por longos períodos de tempo e baterias não são práticas ou econômicas.



Produção de derivados do H₂ - Amônia Verde

Processos de produção de amônia

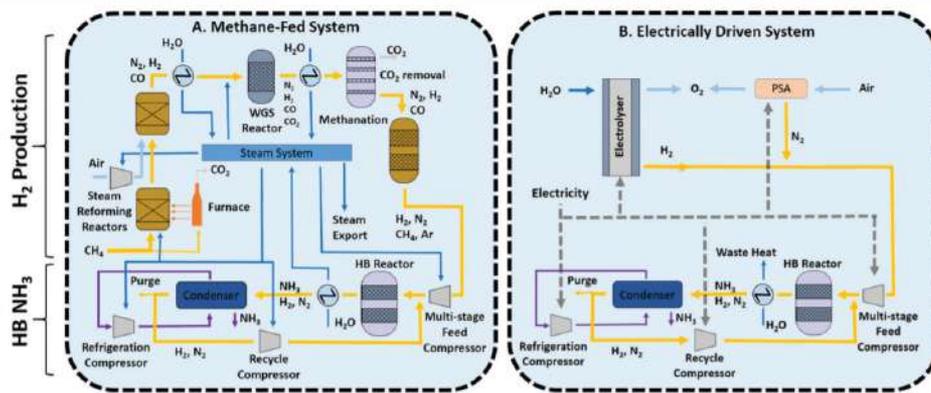
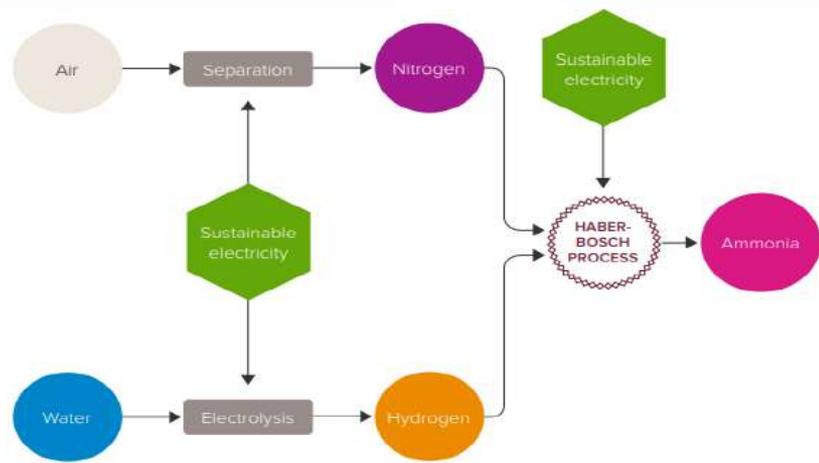


Fig. 1 Schematic diagram of (A) a typical conventional methane-fed Haber Bosch process and (B) an electrically powered alternative. Hydrogen and ammonia production stages are separated for illustration purposes to identify similarities and differences between both technologies. Yellow lines are process gas, dark blue lines are water/steam, light blue lines are air, purple lines are ammonia, and dashed lines are electricity.



Produção de derivados do H₂ - Combustíveis Sintéticos e E-Fuels

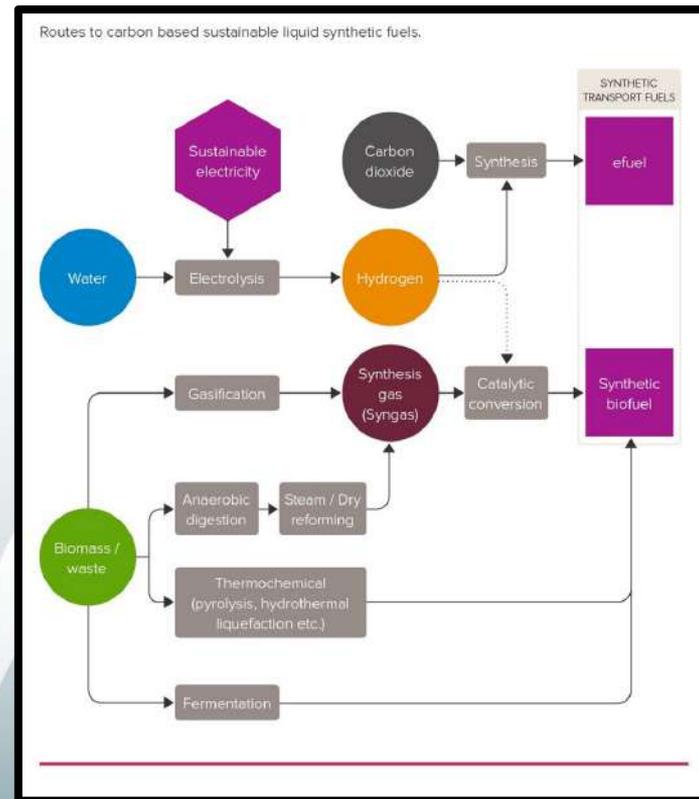
Combustíveis sintéticos (PtL) e E-Fuels

• Vantagens

- **Combustíveis drop-in**
- **Densidade energética similar aos combustíveis atuais**
- **Uso das infraestruturas para transporte, armazenamento e distribuição**
- **Alternativa a eletrificação**

• Desvantagens

- **Alto custo**
- **Perdas elevadas devido a quantidade elevada de processos envolvidos**
- **Requer adaptação dos processos atuais de síntese de metanol ou da reação de Fisher-Tropsch**

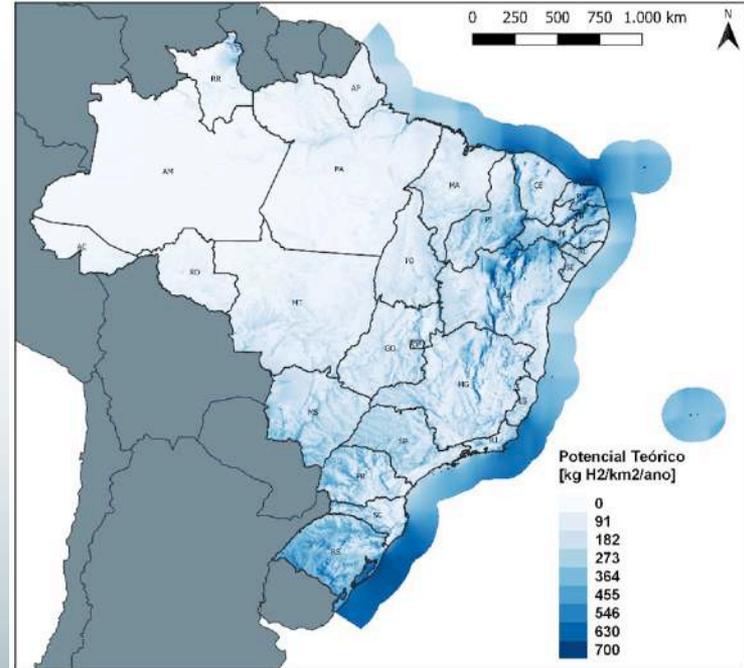
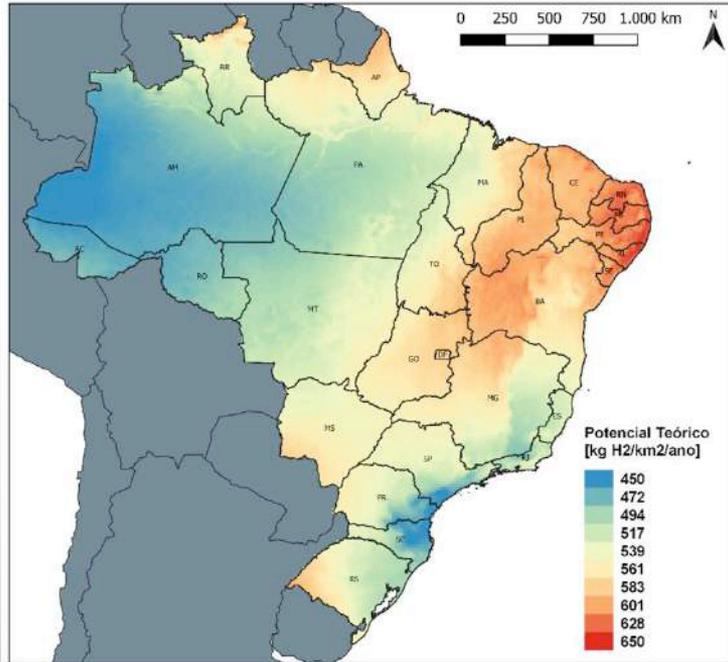


Sumário

- Estrutura do Mercado de Hidrogênio
- Rotas de produção
- Impactos ambientais
- Produção de derivados do H₂
- **Conclusão**

Conclusão

Brasil: um futuro produtor mundial de H₂ verde?

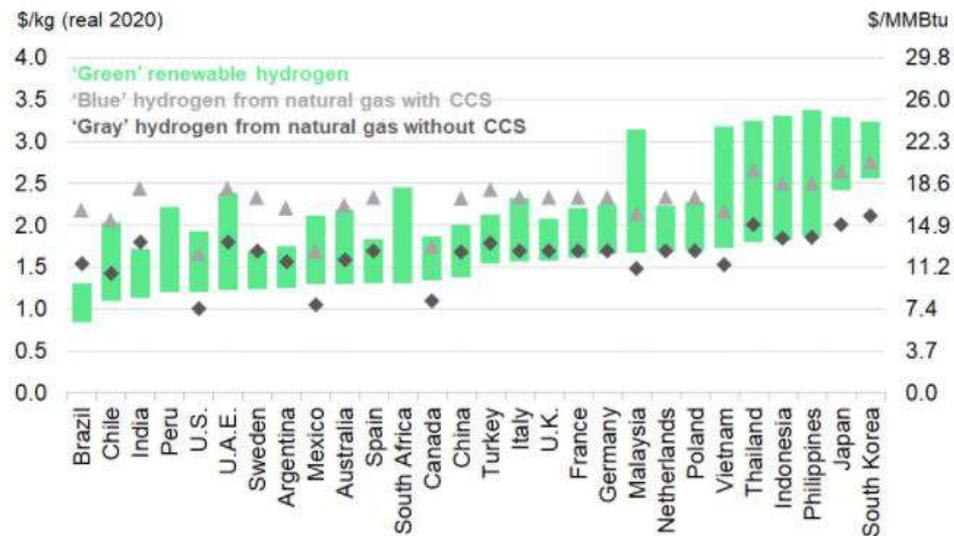


Mapa do potencial teórico de produção de hidrogênio a partir de eletrólise com energia solar (a esquerda) e energia eólica onshore e offshore (a direita).

Conclusão

Brasil: um futuro produtor mundial de H₂ verde?

'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.

Obrigado pela atenção!

Prof. Florian Pradelle
pradelle@puc-rio.br



DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA
MECÂNICA
PUC - RIO



Por meio de:



H2BRASIL

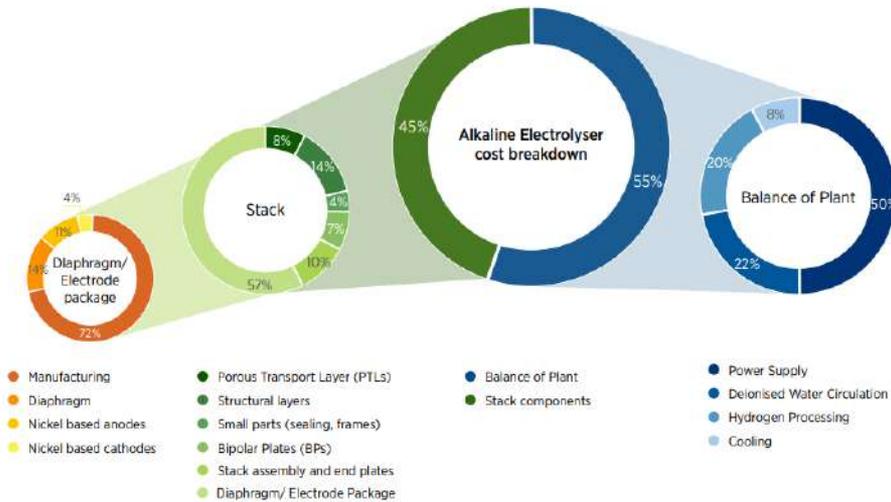


MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Rotas de produção – Eletrólise

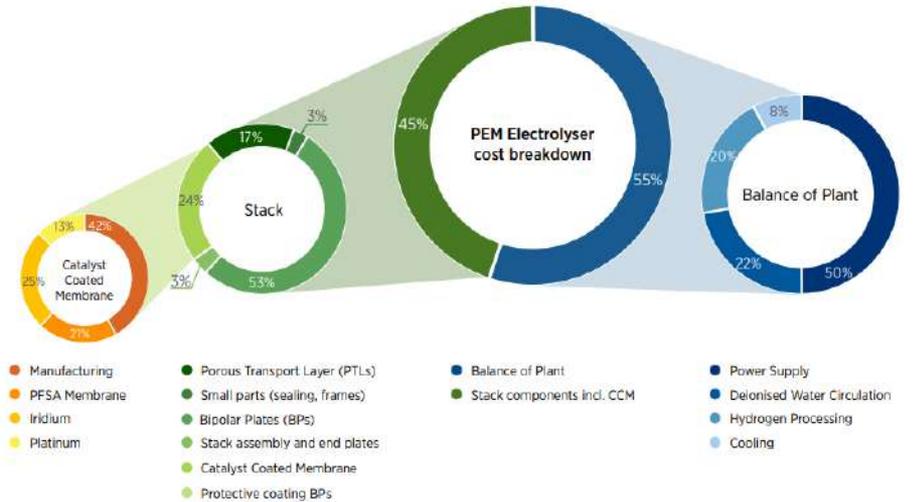
Figure 20. Cost breakdown for 1 MW alkaline electrolyser, moving from full system, to stack, to membrane electrode assembly (MEA).



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

Based on IRENA analysis.

Figure 18. Cost breakdown for a 1 MW PEM electrolyser, moving from full system, to stack, to CCM.

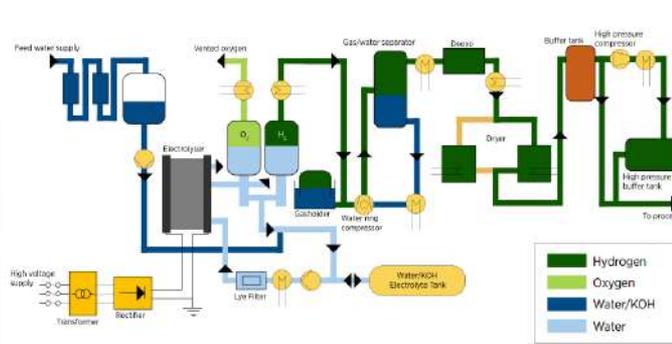


Note: The specific breakdown varies by manufacturer, application and location, but values in the figure represent an average.

Based on IRENA analysis.

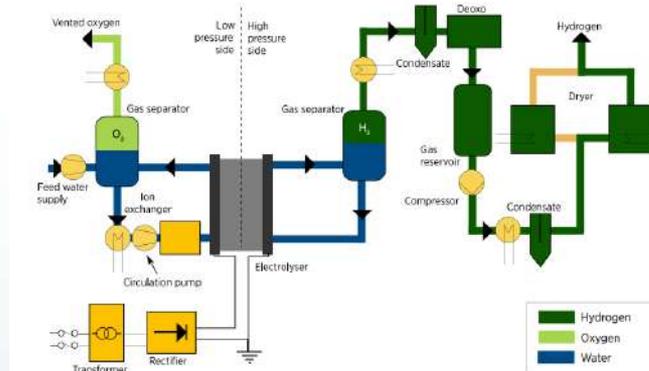
Rotas de produção – Eletrólise

Figure 7. Typical system design and balance of plant for an alkaline electrolyser.



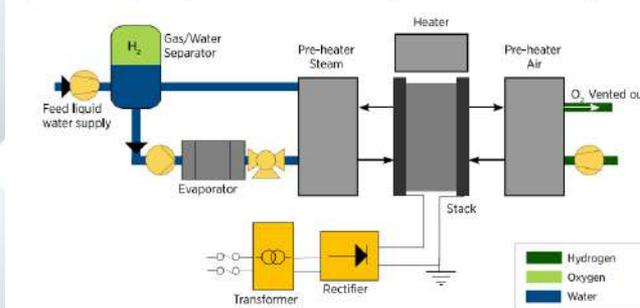
Note: This configuration is for a generic system and might not be representative of all existing manufacturers.
Based on IRENA analysis.

Figure 8. Typical system design and balance of plant for a PEM electrolyser.



Note: This configuration is for a generic system and might not be representative of all existing manufacturers.
Based on IRENA analysis.

Figure 10. Typical system design and balance of plant for a solid oxide electrolyser.



Note: This configuration is for a generic system and might not be representative of all existing manufacturers.
Based on IRENA analysis.