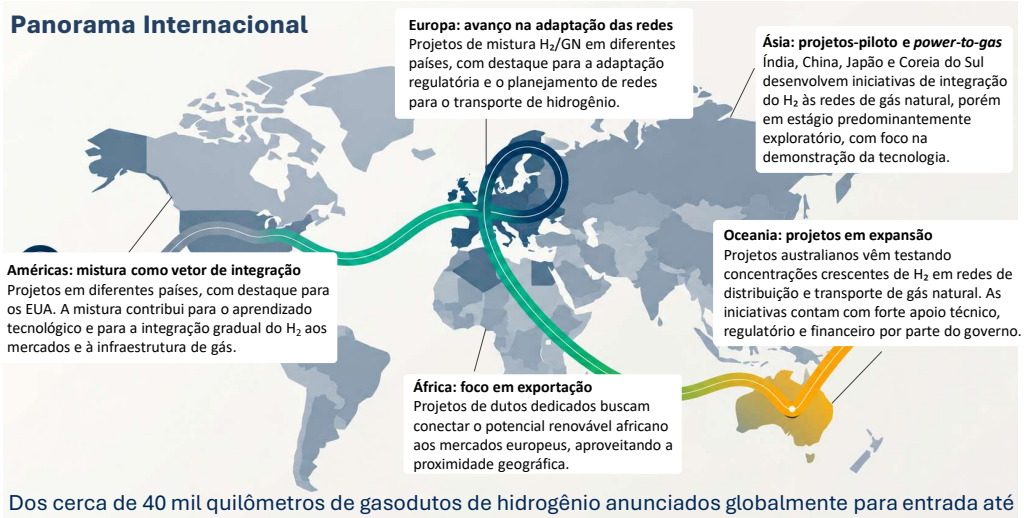
MOVIMENTAÇÃO DE HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO NAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL

Elaboração:
epe
Empresa de Pesquisa Energética

Panorama Internacional



Dos cerca de 40 mil quilômetros de gasodutos de hidrogênio anunciados globalmente para entrada até 2035, aproximadamente 1/3 corresponde à adaptação/ conversão de gasodutos existentes.

Propriedades físico-químicas

O H_2 possui aproximadamente 1/3 da densidade energética volumétrica do GN.



O H_2 e o GN apresentam **propriedades significativamente distintas** e a mistura de H_2 ao GN promove alterações no escoamento, na integridade estrutural, nos custos e na segurança da operação.

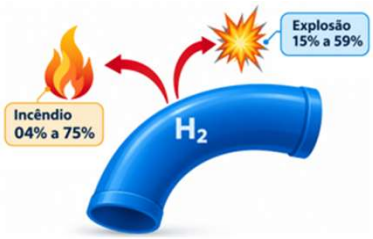
Propriedades	Hidrogênio	Gás Natural
Massa Molecular (g/mol)	2,02	16,04
Densidade (kg/Nm³)	0,09	0,68
PCI mássico (MJ/kg)	120	54,6
PCI volumétrico (MJ/Nm³)	10,8	35,8
Velocidade de Chama Laminar (m/s)	3,1	0,4
Faixa de Inflamabilidade (% vol.)	4 - 75	4,4 - 17
Índice de Wobbe (MJ/Nm³)	38,7	45,27

As propriedades do H_2 podem resultar em **perdas de pressão** ao longo do gasoduto de até 3,5 vezes superiores às do GN, exigindo maiores pressões de entrada na tubulação e/ou maiores requisitos de compressão, para manter o fornecimento de energia comparável ao GN.

Operação & Segurança

Sobre o hidrogênio:

- Molécula pequena e com **elevada difusividade**, podendo penetrar e interagir com materiais metálicos e poliméricos, aumentando o risco de **vazamentos.**
- **Ampla faixa de inflamabilidade** no ar e baixa energia mínima de ignição, por isso, um vazamento pode representar risco de **incêndio ou explosão;** O hidrogênio torna-se inflamável quando sua fração volumétrica no ar varia de 4% a 75%. Quando sua fração volumétrica está entre 15% e 59%, a mistura pode ser explosiva.
- **Chama invisível** à luz do dia dificulta a detecção de incêndios.
- Mesmo assim, o uso de materiais adequados, projetos compatíveis, sistemas de monitoramento e práticas rigorosas de inspeção e manutenção possibilitam uma **operação segura e confiável**.



Fonte: modificado de RAJ, 2024

Integridade Estrutural

- O efeito mais crítico da adição de hidrogênio em misturas com gás natural é a **fragilização por hidrogênio**, que provoca degradação das propriedades mecânicas do material.
- A viabilidade da adaptação de um gasoduto existente para o transporte de misturas (H_2/GN) depende menos do teor de hidrogênio e mais das características específicas de cada ativo, incluindo fatores ambientais, mecânicos e dos materiais.
- Embora o teor de 10% de H_2 seja adotado como referência em regulações existentes e em projetos internacionais, a integridade estrutural pode ser comprometida mesmo em concentrações inferiores.

Aspectos Econômicos

O aproveitamento da infraestrutura existente pode diminuir o CAPEX em comparação à implementação de gasodutos novos e, assim, ajudar a reduzir os riscos associados a esse investimento. Ainda assim, é igualmente necessário considerar os impactos sobre a operação do sistema, os consumidores e a expansão futura da rede, bem como os aspectos regulatórios e de mercado.

Etapas da metodologia de qualificação para eligibilidade de gasodutos (operação com misturas H_2/GN contendo até 10% de H_2)

1. Levantamento documental com compilação do dossiê do ativo
2. Caracterização metalúrgica e mecânica do sistema
3. Inspeção instrumentada de alta resolução
4. Avaliação crítica de engenharia
5. Redefinição da Pressão Máxima Operacional Admissível (PMOA)
6. Estimativa da vida remanescente e definição do plano de monitoramento

Mistura H_2/GN

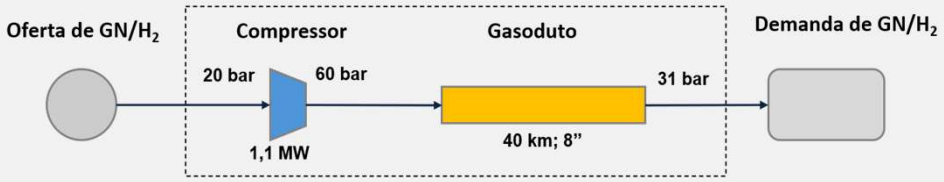
Baixos teores de H_2 (~5%) podem ser incorporados à rede com **poucos impactos econômicos.** Concentrações mais elevadas exigem investimentos crescentes ao longo de toda a cadeia do gás natural, afetando operadores da infraestrutura, setores consumidores e, consequentemente, o **custo final do gás**.

Hidrogênio puro

A conversão de um gasoduto existente para transportar hidrogênio **tem baixo custo de investimento**, cerca de ¼ do CAPEX de um novo duto específico para hidrogênio. No entanto, os **custos operacionais** associados à compressão e à integridade da rede podem ser **muito relevantes.**

ESTUDO DE CASO

Objetivo de desenvolver uma avaliação técnico-econômica da adaptação de um gasoduto de gás natural com as características abaixo para movimentação de misturas contendo H_2.



Casos e Cenários

H_2 (%)	Vazão constante	Energia constante
0 (100% GN)	Cenário base	
2,5	V2,5	E2,5
5,0	V5,0	E5,0
7,5	V7,5	E7,5
10	V10	E10

Metodologia e Premissas

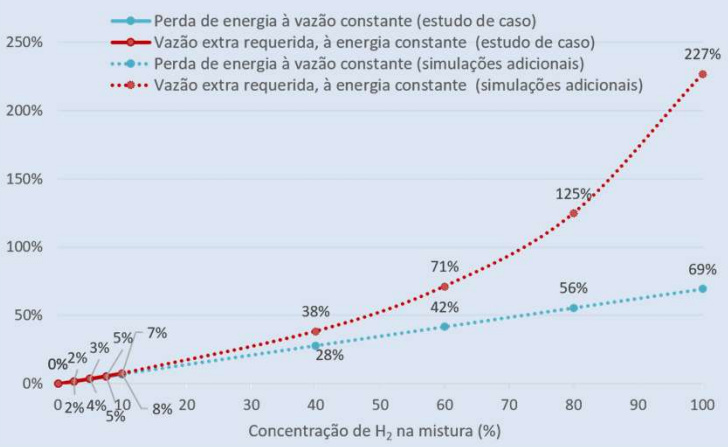
Avaliação técnica – Foram realizadas simulações termofluido-hidráulicas no programa Pipeline Studio para avaliar a movimentação de misturas contendo até 10% de H_2 (fração molar) em uma infraestrutura teórica de transporte de gás natural. Foram analisados dois casos: no primeiro, manteve-se a vazão constante em 1 milhão de m^3/dia; no segundo, variou-se a vazão de modo a manter constante o conteúdo energético, fixado em 450 MJ/s. Considerou-se que o duto atende aos requisitos de elegibilidade para adaptação e transporte de hidrogênio.

Avaliação econômica – Estimativa de CAPEX da adaptação da infraestrutura, utilizando a metodologia do BlendPath, do Programa HyBlend – U.S. DOE. Trata-se de uma metodologia de abordagem única para a estimativa de investimentos, independentemente do percentual de H_2 na mistura H_2/GN. Os custos dos equipamentos foram corrigidos pelos respectivos índices econômicos para o ano de 2025 e foi considerada uma taxa de 50% para sua internalização.

ESTUDO DE CASO

Resultados – avaliação técnica

- Para **baixas concentrações**, de até 10% de H_2, as **propriedades do GN predominam** no comportamento da mistura H_2/GN;
- Foram realizadas simulações adicionais, a título de sensibilidade, para concentrações de H_2 de 40%, 60%, 80% e 100%;
- A partir de 10 a 15% de H_2, ocorre um descolamento das curvas, e a perda de energia mantém comportamento linear, enquanto a **curva de vazão extra tem crescimento acentuado**;
- Como consequência, nem sempre será possível transportar, pela mesma infraestrutura, o mesmo equivalente energético do GN. Dependendo da concentração de H_2, a vazão pode ser muito maior, podendo superar a capacidade de transporte originalmente projetada para GN.

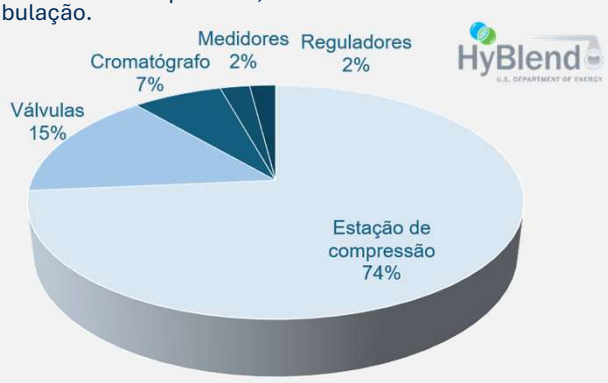


Simulações adicionais: frações de H_2 teóricos na mistura (H_2 > 10%): Objetivo de analisar de forma abrangente os impactos da composição sobre os parâmetros termofluido-hidráulicos.

ESTUDO DE CASO

Resultados – avaliação econômica

- A estimativa de investimento para que a infraestrutura analisada nesse estudo de caso possa movimentar misturas H_2/GN é de aproximadamente **U$ 30 milhões**, seguindo a metodologia do BlendPath.
- O gráfico a seguir mostra a composição dos custos de investimento por equipamento. Como a capacidade do duto não foi ultrapassada, não há custos relacionados à tubulação.



Mensagens-chave do estudo de caso

- O aumento do teor de H_2 aumenta muito a vazão da mistura H_2/GN necessária para transportar o mesmo conteúdo energético: a vazão pode ser 3 vezes maior do que a requerida para o GN.
- A compressão apresentou grande impacto no CAPEX da adaptação, com participação de mais de 70%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Aproveitar a rede de gasodutos existente pode reduzir investimentos iniciais em infraestrutura logística e, assim, apoiar o desenvolvimento do mercado do H_2.
- Com o mercado desenvolvido, a tendência é a migração para infraestruturas dedicadas, principalmente a construção de novos gasodutos;
- A viabilidade de cada alternativa, contudo, depende do teor de hidrogênio a ser transportado e das características específicas da infraestrutura existente, incluindo materiais, equipamentos, condições operacionais e configuração da rede.

Íntegra do documento

Presidente
Thiago Prado

Coordenação Geral
Thiago Prado

Coordenação Executiva
Marcos Souza

Coordenação Técnica
Ana Claudia S. Pinto
Marcelo Alfradique
Henrique Rangel

Equipe Técnica
Carolina O. de Castro
Claudia M. C. Bonelli
Gabriel L. da Silva
Gabriela N. da Silva
Harnon M. Ramos
Nelson P. Filho

A EPE se exime de quaisquer responsabilidades sobre decisões ou deliberações tomadas com base no uso das informações contidas neste estudo, assim como pelo uso indevido dessas informações.

OUTUBRO/2026