

# Masterclass Hidrogênio Verde:

## Fase de Distribuição do Hidrogênio Verde

Sayonara Eliziário, Gesel/UFPB



**H2BRASIL**



MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA

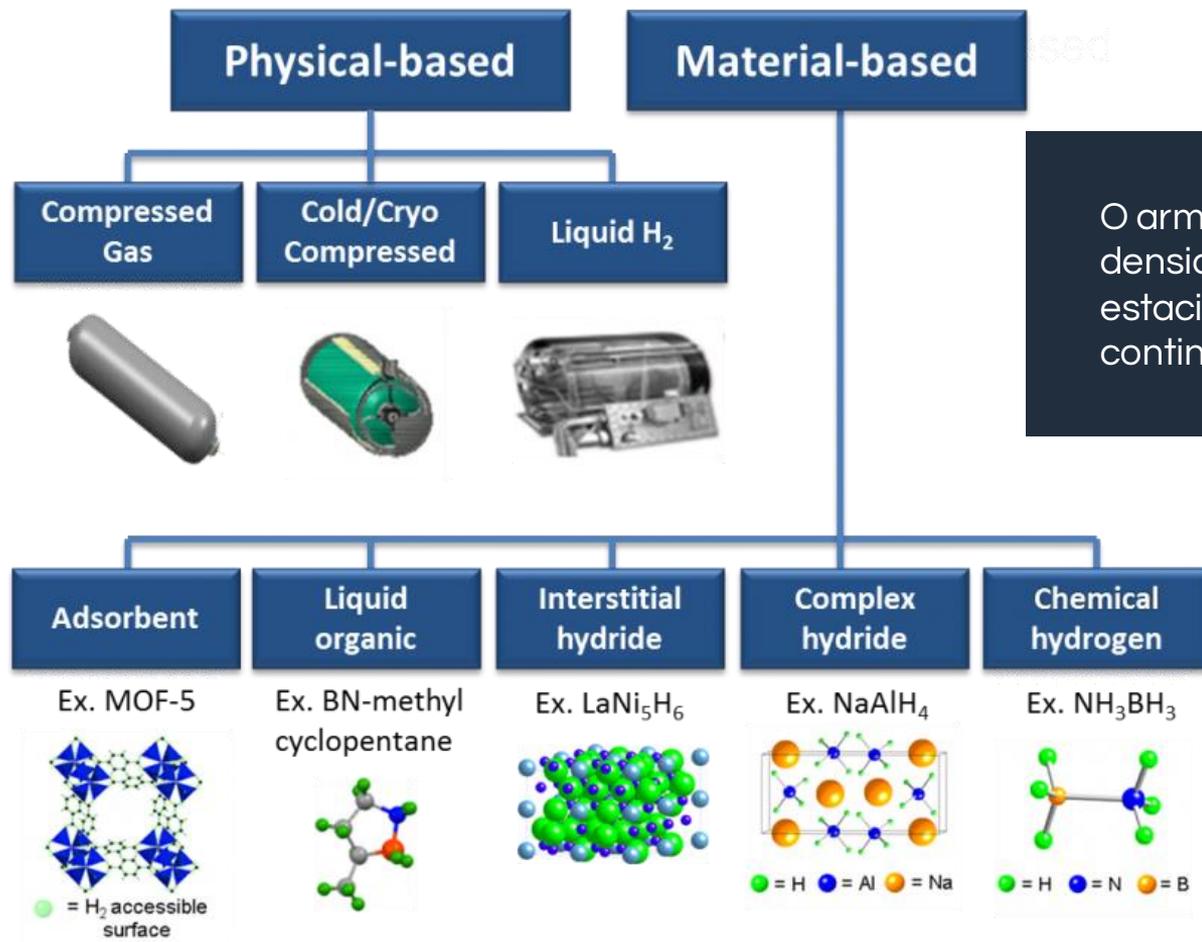


# Os futuros usos do hidrogênio de baixo carbono determinam a tomada de decisão

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



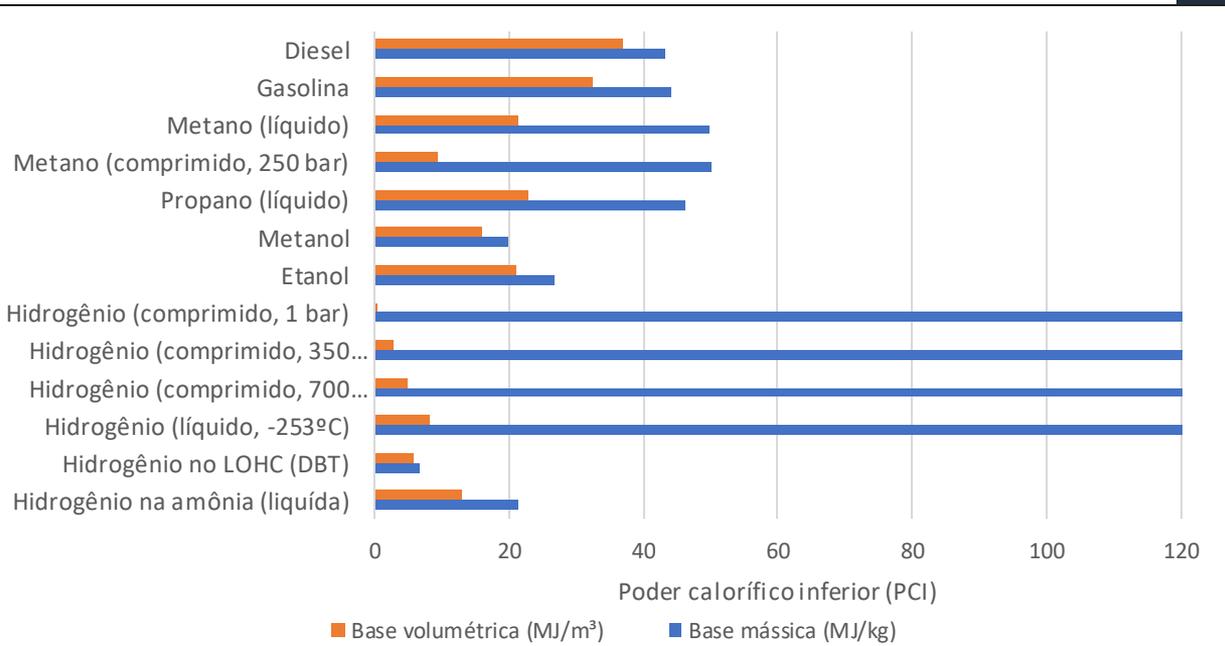
# As etapas de armazenamento, transporte e distribuição estão intrinsecamente relacionadas às aplicações do vetor



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 <sub>2</sub>	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

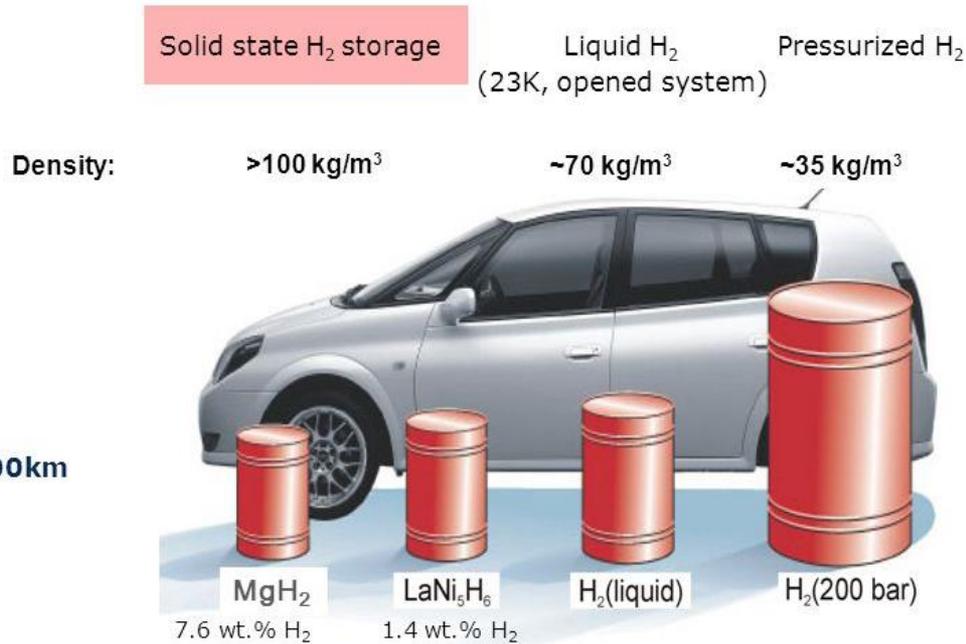
Legenda: NA – Não avaliada

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%.



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

Schlapbach & Züttel, Nature 414 (2001), 354

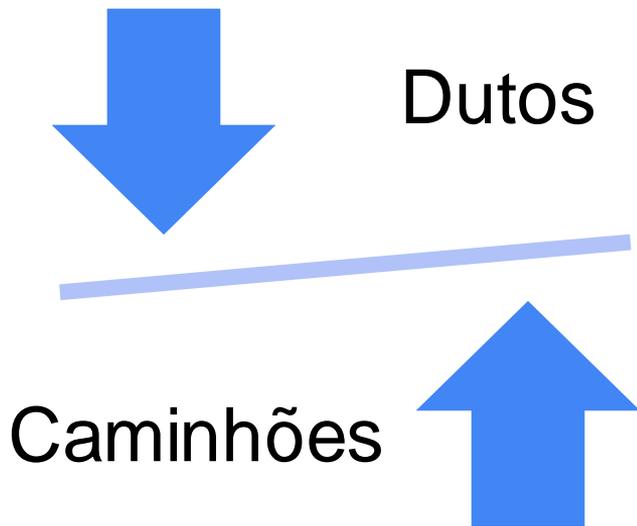
Desafio é o custo elevado: O uso mais adequado do hidrogênio liquefeito será quando ele for transportado por longas distâncias e em grandes quantidades. Em materiais, em processo de amadurecimento tecnológico

# 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

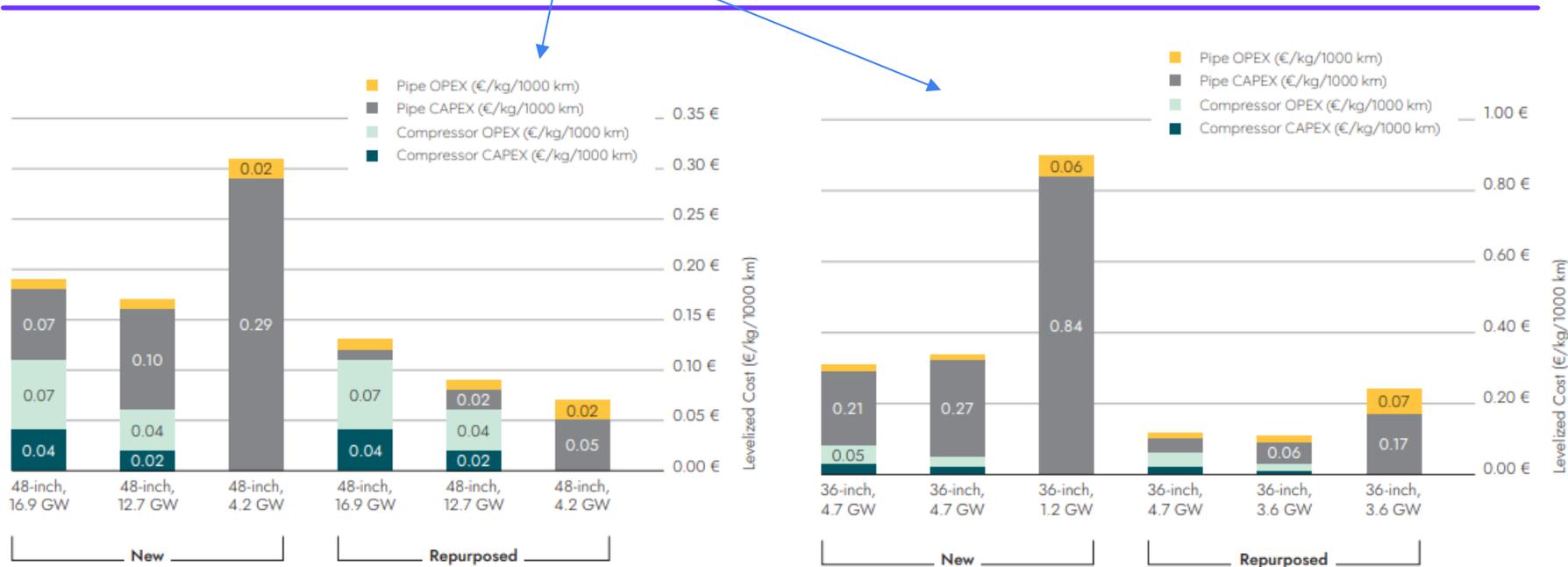
		Distância (km)			
		1-10	10-100	100-1000	>10000
Volume (t/dia)	<1-10	CGH <sub>2</sub> 0,65-0,76 US\$/kg	CGH <sub>2</sub> 0,68-1,73 US\$/kg	CGH <sub>2</sub> / LOHC 0,96-3,87 US\$/kg	LOHC US\$ 3,87-6,70/kg
	10-100	Gasoduto 0,05-0,06 US\$/kg	Gasoduto 0,06-0,22 US\$/kg	Gasoduto 0,22-1,82 US\$/kg	Gasoduto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



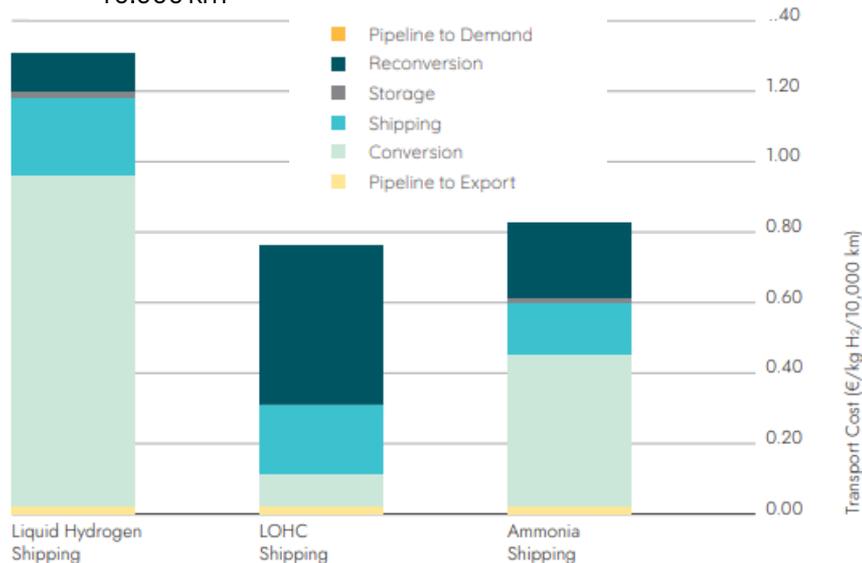
# Os gasodutos de hidrogênio são a opção mais eficiente em termos de custos para o transporte de grandes volumes de hidrogênio a longa distância

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

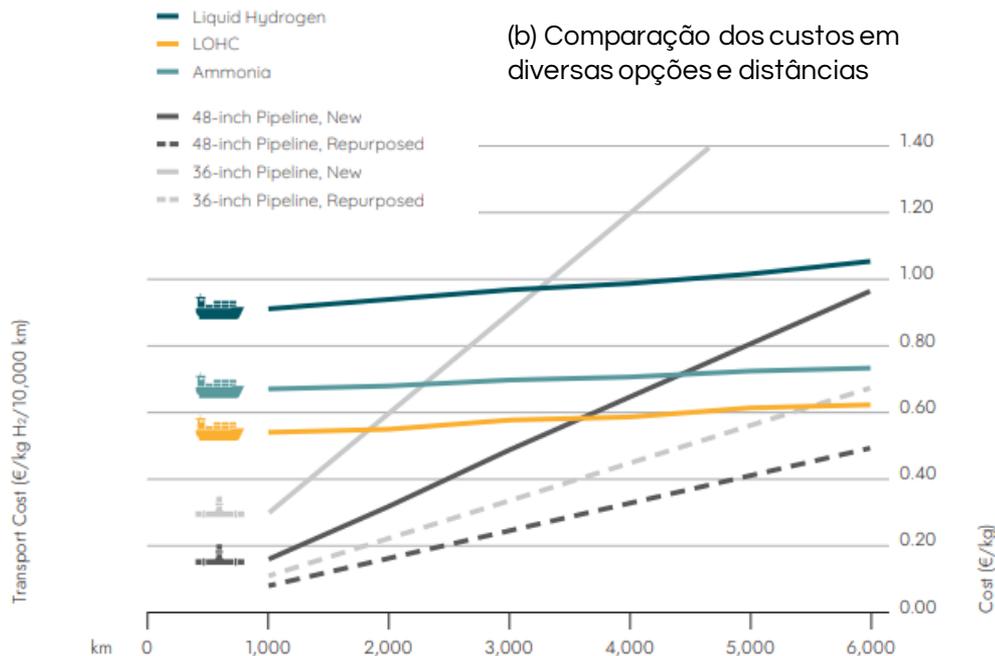


# O transporte por navio é três a cinco vezes mais caro em comparação com o transporte por gasoduto: o emprego de substâncias ou materiais que armazenam o H2 e o liberam no local do uso final pode ser uma opção em longas distâncias

(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

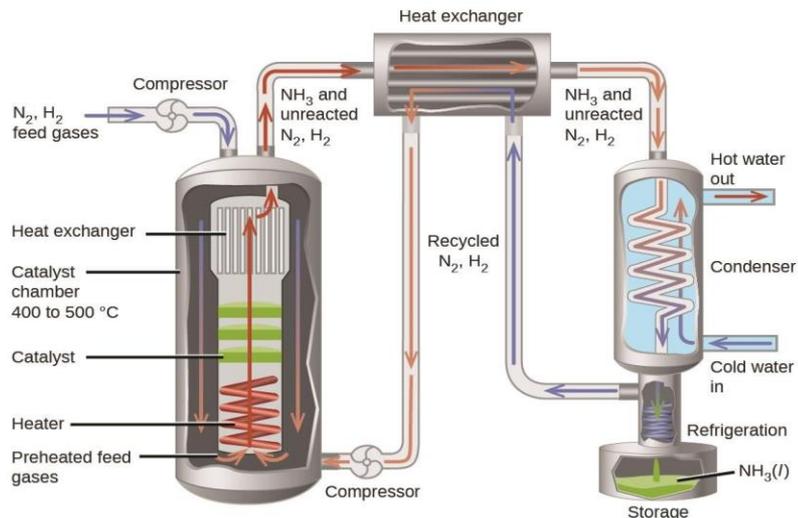
# HIDRETOS QUÍMICOS: Amônia

Possui alta densidade de armazenamento de hidrogênio

Capacidade Gravimétrica: 17,7%

Capacidade Volumétrica: 123 kg/m<sup>3</sup> (10 bar)

Método mais adequado para o transporte intercontinental



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

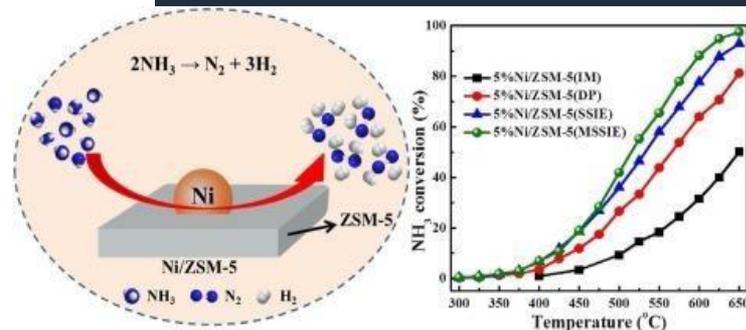
Processo de produção plenamente estabelecido (Haber-Bosch)



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

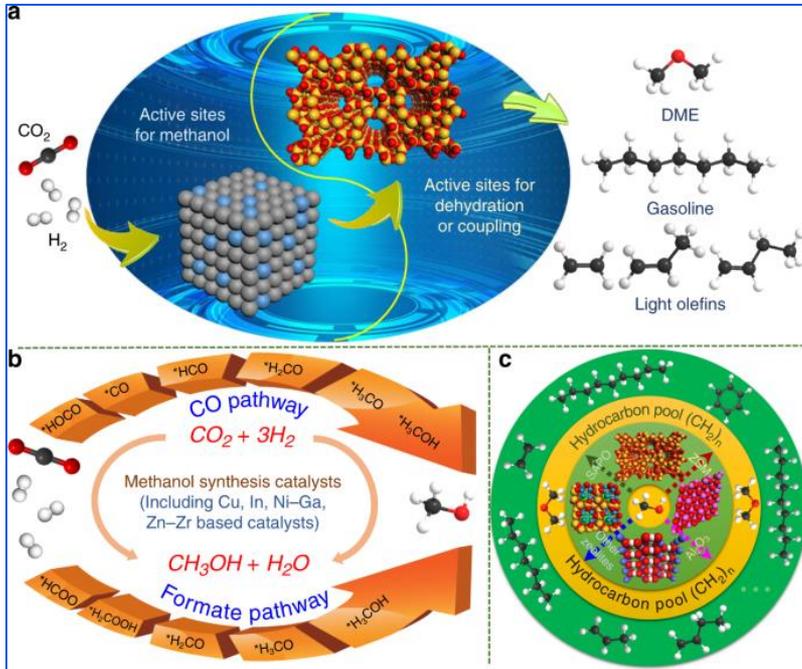


# HIDRETOS QUÍMICOS: Metanol

É o mais simples dos álcoois, possuindo menor densidade de armazenamento de H<sub>2</sub> que a amônia

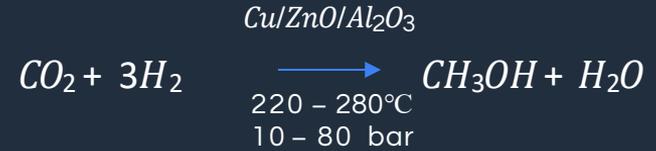
Capacidade Gravimétrica: 12,5%

Capacidade Volumétrica: 99 kg/m<sup>3</sup>

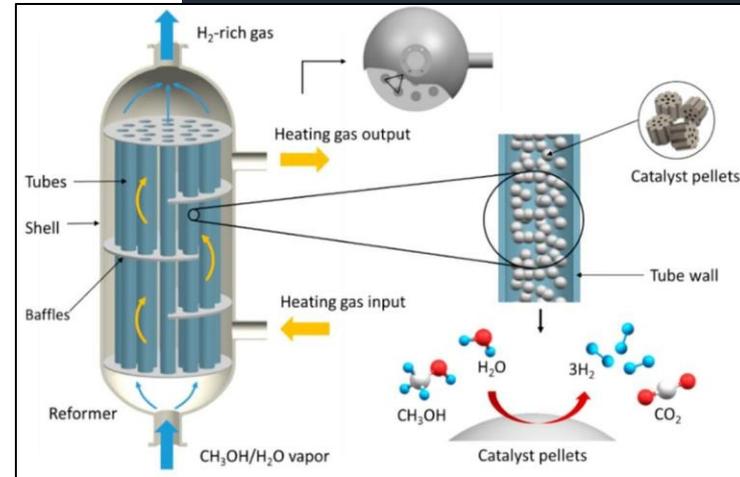


Processo de metanol por hidrogenação do CO<sub>2</sub>  
Nat Commun 10, 5698 (2019).

Pode ser produzido a partir da hidrogenação do CO<sub>2</sub> (captura de carbono) em presença de catalisadores sólidos.



Rotas de desidrogenação do metanol



Reforma a vapor e oxidação parcial

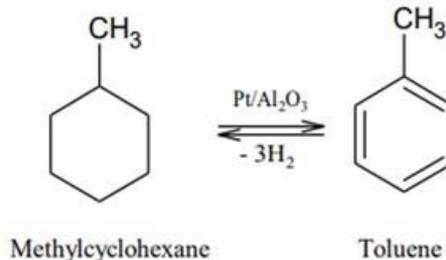
Processo de Reforma a vapor do metanol  
Energies 2020, 13(3), 610

# 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.

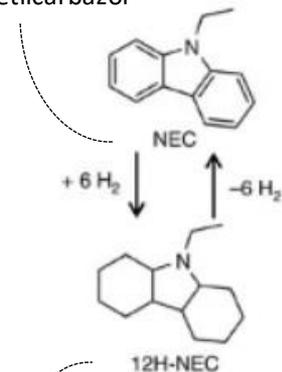
A reversibilidade do processo ocorre via saturação/insaturação das ligações carbono-carbono.

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



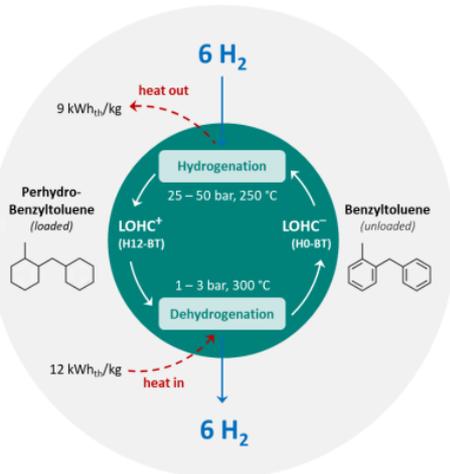
<https://doi.org/10.1016/j.molcata.2016.04.011>

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 <sup>3</sup>	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

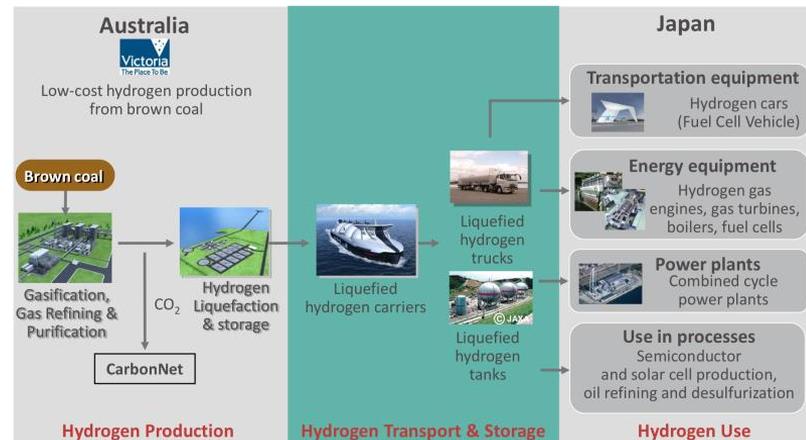
Suportar o extremo ciclo térmico

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

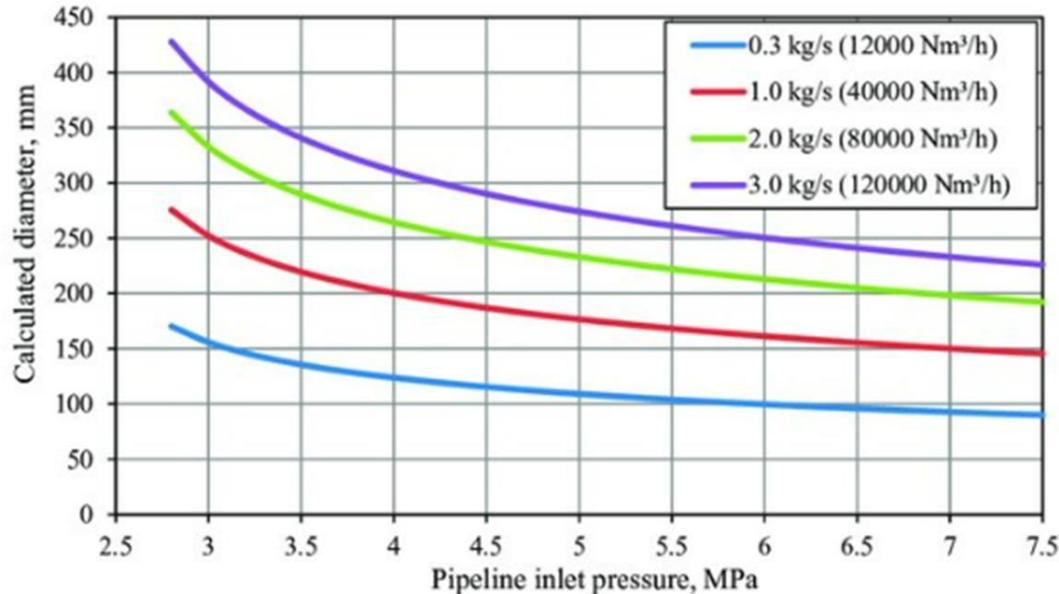


# O transporte de hidrogênio por **gasoduto** é interessante porque é possível aumentar a densidade volumétrica do hidrogênio que é baixa.

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.



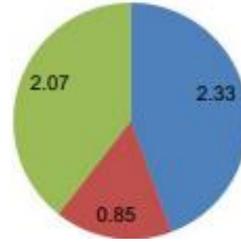
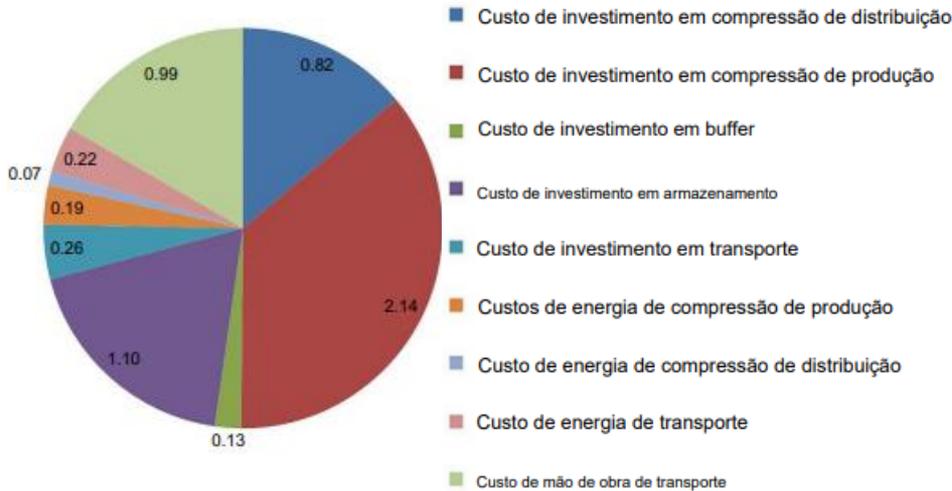
36 MW  
120 MW  
240 MW  
360 MW



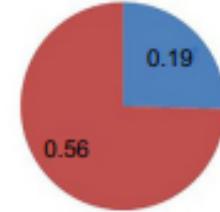
# O processo de compressão é uma operação que consome muita energia. Qualquer aquecimento, fricção no compressor ou ineficiência do motor elétrico aumentará o gasto de energia.

## Custos associados ao processo

### Discriminação de custos (€/kgH2)



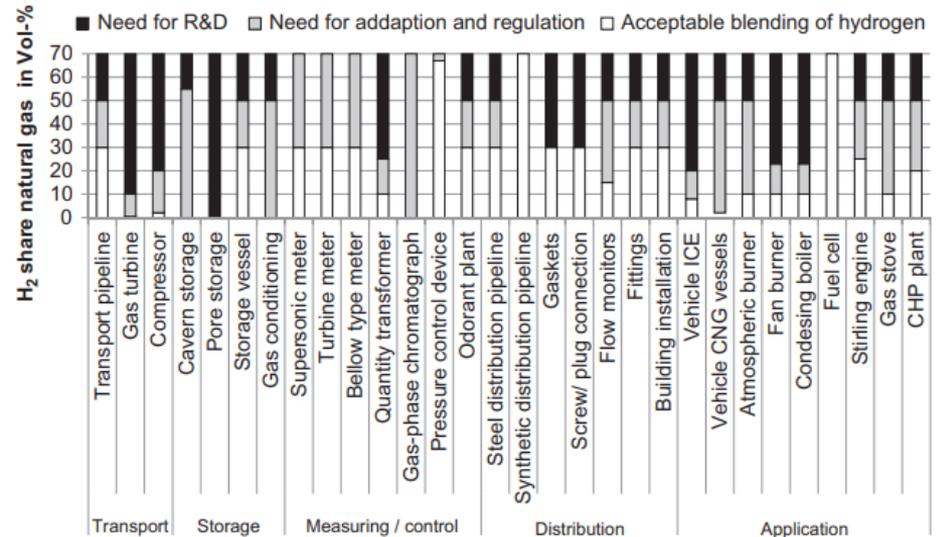
- Energia de compressão de produção
- Energia de compressão de distribuição
- Energia de transporte



- Emissão de CO2 de produção
- Transporte de emissão de CO2

### Energia dispensada (kWh/kgH2)

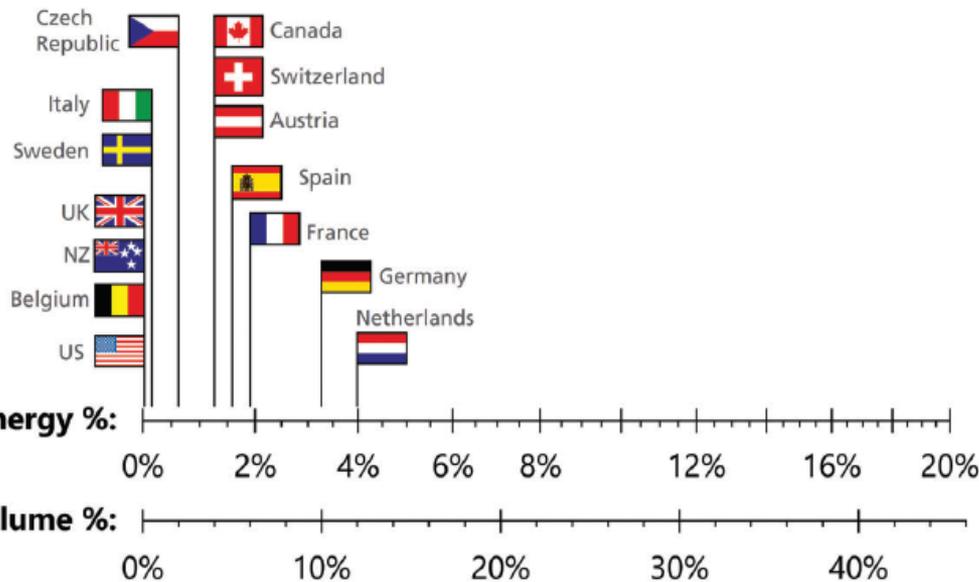
### Emissões de CO2 associadas (tCO2/tH2)



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.

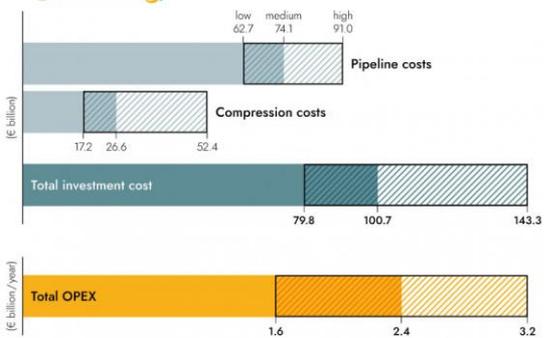
Procedimentos regulatórios permitem pequenas quantidades da mistura devido a questões de segurança, integridade e vazamento de gasodutos



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.



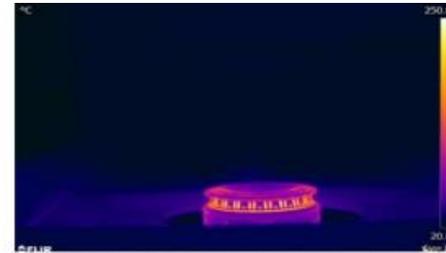
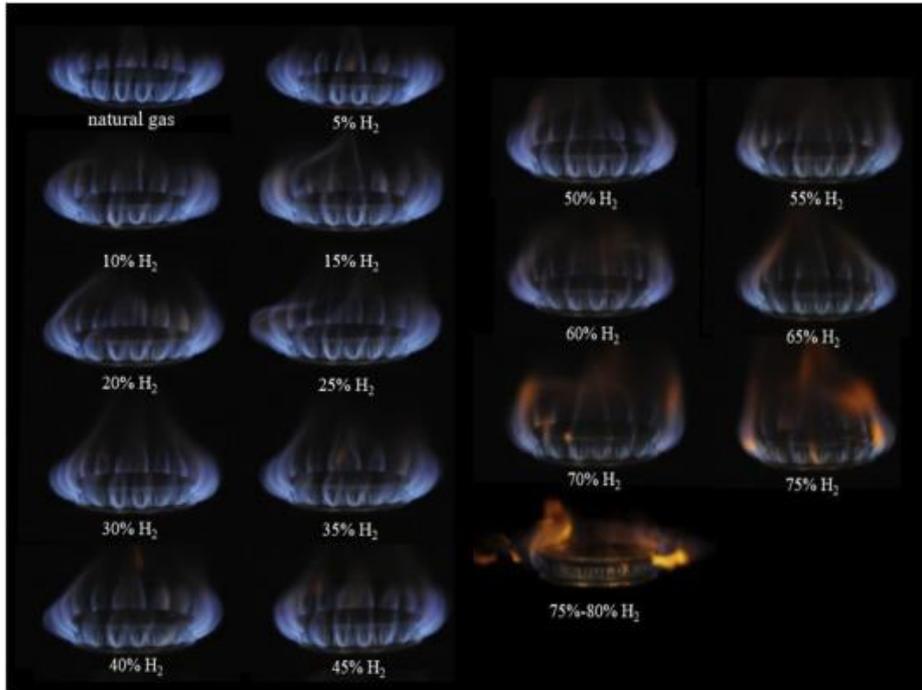
- Pipelines**
  - Repurposed
  - New
  - Import / Export
  - Subsea
- Storages**
  - Salt Cavern
  - Aquifer
  - Depleted field
  - Rock Cavern
- Other items**
  - City
  - Existing or planned Gas-Import-Terminal
  - Energy island for H2 production



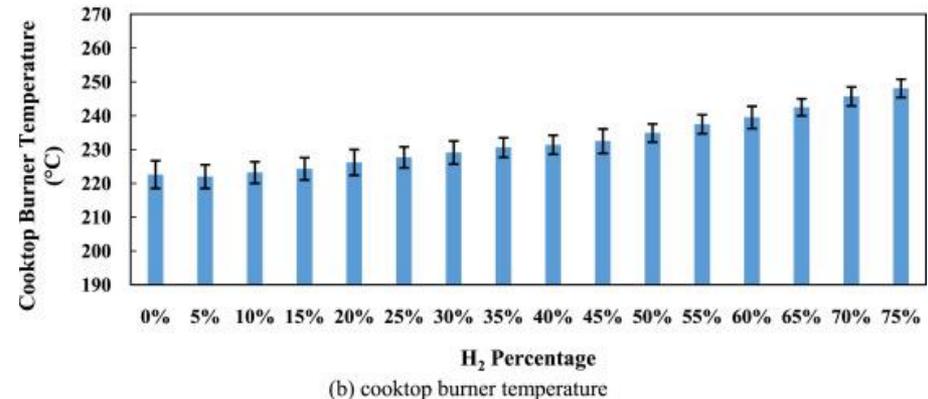
Range depending on input assumptions as described in Appendix A

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%)



- 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)



- 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

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.

