

Masterclass Hidrogênio Verde:

Fase de Distribuição do
Hidrogênio
Verde

Sayonara Eliziário, Gesel/UFPB



H2BRASIL

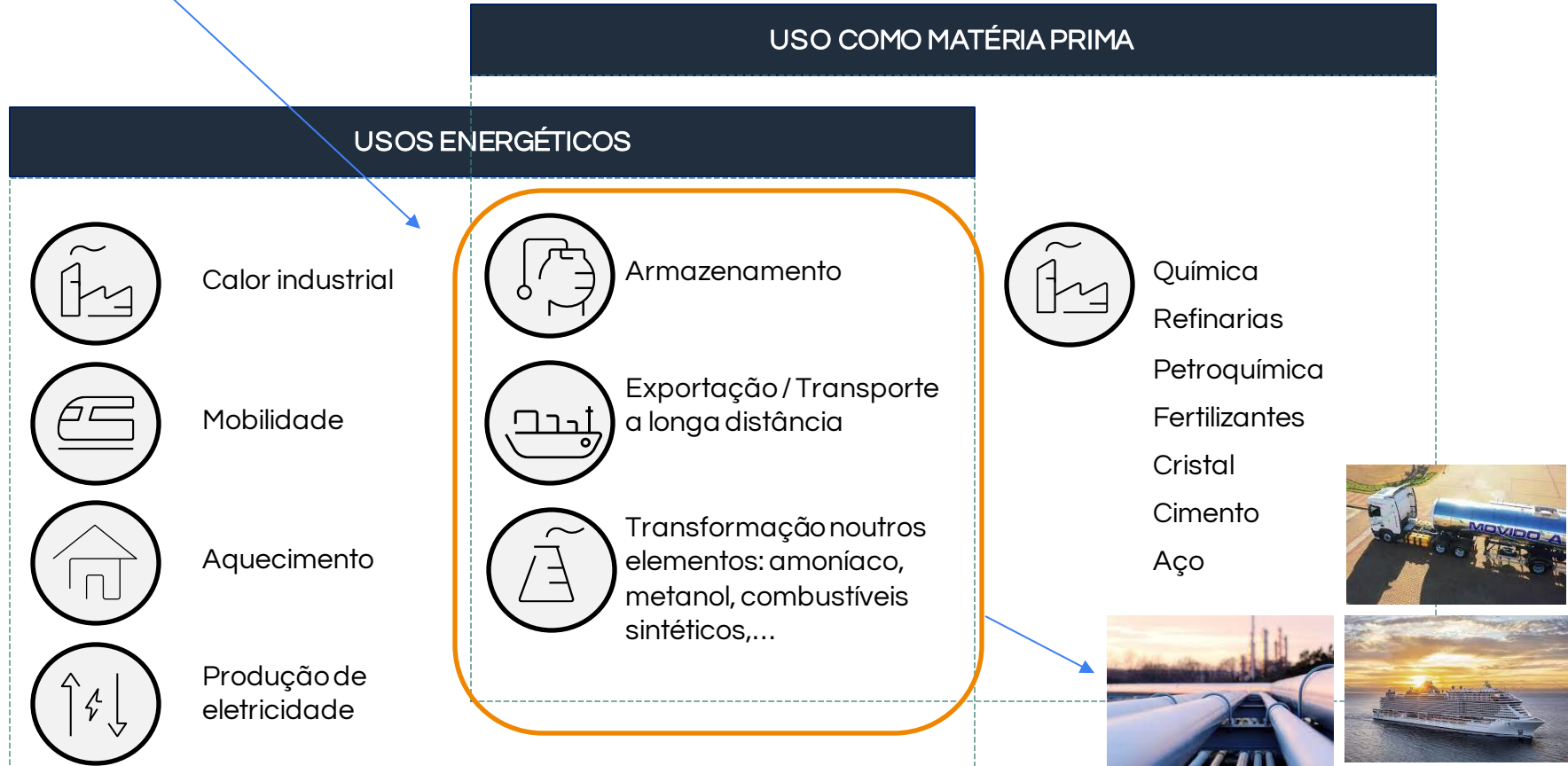


MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

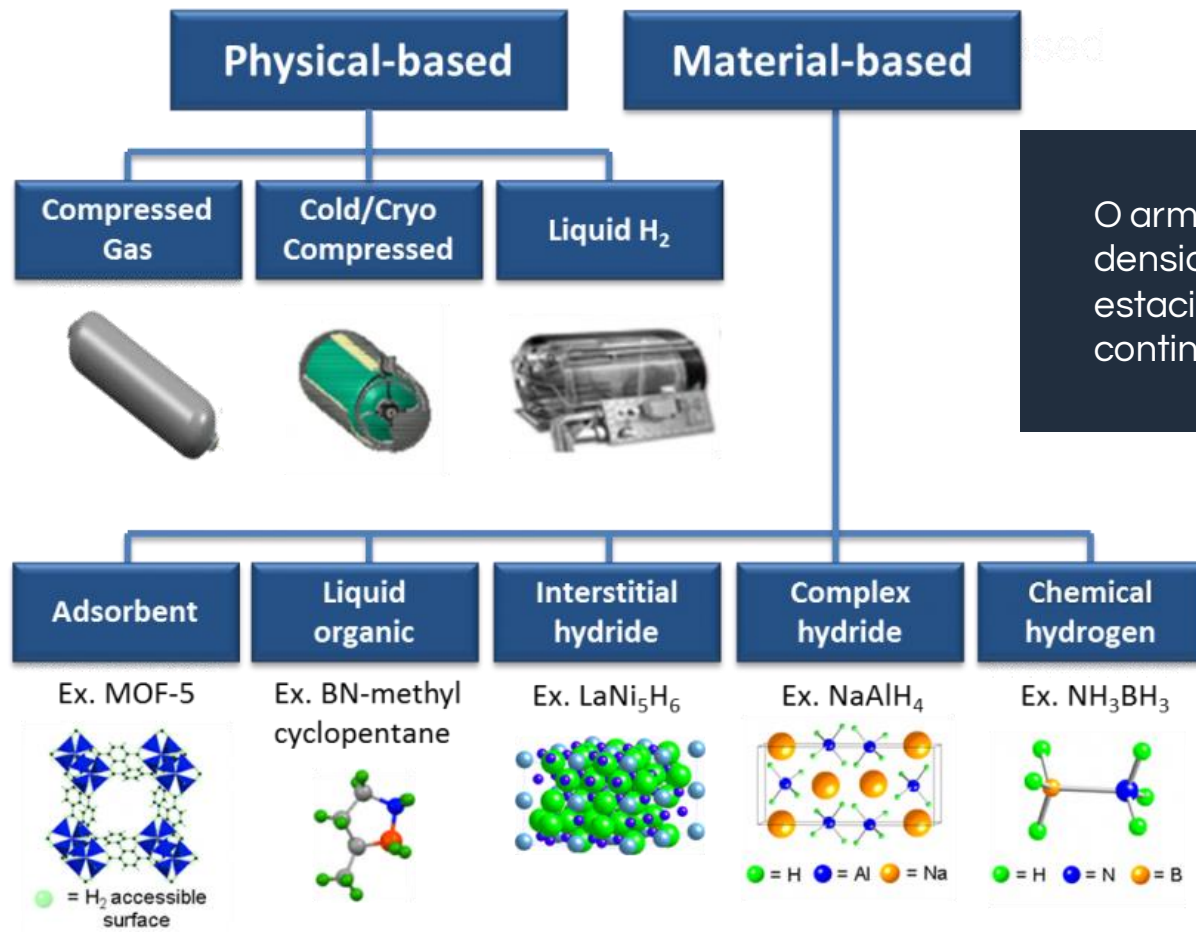


Os futuros usos do hidrogênio de baixo carbono determinam a tomada de decisão

Eficiência energética, custo, fragilização de materiais, segurança, maturidade tecnológica



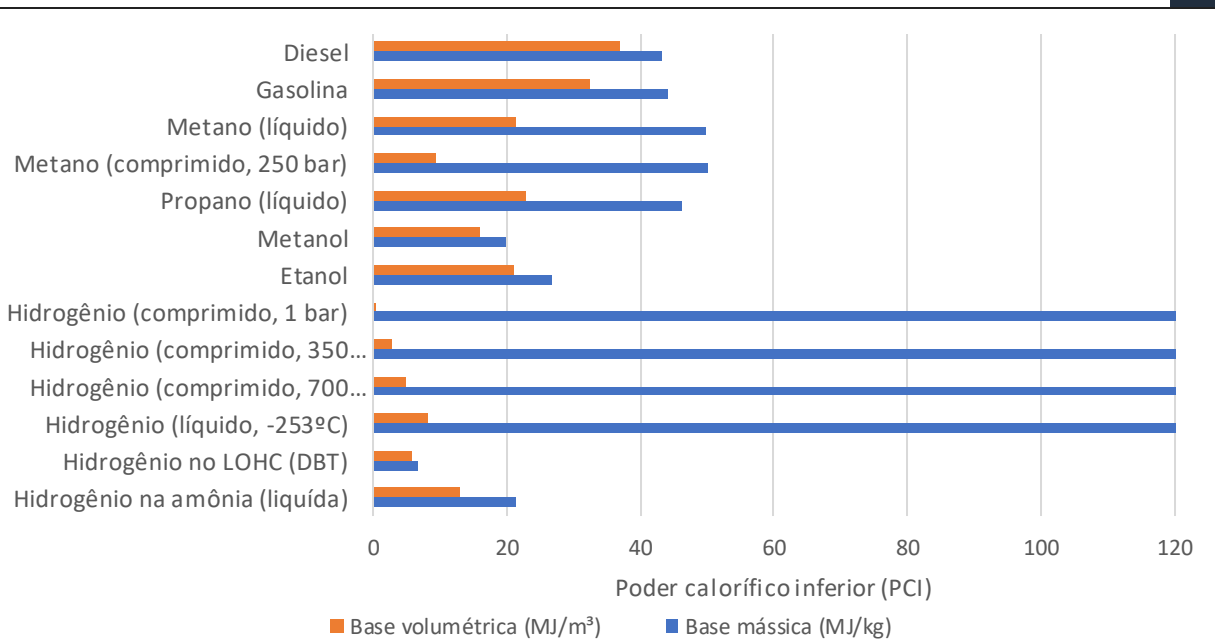
As etapas de armazenamento, transporte e distribuição estão intrinsecamente relacionadas às aplicações do vetor



O armazenamento de hidrogênio com alta densidade é um desafio para aplicações estacionárias e portáteis e o seu transporte continua sendo um desafio significativo.

As densidades de energia volumétrica fornecem um bom indicativo de custo benefício

Comparação entre densidades volumétrica e gravimétrica de energia dos combustíveis e carreadores de hidrogênio



O hidrogênio pode ser armazenado de três maneiras diferentes:

- ✓ Na forma gasosa, sob altas pressões (350-700 bar)
- ✓ Na forma líquida sob temperaturas criogênicas
- ✓ Na superfície ou dentro de materiais sólidos e líquidos
- ✓ Armazenamento geológico

Cada uma dessas tecnologias tem seus **requisitos e desafios** particulares

As opções de armazenamento dependem do volume do reservatório, a energia necessária para o processo, o tempo de armazenamento pretendido e a disponibilidade do recurso

Tecnologias de armazenamento de H2 categorizadas por volume e tempo adequado de armazenamento, com seus respectivos LCOS

Armazenamento	Gasoso				Líquido			Sólido
	Cavernas de sal	Campos de gás depletado	Cavernas rochosas	Tanques pressurizados	LH ₂	Amônia	LOHC	Hidretos metálicos
Volume	Grande	Grande	Médio	Pequeno	Pequeno - Médio	Grande	Grande	Pequeno
Duração do descarregamento	Semanas - mês	Sazonal	Semanas - mês	Dias	Dias - semanas	Semanas - mês	Semanas - mês	Dias - semanas
LCOS atual (US\$/kg)	0,23	1,90	0,71	0,19	4,57	2,83	4,50	NA
LCOS futuro (US\$/kg)	0,11	1,07	0,23	0,17	0,95	0,87	1,87	NA
Disponibilidade geográfica	Limitada	Limitada	Limitada	Não limitada	Não limitada	Não limitada	Não limitada	Não limitada

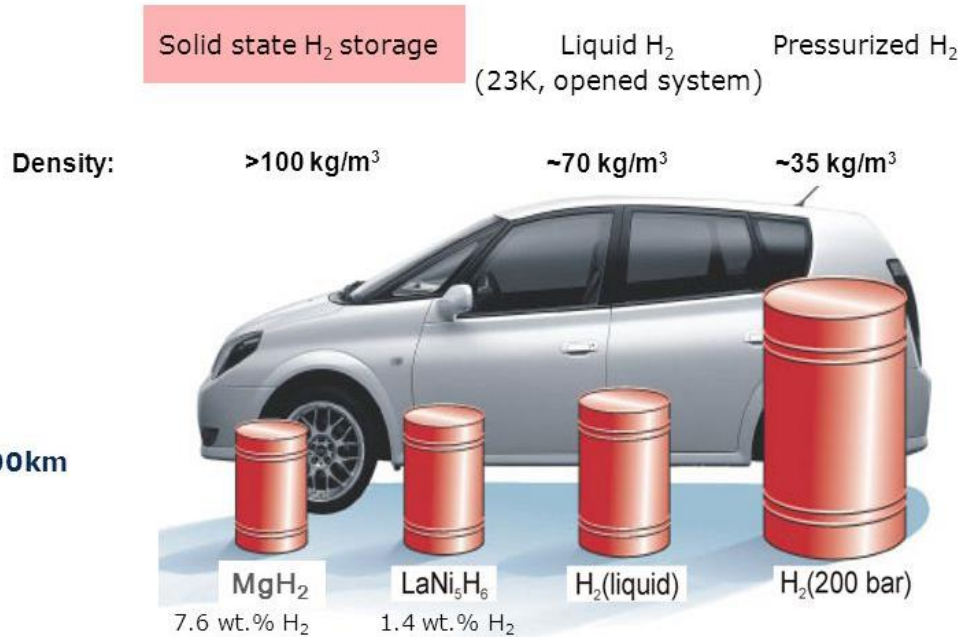
Legenda: NA – Não avaliada

Fonte: (BLOOMBERGNEF, 2020).

CNI, Hidrogênio Sustentável: Perspectivas e Potencial para a Indústria Brasileira, 2022.

O avanço tecnológico na capacidade dos tanques e a portabilidade do hidrogênio armazenado na forma gasosa ainda domina o mercado

A energia disponibilizada para compressão equivale a 9-12% da energia disponibilizada para compressão (de 350 ou 700 bar) e para liquefação, cerca de 30-33%.



Schlapbach & Züttel, Nature 414 (2001), 354

Agregação do hidrogênio a outras substâncias líquidas com moléculas maiores, como amônia e carreadores de hidrogênio orgânicos líquidos (LOHC - Liquid Organic Hydrogen Carriers) ou materiais sólidos pode trazer mais densidade

Hidretos: cinética lenta de hidrogenação e desidrogenação

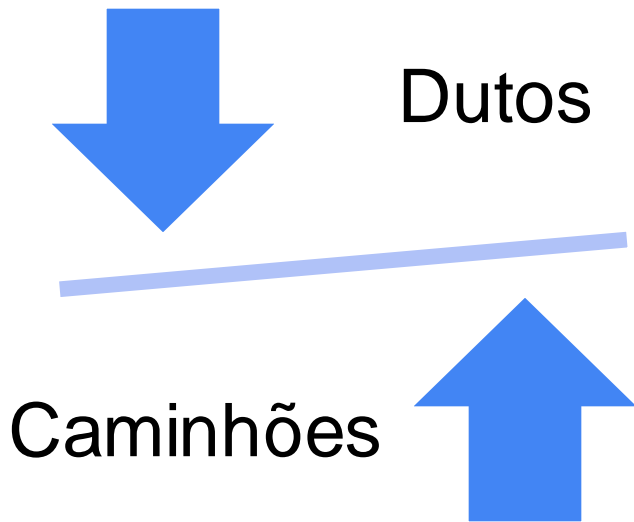
Desafio é o custo elevado: O uso mais adequado do hidrogênio liquefeito será quando ele for transportado por longas distâncias e em grandes quantidades. Em materiais, em processo de amadurecimento tecnológico

Existem diferentes opções disponíveis para transporte e distribuição de hidrogênio dependendo dos volumes, da distância de entrega e de circunstâncias locais

Tecnologias de transporte e custo médio por quilograma de H2 em 2019 de acordo com volume de produção de hidrogênio e distância de transporte

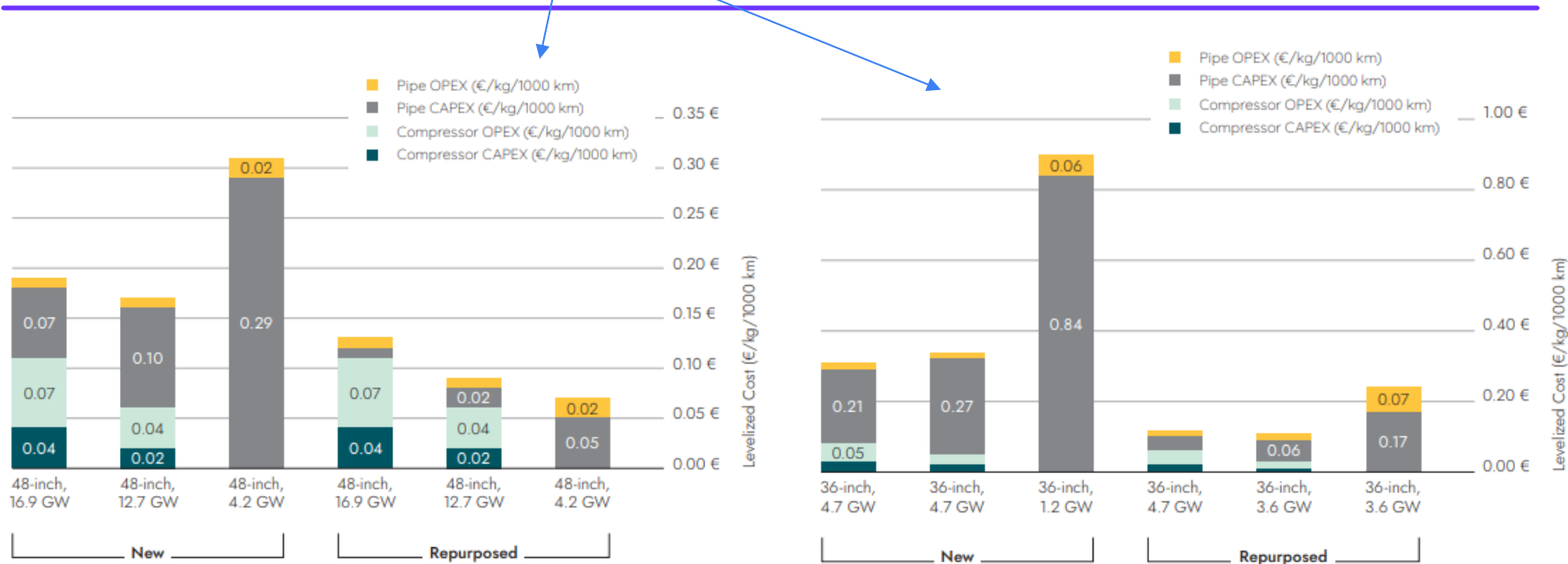
		Distância (km)			
		1-10	10-100	100-1000	>10000
Volume (t/dia)	<1-10	CGH ₂ 0,65-0,76 US\$/kg	CGH ₂ 0,68-1,73 US\$/kg	CGH ₂ / LOHC 0,96-3,87 US\$/kg	LOHC US\$ 3,87-6,70/kg
	10-100	Gasoduto 0,05-0,06 US\$/kg	Gasoduto 0,06-0,22 US\$/kg	Gasoduto 0,22-1,82 US\$/kg	Gasoduto 2,00 US\$/kg Amônia >3,00 US\$/kg
	100-1000	Gasoduto 0,05 US\$/kg	Gasoduto 0,05-0,10 US\$/kg	Gasoduto 0,10-0,58 US\$/kg	Gasoduto 0,58-3,00 US\$/kg Amônia >3,00 US\$/kg

Fonte: (BLOOMBERGNEF, 2020).



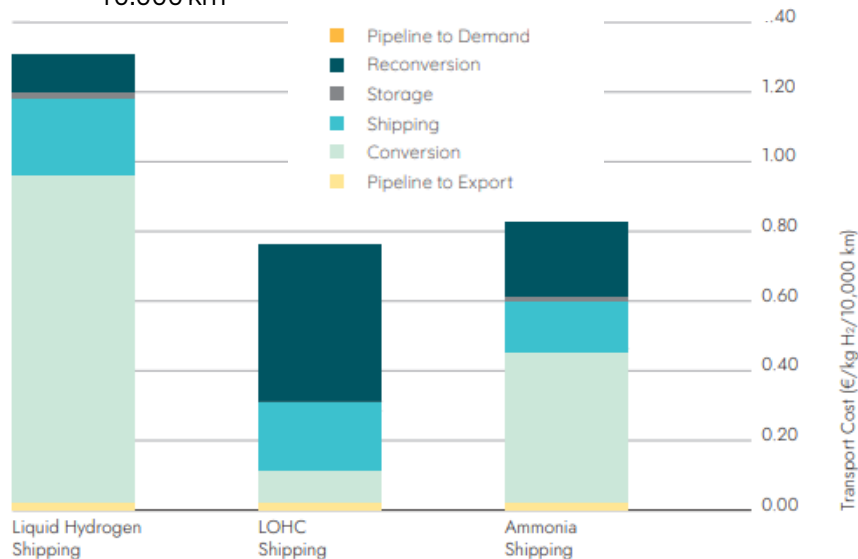
Os gasodutos de hidrogênio são a opção mais eficiente em termos de custos para o transporte de grandes volumes de hidrogênio a longa distância

Detalhamento do custo nivelado de dutos de 48 e 36 polegadas, novos e reaproveitados, operando com 100% da capacidade, 75% da capacidade e 25% da capacidade

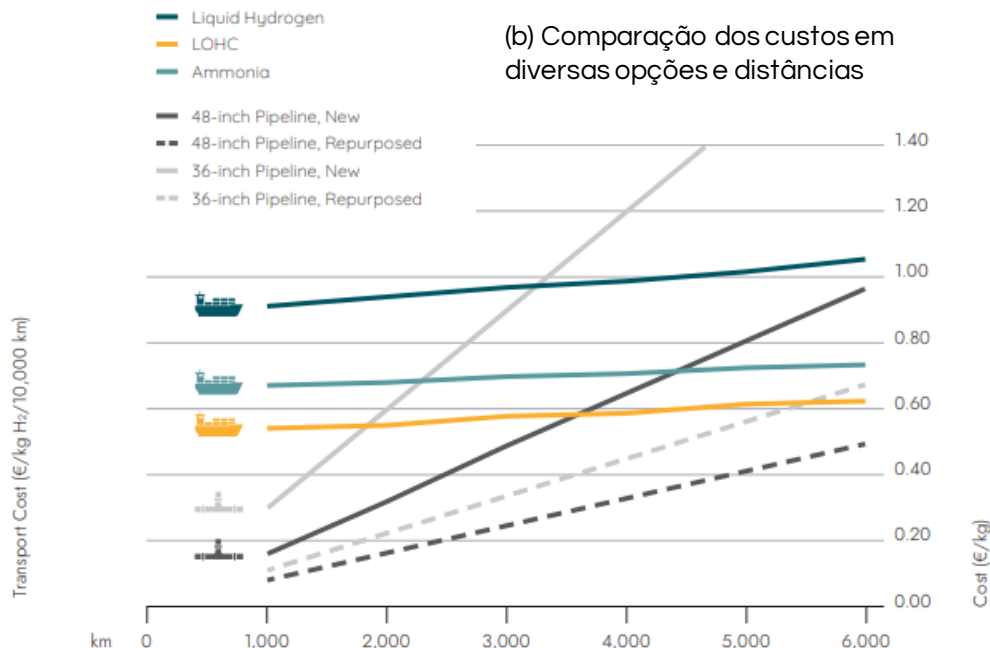


O transporte por navio é três a cinco vezes mais caro em comparação com o transporte por gasoduto: o emprego de substâncias ou materiais que armazenam o H2 e o liberam no local do uso final pode ser uma opção em longas distâncias

(a) Detalhamento do custo nivelado do transporte para hidrogênio líquido, LOHC e amônia em mais de 10.000 km



(b) Comparação dos custos em diversas opções e distâncias



Para os três métodos de transporte, os custos fixos relacionados com a conversão e reconversão são as partes mais significativas, constituindo entre 60 a 80% dos custos totais para uma viagem de 10.000 km

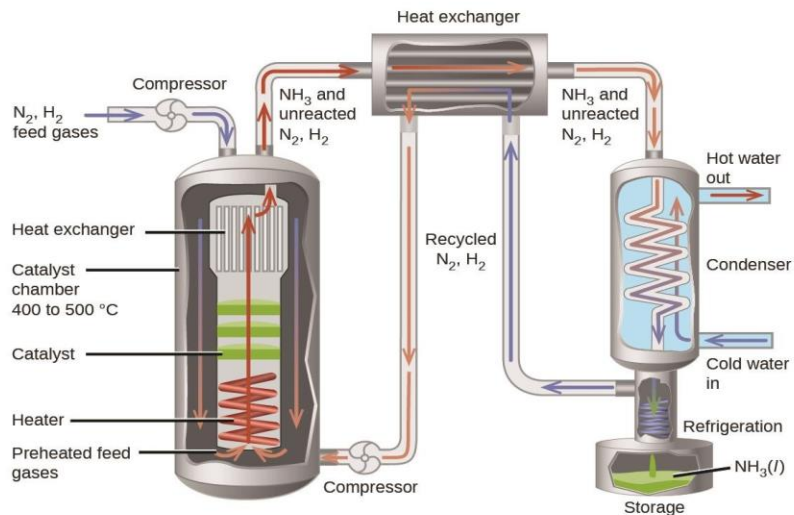
HIDRETOS QUÍMICOS: Amônia

Possui alta densidade de armazenamento de hidrogênio

Capacidade Gravimétrica: 17,7%

Capacidade Volumétrica: 123 kg/m³ (10 bar)

Método mais adequado para o transporte intercontinental



Processo de produção da amônia
Ammonia Cracking Catalysts Market Future Growth Opportunities 2022-2030

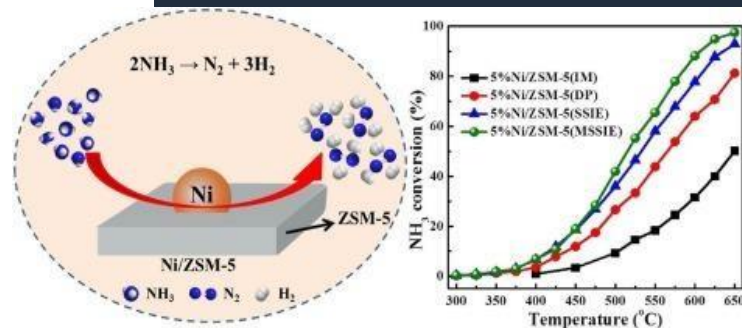
Processo de produção plenamente estabelecido (Haber-Bosch)



A desidrogenação da amônia ocorre sob alta temperatura na presença de catalisadores sólidos



Catalisadores nobres (rutênio, Ru) diminuem a temperatura de desidrogenação, porém são muito caros

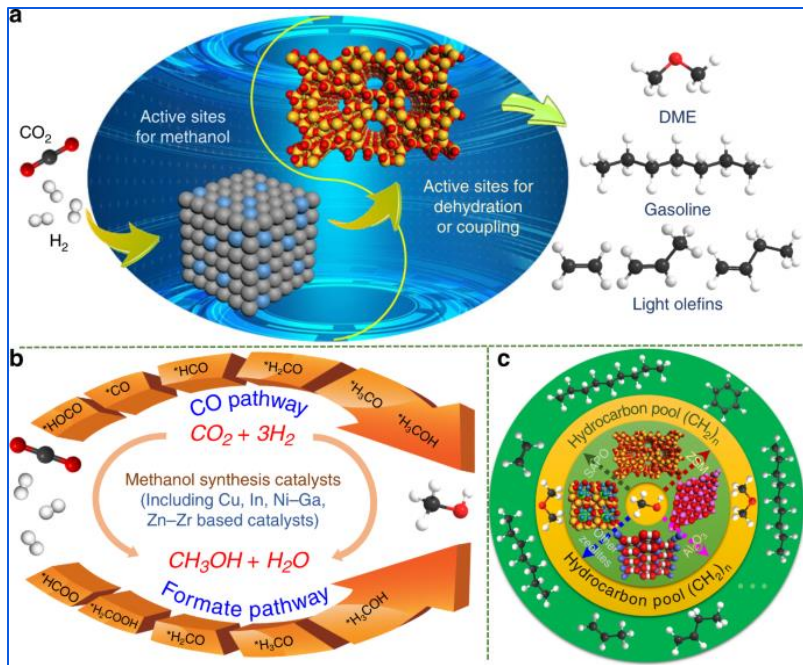


HIDRETOS QUÍMICOS: Metanol

É o mais simples dos álcoois, possuindo menor densidade de armazenamento de H₂ que a amônia

Capacidade Gravimétrica: 12,5%

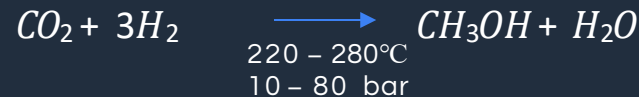
Capacidade Volumétrica: 99 kg/m³



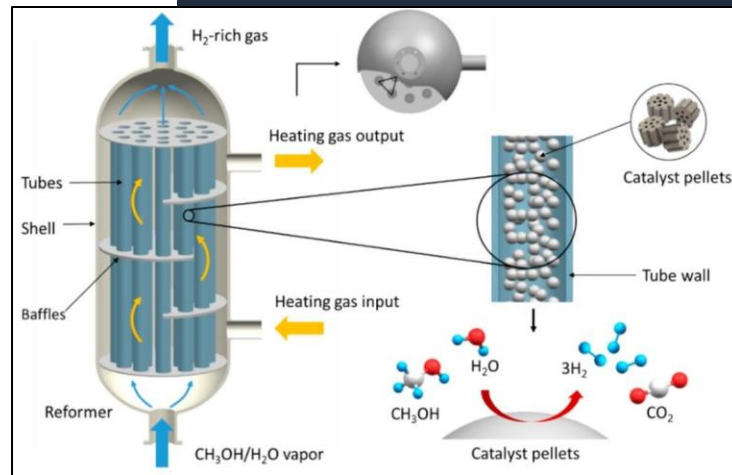
Processo de metanol por hidrogenação do CO₂
Nat Commun 10, 5698 (2019).

Pode ser produzido a partir da hidrogenação do CO₂ (captura de carbono) em presença de catalisadores sólidos.

Cu/ZnO/Al₂O₃



Rotas de desidrogenação do metanol



Reforma a vapor e oxidação parcial

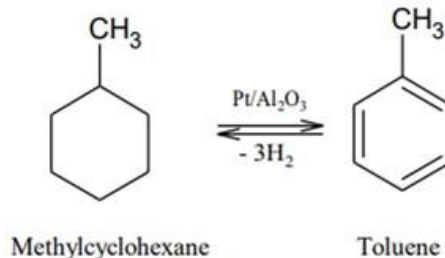
Processo de Reforma a vapor do metanol
Energies 2020, 13(3), 610

HIDRETOS QUÍMICOS: Líquidos Orgânicos Carreadores de Hidrogênio (LOHC)

Os LOHCs devem ser estáveis, de baixa toxicidade e possuir alto ponto de ebulição e baixo ponto de fusão.

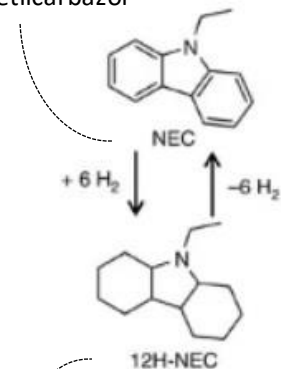
A reversibilidade do processo ocorre via saturação/insaturação das ligações carbono-carbono.

A hidrogenação ocorre a pressões de 10-50 bar e temperatura de 130-200 °C sobre presença de catalisador (Pt).



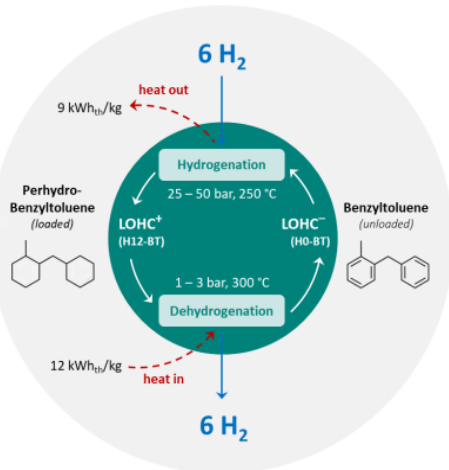
<https://doi.org/10.1016/j.molcata.2016.04.011>

N-etilcarbazol



Dodecahidro-N-etilcarbazol

Nature Comm. **7** (2016) 13201



Comparação dos parâmetros físicos em diferentes materiais

Parameter		Benzyltoluene	N-Ethyl-Carbazole	Toluene	Diphenylmethane
Storage density	Volumetric / MWh/m ³	1.8	1.9	1.6	2.0
	Gravimetric / wt%	6.2	5.8	6.2	6.9
Melting / Boiling point / °C		-70 / 280	69 / 348	-95 / 111	24 / 264
Flash point / °C		137	- - -	6	127

Energies **2021**, *14*, 1592

Liquid Organic Hydrogen Carriers-A Technology to Overcome Common Risks of Hydrogen Storage. 2021.

H2 LÍQUIDO (LH2)

O LH2 é armazenado a 20 K (-253 °C) a pressão atmosférica;
Liquefação é 3x mais cara que a compressão a gás



A reversibilidade mantém sua qualidade inicial

Os principais métodos de liquefação de hidrogênio são mecânicos ou magnéticos.

O processo de refrigeração mecânico é similar a refrigeradores.

O gás refrigerante é comprimido, resfriado, expandido por uma válvula de expansão (processo Linde) ou por uma turbina (processo Claude), parte do gás é liquefeito e o gás é reciclado no processos.

Após o transporte ou armazenamento temporário, o hidrogênio líquido é tornado gasoso novamente com um evaporador.



Tanque do Centro Espacial Kennedy da NASA

H2 LÍQUIDO (LH2)

Apesar dos avanços, a perda de H2 por evaporação é inevitável (boil-off)

Tanques com proteção multicamadas para evitar as perdas

Períodos de inatividade: 1-3 dias

Tanques esféricos possuem menor taxa de boil-off (1-5% por dia)

Trocadores de calor de placas de alumínio e turbinas de expansão com rolamentos dinâmicos a gás

Os custos estão relacionados com a manutenção do LH2 termicamente resistente e de baixa permeação

Desenvolvimento de sistemas isolantes para os tanques

Evitar a formação de partículas de ar congelado

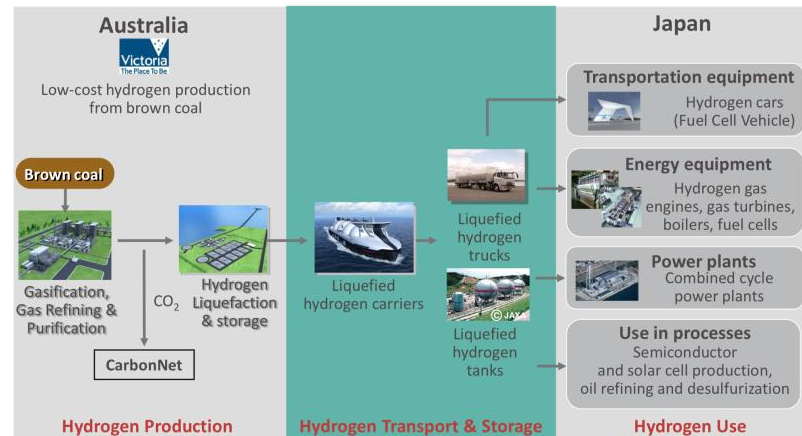
Suportar o extremo ciclo térmico

Ser o mais leve possível

Possuir baixas condutividade térmica



The Hydrogen Energy Supply Chain (HESC) Concept The energy chain from a resource-producing country to the consumer market

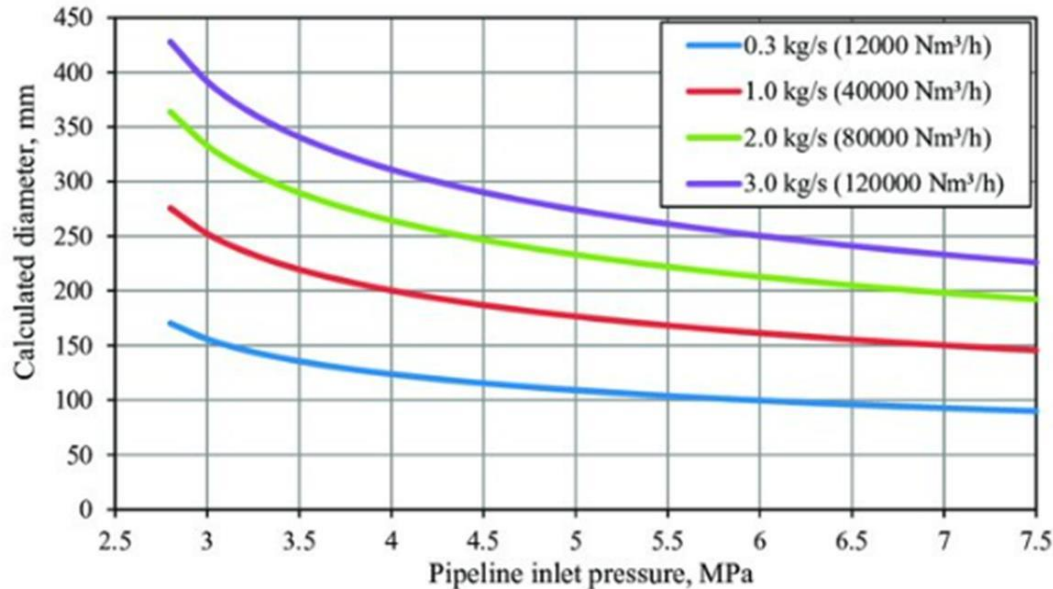


O transporte de hidrogênio por **gasoduto** é interessante porque é possível aumentar a densidade volumétrica do hidrogênio que é baixa.

Em uma rede já existente, para transportar grandes volumes de gases é a melhor tecnologia.



Quanto maior o volume de gás e o diâmetro do duto, menor é o custo do transporte de hidrogênio por gasodutos. Reduz exponencialmente com o aumento do volume de gás transportado.



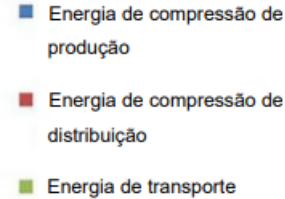
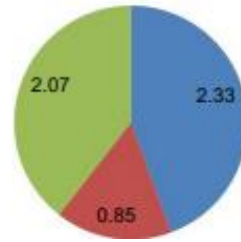
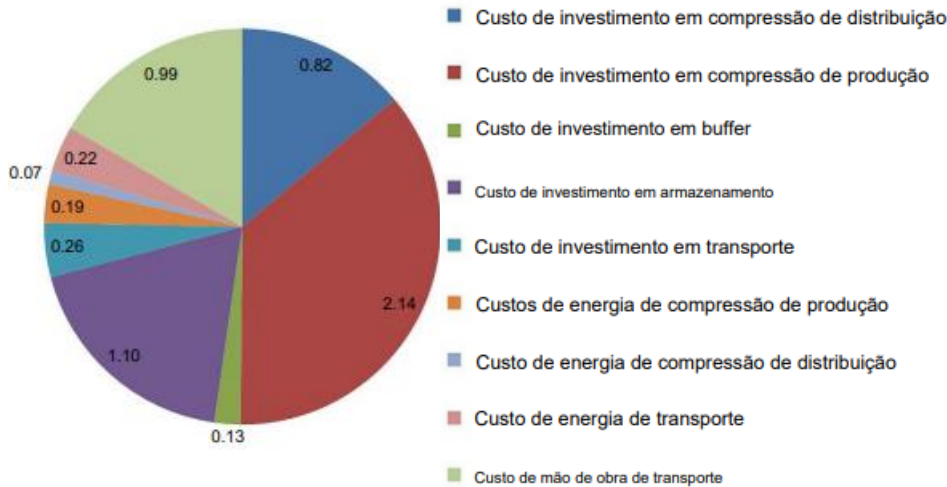
36 MW
120 MW
240 MW
360 MW



O processo de compressão é uma operação que consome muita energia. Qualquer aquecimento, fricção no compressor ou ineficiência do motor elétrico aumentará o gasto de energia.

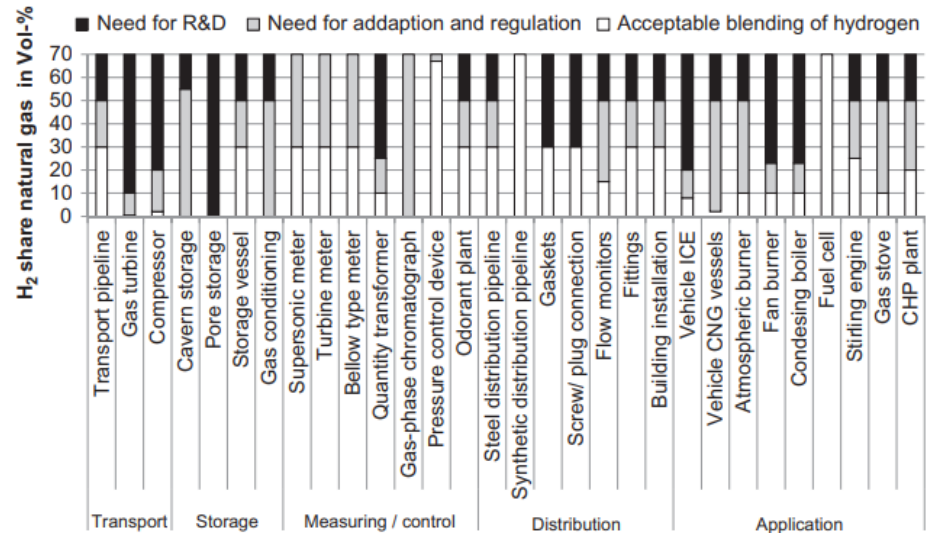
Custos associados ao processo

Discriminação de custos (€/kgH2)



Energia dispensada (kWh/kgH2)

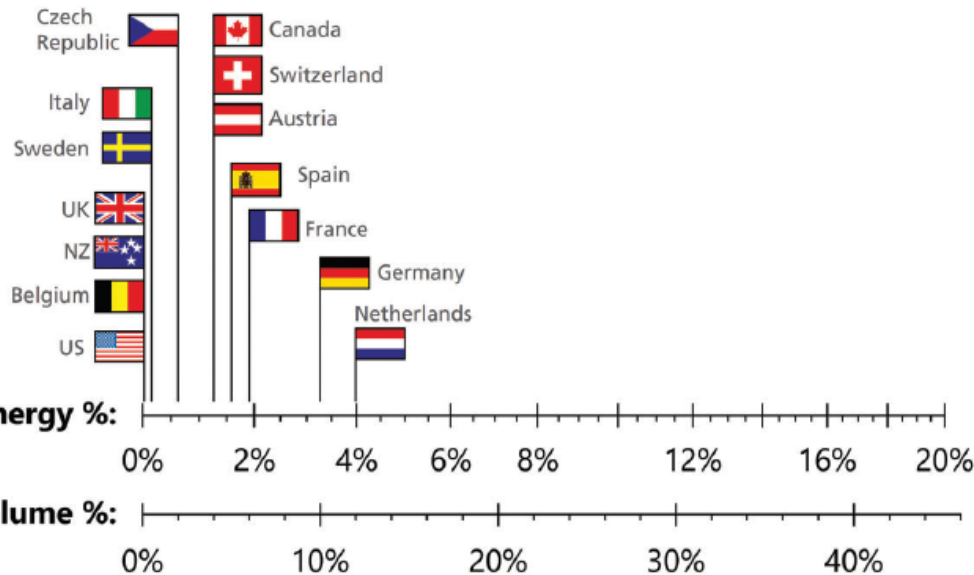
Emissões de CO2 associadas (tCO2/tH2)



Fonte: Lowering energy spending together with compression, storage, and transportation costs for hydrogen distribution in the early market. In: Hydrogen Supply Chains. Academic Press, 2018. p. 207-270

Percentual de mistura H2/Gás Natural praticado em alguns países.

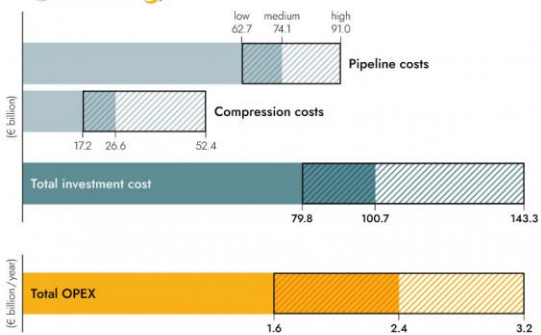
Procedimentos regulatórios permitem pequenas quantidades da mistura devido a questões de segurança, integridade e vazamento de gasodutos



Fontes: STAFFELL et al, 2019.

Projetos e iniciativas

O consórcio European Hydrogen Backbone (EHB)



Custos estimados de investimento e operação

Os corredores servirão como solução econômica para transportar grandes volumes de hidrogênio com custo baixo, por dutos, para os centros de demanda.



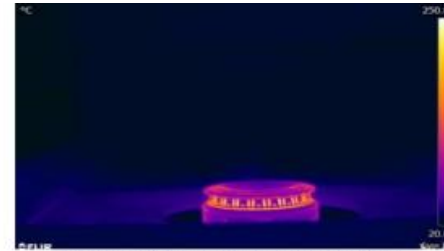
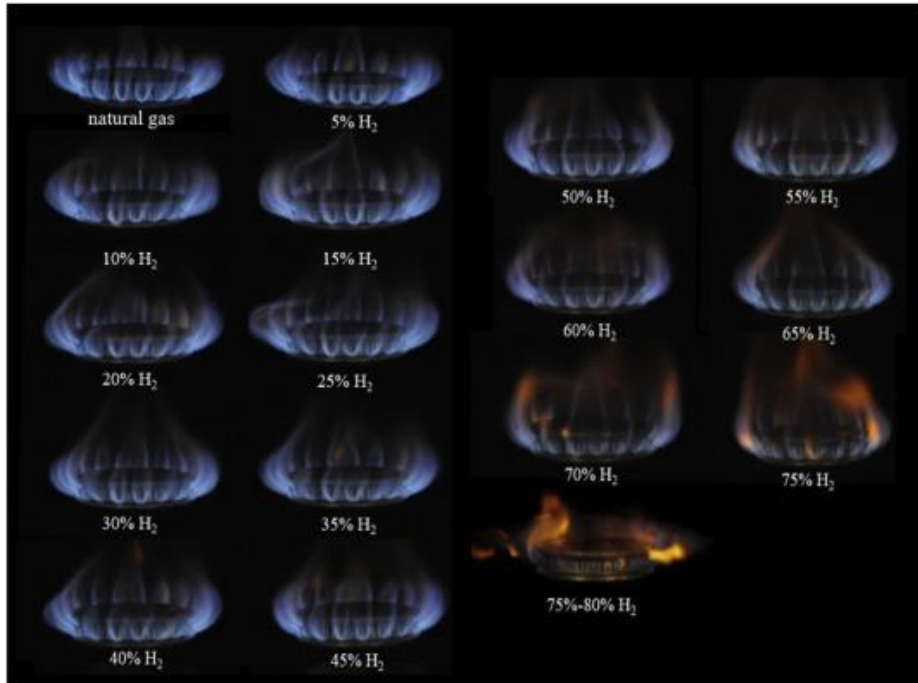
- Pipelines**
 - Repurposed
 - New
 - Import / Export
 - Subsea
- Storages**
 - Salt Cavern
 - Aquifer
 - Depleted field
 - Rock Cavern
- Other items**
 - City
 - Existing or planned Gas-Import-Terminal
 - Energy island for H2 production



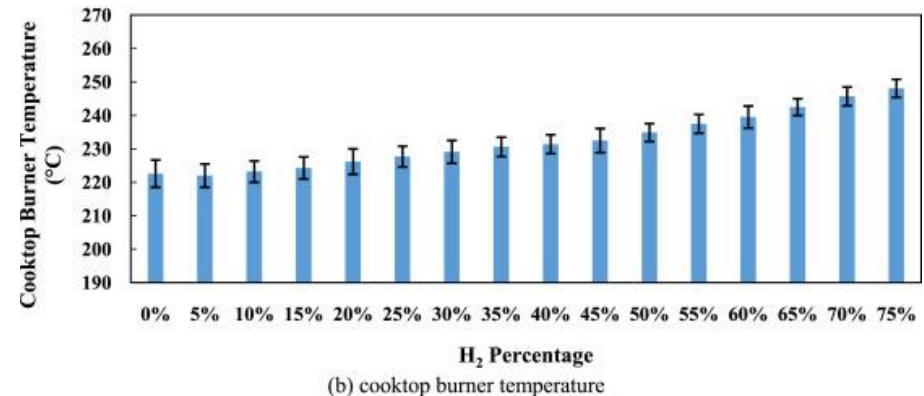
Range depending on input assumptions as described in Appendix A

Os queimadores de fogão a gás natural podem operar com segurança e eficiência com até 20% de hidrogênio adicionado ao combustível. A adição de hidrogênio resulta na redução das emissões de poluentes.

Embora o poder calorífico volumétrico do hidrogênio seja muito inferior ao do gás natural, eles possuem Índice de Wobbe semelhante



(a) FLIR image of the cooktop burner



Várias configurações de projetos desenvolvidos no mundo para ampliação do conhecimento dos limites da concentração tolerável de H2 hidrogênio na rede de gás natural



Projeto Italiano de inserção de 1% de hidrogênio com mistura contínua de hidrogênio-metano (até 10%)



- Impactos do H2 na rede de gás natural existente
- Potencial da injeção de hidrogênio na rede de transmissão de gás natural de alta pressão
- Aplicações de aquecimento e resfriamento; setor de transporte

- Projeto britânico que visa alcançar pelo menos 20% de H2 na rede
- 1500 residências
- Teste piloto na rede privada da Universidade de Keele com criação do Demonstrador de Rede de Energia Inteligente (SEND)

Estudos de fragilização de materiais



O WindGas Falkenhagen faz parte do projeto Horizonte 2020 STORE&GO



- Projeto australiano que visa produzir hidrogênio renovável e inserir na rede
- HyP SA - Até 5% (volume) de mistura de gás renovável para 700 residências. 100% para a indústria por meio de reboques tubulares.
- HyP Murry Valley – Até 10% em para mais de 40.000 conexões comerciais e residenciais
- HyP Gladstone - 10% de gás renovável para cerca de 770 residências e empresas em toda a rede de gás existente em uma cidade inteira

Questões relevantes



- Aspectos econômicos, de segurança e de mercado devem ser levados em conta
- A compreensão possui diferenças entre gás natural e misturas de metano-hidrogênio (como densidade, viscosidade, interações de fase e densidades de energia, pressurização, concentrações e vazamentos em tubulações) causando preocupações relativas a segurança.
- O atual sistema de gasodutos de gás natural consiste na captação, transmissão e linhas de distribuição, cada uma com materiais variados, idade em serviço, condições de operação e tamanho do equipamento.



- O hidrogênio pode levar à fragilização de componentes metálicos de tubulações, o que pode resultar em rachaduras e até mesmo falhas na tubulação. A fragilização por hidrogênio é mais provável de ocorrer em gasodutos de transmissão de gás natural de alta resistência do que em tubulações de distribuição de baixa resistência, embora a suscetibilidade à fragilização dependa de muitos outros fatores, como condições operacionais e propriedades dos materiais usados.



- É necessária dispensar energia para transportar o gás misturado para fornecer a densidade de energia comparável com o gás natural, nas condições de vazão para os usuários finais. Ainda assim, comparado a transporte por outros meios, apresenta ser melhor solução para grandes distâncias

Obrigado!

Agradecemos a
participação.

