

Artigo

Estudo Teórico dos meios de Transporte do Hidrogênio Verde

Leonardo Machado Cintra ^[1], Dr. Fabrício José Nobrega Cavalcante ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Aluno; Leonardo.cintra@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Orientador; Fabriciocavalcante@ufersa.edu.br

Data da defesa: 25/10/2024;

Resumo: Este trabalho investiga a viabilidade do transporte de hidrogênio no Brasil, levando em consideração as peculiaridades territoriais e infraestruturais do país. O hidrogênio se apresenta como uma alternativa promissora para a transição energética, mas sua implementação enfrenta obstáculos logísticos significativos. A vasta dimensão do território brasileiro, aliada à infraestrutura rodoviária precária em diversas regiões e a limitada malha ferroviária, impõe desafios expressivos para o transporte eficiente do combustível. Adicionalmente, a ausência de uma rede nacional de gasodutos que cubra todos os estados e a concentração do transporte marítimo apenas nas regiões costeiras dificultam ainda mais a distribuição do hidrogênio em escala nacional. Para viabilizar o transporte de hidrogênio no Brasil, são necessários investimentos substanciais na modernização das rodovias, na expansão das ferrovias e na criação de uma rede integrada de gasodutos. Além disso, o desenvolvimento de polos regionais de produção e consumo de hidrogênio poderia minimizar a dependência de longos trajetos de transporte. Este trabalho contribui para a discussão sobre o potencial do hidrogênio no cenário energético brasileiro e destaca a necessidade de aprimorar a infraestrutura logística como um fator crucial para sua plena adoção no país.

Palavras-chave: hidrogênio; hidrogênio verde; transporte de hidrogênio; hidrogênio verde no Brasil.

1. INTRODUÇÃO

A energia fóssil como sugere o nome é obtida através dos combustíveis fósseis que tradicionalmente são compostos pelo petróleo, gás natural ou carvão. Segundo [1] os combustíveis fósseis são resultados da decomposição de organismos vivos durante as eras sob efeito da temperatura e pressão. Diferente das energias renováveis, as fontes de combustíveis fósseis são limitadas.

O autor [1] também comenta da diferença entre recurso e reserva, segundo o mesmo, os recursos podem ser entendidos como depósitos que ainda estão à espera de ser aproveitados, enquanto a reserva que podem ser extraídas utilizando recursos e tecnologias.

Segundo [1] as reservas de gás natural assim como de carvão excedem largamente os montantes acumulados, principalmente no continente asiático, ainda adicionamos que novas reservas podem ser exploradas nos próximos anos para sustentar a demanda crescente por muitos anos. Entretanto, a perspectiva para o petróleo são que suas reservas se esgotem antes.

O petróleo assumiu a liderança de combustível mais utilizado na década de 60 e a expectativa é que continue enquanto houver reservas, entretanto, o gás natural vem aumentando sua participação no mercado mundial. As projeções indicam os combustíveis fósseis como fonte de energia dominante em um futuro previsível, entretanto, políticas ambientais e o desenvolvimento de novas tecnologias auxiliam no processo de substituições das fontes fósseis. [2] trazem dados que a demanda de energia aumentará entre 25 e 30% até o ano de 2040 e reforça que a economia ainda é muito dependente do carvão e do petróleo resultando e mais

emissão de dióxido de carbono, CO_2 . Segundo [3], a matriz energética mundial é composta por matrizes convencionais e não renováveis, que juntos compreendem cerca de 71,1% de toda a energia produzida.

Segundo [1] uma parcela das alterações climáticas é atribuída ao aumento da concentração de gases na atmosfera e os combustíveis fósseis são responsáveis desta ocorrência, consequente da emissão de gases poluentes através da queima dos componentes. [3] cita que além do aquecimento global, o sistema de energia convencional, ou seja, provenientes de combustíveis fósseis passa por esgotamento progressivo, esse problema incentiva os países a utilizarem fontes alternativas de energia como eólica, fotovoltaica, biocombustível, entre outros.

1.1 QUÍMICA DO HIDROGÊNIO

O gás hidrogênio ou gás ultraleve, é um composto formado por dois átomos de hidrogênio ligados através de uma ligação covalente, sendo o mais leve da tabela periódica e representado através da fórmula química H_2 .

O hidrogênio é o elemento mais simples e abundante do universo, segundo [4] compõe cerca de 70% da superfície terrestre, porém, este elemento encontra-se combinado com outros elementos e não aparece naturalmente, assim, não pode ser considerado como um recurso primário, como por exemplo o petróleo ou gás natural.

O hidrogênio é um átomo simples composto por um próton e um elétron, essa combinação o torna diferente de qualquer outro elemento conhecido. Assim, na tabela periódica é colocado no topo do grupo, separado, classificado como metal alcalino. Seu núcleo é habitado por um único próton enquanto o elétron orbita em sua camada de valência.

O hidrogênio pode ser encontrado no estado gasoso ou líquido, em condições de temperatura e pressão normais, possui as seguintes características: inflamável, inodoro, incolor e insolúvel em água, além de ser mais leve que o ar. Em estado líquido, precisa ser armazenado em sistemas criogênicos. Os gases de modo geral, podem ser liquefeitos se submetidos a aplicações de altas pressões ou por resfriamentos a baixas temperaturas, segundo [4] o hidrogênio é convertido em líquido à temperatura de -253°C . O hidrogênio também pode ser armazenado em gás comprimido. Segundo [3], cada quilograma de hidrogênio contém cerca de 2,4 vezes mais energia do gás natural.

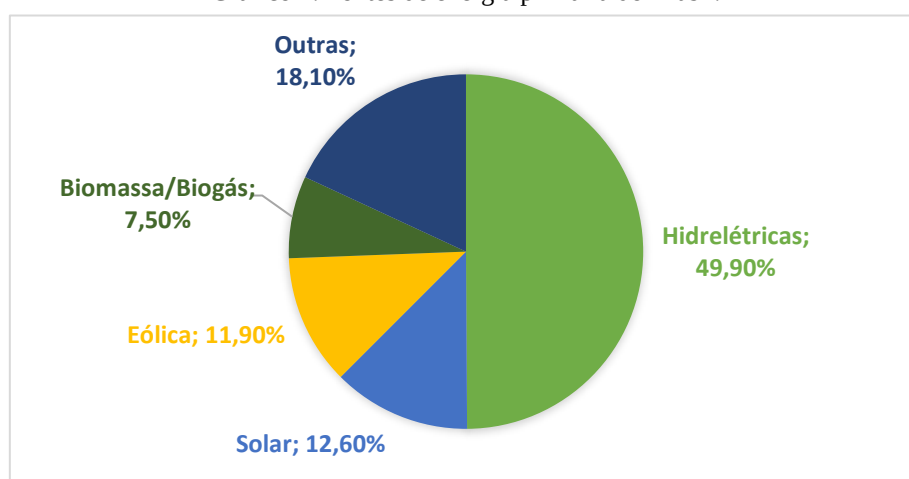
Segundo [4] o hidrogênio possui uma quantidade de energia por unidade de massa superior a qualquer outro combustível conhecido, sendo de $120,7\text{ kJ/gr}$, assim como a maior quantidade de energia por unidade de peso, sendo de $141,9\text{ MJ/kg}$. Dessa forma, 1 kg de hidrogênio possui a mesma quantidade energética que aproximadamente $2,8\text{ kg}$ de gasolina. Ainda podemos acrescentar que se o gás atingir o estado líquido, o baixo peso molecular ocuparia um espaço equivalente a $1/700$ do que se comparado ao estado gasoso.

Segundo [4] a chama do hidrogênio não é visível à luz do dia devido a sua emissividade muito baixa, cerca de 17 a 25%, sendo menor do que outros combustíveis como o butano, propano e até a gasolina. Ainda pelo mesmo autor, a densidade energética do hidrogênio é de 38 KWh/kg contra 14 KWh/kg da gasolina, ou seja, e a energia necessária para ignição é de apenas $0,04\text{ mJ}$ contra $0,25\text{ mJ}$ dos hidrocarbonetos. Esses dados mostram que o hidrogênio é extremamente inflamável e em algumas condições, pode ocorrer a auto inflamação.

1.2 FONTES DE ENERGIA E ENERGIA RENOVÁVEIS NO BRASIL

Segundo [3] a matriz energética do país é composta principalmente por fonte de energia renováveis, sendo a maior parte desta sendo gerada por usinas hidrelétricas. Além disso, é citado o crescimento da energia eólica e da geração distribuída, GD, que é a geração das placas solares que contribui para a energia elétrica continue renovável. As fontes de energia primária do Brasil estão exemplificadas no Gráfico 1 abaixo, onde exhibe as parcelas de atuação das fontes principais.

Gráfico 1. Fontes de energia primária do Brasil.



1.3 HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL

O gás hidrogênio se destaca como uma boa alternativa de energia limpa tendo como características sua eficiência e versatilidade, de acordo com [5] é defendido o uso do hidrogênio como fonte de energia futura bem como sobre o uso do hidrogênio como combustível proporciona uma flexibilidade permitindo uma maior integração de fontes renováveis intermitentes.

Ainda para [5], o hidrogênio é um dos combustíveis que possui a maior capacidade de armazenamento de energia dentre aqueles disponíveis no mercado. Além disso em sua combustão produz apenas água, sendo ela vapor ou líquida o que não polui o meio ambiente.

O hidrogênio quando produzido pode ser convertido em eletricidade com uma eficiência relativamente alta e pode servir como complemento para a produção de energia elétrica em diversos setores. Ainda pode ser transportado por grandes distâncias através de tubulações, tanques ou caminhões [5].

Como citado anteriormente, estando isolado o hidrogênio é quimicamente reativo, dessa forma, normalmente existe combinado com outros elementos, como por exemplo, oxigênio na água, carbono no cloro, e na maioria dos compostos orgânicos. Este elemento também está associado ao petróleo, carvão, metano, gás natural, desta forma, existe uma necessidade de separação dos átomos de hidrogênio dos restantes elementos no quais se encontra associado [4].

O autor [2] comenta sobre o aumento da demanda global de hidrogênio, que passará de aproximadamente 70 milhões de toneladas em 2019 para cerca de 120 milhões em 2024.

1.4 PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

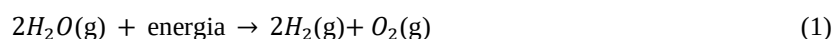
Segundo [2] a produção de hidrogênio é obtida da extração de outros componentes de combustíveis fósseis ou renováveis. A extração a partir de combustíveis fósseis é o mais comumente utilizado industrialmente, sendo um método maduro e rentável. O mesmo autor completamente dizendo que existem diversas formas de extrair o gás hidrogênio de fontes naturais contendo hidrogênio, sejam eles os hidrocarbonetos ou não utilizando métodos fotônicos, elétricos, químicos, bioenergéticos, através do calor ou pela combinação dos métodos citados. Ainda de acordo os autores, os mesmos trazem uma tabela na qual é possível ver métodos de produção do gás hidrogênio a partir de diferentes matérias primas além de citar a sua eficiência energética.

Tabela 1 - Diferentes formas de produção do gás hidrogênio

Matéria-prima	Método	Eficiência energética
Água	Eletrolise	61-82%
Biomassa	Termólise via pirólise	35-50%
	Termólise via gaseificação	
Carvão	Termólise via gaseificação	74-85%
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60-75%
Gás natural	Reforma do metano a vapor	74-85%

Para [5] a produção do hidrogênio se dá principalmente a partir dos combustíveis fósseis, seja ele gás natural, petróleo ou carvão, sendo utilizado em refinarias para processar o petróleo bruto, na indústria química para sintetizar compostos e na indústria metalúrgica como gás de redução ou proteção.

Uma das formas mais simples de se obter o hidrogênio é através do processo de eletrólise, na qual a água é purificada e enviada para um eletrolisador que produz o hidrogênio e oxigênio [2]. O processo é descrito na equação abaixo.



Dessa forma, o hidrogênio é seco, purificado e comprimido para armazenamento a uma pressão de cerca de 10,3 a 413,7 bar. Embora seja um dos métodos que ofereça uma rota 100% renovável para a produção de hidrogênio, este representa menos de 5% da produção mundial de hidrogênio [2].

O hidrogênio é sempre um gás incolor, mas, dependendo de sua origem, carrega em seu nome cores diferentes. Ou seja, quando o hidrogênio é usado como um transportador de energia, é feita uma distinção entre hidrogênio cinza, azul, marrom ou preto, turquesa e verde [2]. Com exceção do hidrogênio verde, o produto das reações produz o hidrogênio mais dióxido de carbono.

O hidrogênio azul é produzido a partir de hidrocarbonetos, principalmente o gás natural e no seu processo também produz CO_2 . Entretanto, esse CO_2 é captura e armazenado no subsolo, processo chamado de captura e armazenamento de carbono. Dessa forma, apesar de produzir CO_2 o mesmo não é liberado para a atmosfera.

O hidrogênio marrom e o hidrogênio preto são produzidos via processo de gaseificação. É um processo usado em muitas indústrias que convertem materiais ricos em carbono em hidrogênio e CO_2 . Como resultado, a gaseificação libera esses subprodutos para a atmosfera [2]. O mesmo autor complementa que dependendo do desenvolvimento tecnológico da indústria, ela pode adotar mecanismos para armazenar a emissão desses gases e realizar a separação.

O hidrogênio cinza já é utilizado em grande escala, especialmente na indústria química. Os combustíveis fósseis são utilizados para a sua produção e o gás natural é dividido pelo calor em hidrogênio e CO_2 . Durante sua produção o CO_2 não é captura e armazenado, mas sim liberado na atmosfera onde aumenta o efeito estufa [2].

Segundo [3] a grande parte da produção de hidrogênio verde utiliza o gás natural como matéria prima, gerando o gás hidrogênio (H_2) e gás carbônico (CO_2). O gás natural pode ser decomposto em gás hidrogênio, o chamado hidrogênio turquesa, e carbono sólido em um processo térmico denominado fissão térmica do metano ou pirólise do metano. Então, apesar de produzir o carbono no processo o mesmo não precisa ser armazenado no subsolo pois não está em seu estado gasoso [2].

Como visto anteriormente, existem diferentes cores que são associados ao hidrogênio dependendo de sua obtenção. Ainda junto ao hidrogênio podemos ter outros produtos sendo principalmente o carbono seja na forma de gás ou sólido, entretanto, existe um gás produzido que consegue ser ecologicamente sustentável e sem a emissão de carbono, o hidrogênio verde.

Segundo [2], o hidrogênio verde é produzido a partir das energias renováveis, solar ou eólica, por exemplo, e sua produção é limpa de gás carbônico.

O processo de produção do hidrogênio verde se dá a partir da molécula de água que é dividida em gás oxigênio e gás hidrogênio utilizando a eletricidade em um processo chamado eletrólise da água.

Apesar da utilidade, as classificações por cores se tornaram obsoletas, no entanto, eles estão sendo ampliados por métricas quantitativas e classificações baseadas em normas, como a corrente de intensidade de carbono. Por exemplo, a União Europeia adotou uma abordagem que é muito mais detalhada sobre as emissões do CO_2 na produção do hidrogênio. Como resultado, está definindo padrões de intensidade de emissões por quilograma de hidrogênio, independentemente da cor, enquanto desencoraja tecnologias de alta emissão e apoia as de baixa emissão. Não são apenas as cores, mas abordagens mais técnicas que permitem que empresas e governos avaliem e regulamentem as emissões de carbono de maneira mais realista, especialmente quando avançam em direção a metas de descarbonização.

De modo a complementar a informação, temos também o uso recente do chamado hidrogênio amarelo, essa é uma nomenclatura adotada para a produção do hidrogênio feito a partir da eletrólise da água com o uso de eletricidade proveniente de usinas nucleares. Este método de produção do hidrogênio é livre de emissão de CO_2 .

1.5 APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é relevante em áreas onde a eletrificação não é possível, ou seja, no transporte aéreo de longa distância, de mercadorias pesadas e no transporte marítimo [2]. Essas situações exemplificam a necessidade de

uma fonte de energia com potencial energético suficiente para movimentar grandes cargas e grandes meios de transportes sem a necessidade da utilização do combustível fóssil.

Como dito anteriormente, o hidrogênio não gera gases poluentes quando queimado, pois o produto da reação é água. Esse fator é ideal para o hidrogênio se tornar no futuro o substituto do combustível fóssil e utilizado como fonte de energia tanto para meios de transportes como na indústria. O hidrogênio comprimido, H_2 , possui densidade energética adequada para transporte de longas distâncias seja na terra ou na água.

De acordo com o autor [2] traz algumas aplicações para o hidrogênio como veículos passageiros com células movidas a hidrogênio verde, principalmente para uso coletivo, ou seja, transporte público, em grandes centros urbanos como forma de reduzir a emissão de CO_2 .

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este documento foi escrito tendo embasamento teórico referências bibliográficas nacionais e internacionais a respeito da produção, utilização, armazenamento do hidrogênio em suas diferentes formas e custos operacionais de transporte e manutenção. A proposta de escrita leva em consideração as formas de traslado do hidrogênio em países do continente europeu, africano e da Oceania, como forma de viabilizar a utilização e transporte no Brasil.

Neste estudo, foi realizada uma análise teórica sobre os principais meios de transporte do hidrogênio verde, com foco nas modalidades mais promissoras para o contexto brasileiro. A metodologia empregada baseou-se na revisão de literatura especializada em transportes por dutos, gasodutos, navios e transporte terrestre. Foram utilizadas como principais fontes de dados artigos revisados por [7] e [8]. Os parâmetros analisados incluíram viabilidade técnica, eficiência energética e custo de implementação.

3. RESULTADO

Este estudo teórico sobre os meios de transporte do hidrogênio verde permitiu analisar diversos aspectos fundamentais para a sua implementação em larga escala. Inicialmente, discutiu-se o papel dos veículos movidos a hidrogênio como uma alternativa promissora para a descarbonização do setor de transportes, comparando seu desempenho e viabilidade com os veículos elétricos. Além disso, o estudo abordou as principais dificuldades associadas ao transporte e armazenamento do hidrogênio, considerando a eficiência e as infraestruturas necessárias. Finalmente, foram avaliados os custos envolvidos na produção, transporte e utilização do hidrogênio, fornecendo uma visão abrangente sobre os obstáculos econômicos que precisam ser superados para viabilizar o uso dessa tecnologia no Brasil.

3.1 TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO HIDROGÊNIO

Existem duas formas principais de transportar o gás hidrogênio, a primeira seria o transporte através de um gasoduto, e a segunda é o armazenamento do gás em tanques de diferentes formas. A diferença entre as formas são a possibilidade de armazenamento móvel e o transporte direto.

As duas alternativas de transporte do gás hidrogênio geram custos sejam eles para construção e manutenção do gasoduto ou tanque de armazenamento, desta forma, o custo geral para fornecimento do hidrogênio pode ser dividido em três fatores diretos: A quantidade de hidrogênio fornecido, transporte e

distância. Outro fator que também precisa ser levado em consideração é o estado do hidrogênio durante o transporte.

De acordo com [7], os modos existentes para armazenamento seriam o hidrogênio comprimido e o hidrogênio criogênico.

A compressão do gás hidrogênio é uma possibilidade que aumenta a densidade de energia volumétrica e pode ser feita em diferentes pressões como foi citado anteriormente por [6] e depende da finalidade de utilização do gás. A compressão do gás pode ser feita por compressores mecânicos, eletroquímicos ou compressor de hidreto, sendo que cada um dos compressores possui seus custos e eficiência. Devido à pressão submetida ao gás, todo o conjunto de armazenamento e transporte devem ser projetados para suportar a pressão além de lidar com o fato de o hidrogênio ser um gás volátil e reativo.

O método de armazenamento de hidrogênio criogênico é mais complexo, segundo [7], a temperatura do hidrogênio é reduzida até próximo do seu ponto de ebulição, cerca de 20 K ou $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, onde nesta temperatura o hidrogênio se torna líquido. O processo criogênico é feito através de uma planta de liquefação conforme mostrado na Figura 1

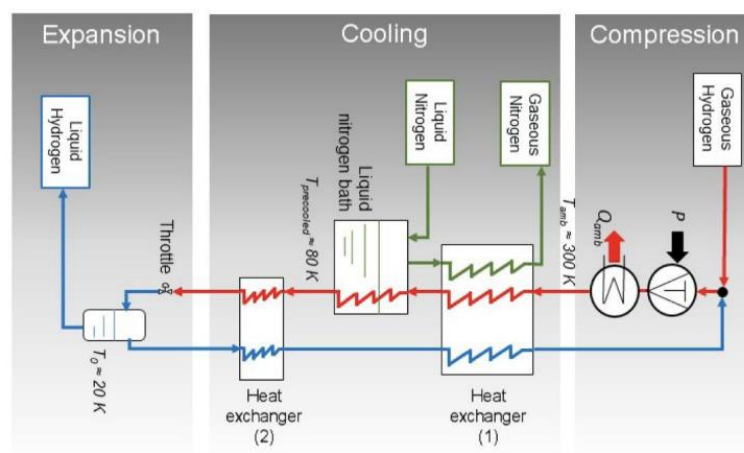


Figura 1. Processo de liquefação.

A figura anterior mostra o ciclo de Claude, nele o primeiro passo é comprimir o hidrogênio para aumentar a sua pressão, esta etapa facilita o processo subsequente de resfriamento. O resfriamento é realizado utilizando um outro gás refrigerante, geralmente o nitrogênio liquefeito, que serve como trocador de calor. Para resfriar ainda mais o hidrogênio, ele é expandido na etapa seguinte por turbinas e reprocessado em seguida.

Plantas de liquefação maiores costumam utilizar do ciclo de Claude para liquefazer o hidrogênio, ao contrário de liquefação menores que utilizam o ciclo de Brayton com o gás hélio como refrigerante.

Ainda segundo [7], existem diferentes formas de armazenar o hidrogênio liquefeito, mais comumente feito em tanques criogênicos. Tais tanques possuem paredes de metal, como por exemplo a perlita, que atua como isolante. Entretanto, o autor comenta sobre o termo *boil-off* que se refere à evaporação de um líquido criogênico devido ao ganho de calor do ambiente, ou seja, mesmo que o líquido esteja em um recipiente isolado termicamente, ainda existe uma pequena quantidade de calor que entra no sistema ao longo do tempo.

O hidrogênio evaporado através do *boil-off* pode tornar a pressão no interior do tanque perigosamente alta, para evitar acidentes, são instaladas válvulas de segurança de pressão. Além disso, o hidrogênio evaporado é

visto sendo uma perda do transporte, energia e lucro. Entretanto, existem equipamentos suplementares que podem ser instalados e fazem com que o hidrogênio evaporado volte a planta de liquefação.

O autor [7] também comenta sobre a chegada do gás hidrogênio no seu destino final, nesse momento, é necessário transferi-lo para um sistema de armazenamento local. O autor também comenta sobre a diferença de pressão entre o recipiente e o sistema de armazenamento local ser crucial.

Além da compressão e da liquefação, existe outro método especial de conversão do hidrogênio de modo a facilitar seu transporte, trata-se da conversão em outros compostos químicos.

Segundo [8], o transporte de hidrogênio orgânico líquido, em inglês, Liquid organic hydrogen carriers – LOHC's é um método de produção que envolve o armazenamento de hidrogênio em uma forma química ligada por meio de hidrogenação catalítica reversível. A principal vantagem dos LOHC's é a sua capacidade de serem armazenados com segurança em condições estáveis, onde não é utilizado nem pressões altas nem temperaturas baixas, isso eleva a pureza do hidrogênio após a reconversão. Os LOHC's podem ser armazenados ou transportados por meio de gasodutos ou veículos dedicados.

Podemos também utilizar outros componentes para transportar o hidrogênio, como por exemplos a amônia. A amônia é um produto químico inorgânico amplamente utilizado em todo mundo, alguns países já possuem uma cadeia de suprimentos madura e eficientes que garante a infraestrutura para transporte e distribuição e reduz custos ao atingir os usuários finais. Entretanto, devido a toxicidade da amônia o produto requer cuidados ao manuseio de pessoas qualificadas e certificadas.

Outro grande consumidor de hidrogênio é a amônia, que corresponde a mais de um quarto do H_2 produzido mundialmente. Foi estimado que no ano de 2020 mais de 185 milhões de toneladas de amônia foram produzidas e existe a previsão que em 2050 ocorra o aumento de torno de 40% da produção de amônia devido aos fatores de crescimento econômicos e demográficos.

3.4 CUSTOS

Os custos associados ao transporte do hidrogênio variam de diversas formas, entretanto, para a dinâmica deste trabalho será considerado o tipo de transporte utilizado, assim como os custos de armazenamento. Assim, os métodos mais comuns de transportes analisados serão: gasoduto, caminhão (transporte rodoviário), navio (transporte marítimo) e trem (transporte ferroviário), além de que estamos assumindo o armazenamento de hidrogênio em cavernas de sal, hidrogênio líquido em tanques esféricos, amônias em tanque refrigerados e hidrogênio comprimido em vasos pressurizados. Esta linha de pensamento segue de acordo com [8].

De acordo com a Tabela 1, temos três dos quatro meios de transportes citados anteriormente e suas estimativas de custos. Vale ressaltar que os custos variam com o transporte, produção, armazenamento, manutenção, valor da moeda, entre outros demais fatores. Para a figura, será considerado o custo relacionado ao CAPEX, ou seja, custo capital adicionado aos custos de quilometragem. Levando em consideração a moeda utilizada nas referências é o dólar australiano (A\$), iremos adotar a cotação base de câmbio para dólares americanos.

TABELA 2. Detalhamento de custos para transporte de hidrogênio em caminhões.

Métodos de transporte	Custo CAPEX (US\$)	Custo (US\$/kgH ₂ /50km)
Gasodutos	648,9 K - 976.6 K/km	+ 63 K – 189 K
Caminhões	CGH ₂ : 604.8 K LH ₂ : 875.7 K	CGH ₂ : 661,5 K LH ₂ : 3,7 M
Navios	195.3 M – 335,8 M	NH ₃ : +12,6 K LH ₂ : +31,5 K

Fazendo uma análise da tabela anterior, o transporte que utiliza gasodutos tem o menor custo CAPEX por quilômetro, entretanto, o custo operacionado por quilo de hidrogênio varia de forma moderada se comparado aos demais. O transporte de hidrogênio realizado por caminhão é o mais caro, e esse valor se eleva ainda mais se o hidrogênio estiver na sua forma líquida (LH₂), se comparado ao comprimido (CGH₂). Por fim, o transporte por navios tem o maior CAPEX inicial, entretanto, os custos operacionais tanto para transporte a amônia (NH₃) como hidrogênio líquido (LH₂) são menores.

3.4.1 GASODUTOS

Segundo [8], os gasodutos são de fato a maneira mais barata de se transporte grandes volumes de hidrogênio por longas distâncias de terra, principalmente das instalações de produção ou armazenamento para sistemas de distribuição de baixa pressão, ou seja, consumidores finais. Além disso os gasodutos têm baixos custos operacionais e possuem uma vida útil de 40-80 anos. Entretanto, esses custos são avaliados para países que já possuem um sistema de gasodutos disponíveis e em operação, vale ressaltar que é possível utilizar gasodutos de gás natural existentes. A suas desvantagens fica a respeito dos custos de capital (CAPEX) e da necessidade de adquirir *right of way* (RoW) que seria o direito legal de uma empresa ou entidade de atravessar ou utilizar uma propriedade de outro dono para um propósito geralmente relacionado ao transporte ou instalação de serviços.

Os gasodutos precisam possuir medidores, válvulas e sistemas que garantam a pressão adequada para transporte e evitem maiores perdas, além disso, alguns tubos de ferro ou aço podem sofrer reações com hidrogênio gerando rachaduras. Para solucionar este problema, existem tubulações feitas de polietileno (tubo PEAD) ou outros polímeros e plásticos reforçados não são sujeitos à problemas de rachaduras por reação ao hidrogênio. Uma alternativa ao problema de gasodutos de ferro ou aço seria a implementação de um revestimento interno plástico, para evitar tais problemas, outra alternativa é o transporte junto a amônia.

No Brasil, país de análise, existe um complexo de gasodutos que conectam alguns estados principalmente do litoral onde o produto comercializado é o gás natural. Essa rota de gasoduto passa por diferentes estados como por exemplo, Ceará, Rio Grande do Norte e vão se estendendo até Pernambuco e chegam até grandes centros econômicos da região sudeste como Rio de Janeiro e São Paulo. A parte oeste do país ainda não dispõe de complexos de gasodutos para consumo.

3.4.2 CAMINHÕES

Partindo para análise dos caminhões como transporte rodoviário do hidrogênio, ele é o método mais caro de acordo com a Tabela 1 citada anteriormente, porém é um dos métodos mais versáteis segundo [8] em locais que necessitam de baixa demanda de hidrogênio, para curtas distâncias ou para entregas de volumes menores. Para o transporte rodoviário, as formas mais comumente utilizadas são para o hidrogênio comprimido ou hidrogênio líquido.

Os caminhões podem possuir um reboque, similar ao utilizado pela indústria química no transporte de combustível fóssil, em especial gasolina, para carregamento do hidrogênio líquido ou caminhões com tubos cilíndricos dentro de contêineres para carregamento de hidrogênio comprimido.

Dentro da economia brasileira, o transporte rodoviário ainda é um setor que movimenta milhões e é responsável por grande parte da locomoção de cargas, mercadorias e produtos na logística interna apesar que diversos setores estaduais sofrem prevaricação na manutenção das estradas. Outro fator é a gigantesca extensão territorial, o transporte rodoviário de hidrogênio sofreria com fatores tanto de *boil-off* citado diversas vezes neste trabalho além da possível instabilidade do gás em estradas deterioradas ou de terra que pode acarretar em aumento de pressão interna do gás e gerar acidentes.

Ainda no caso de transporte do hidrogênio comprimido, um reboque consegue transportar cerca de 1.100 kg/H₂ a uma pressão de 500 bar, dando uma menor capacidade entre as opções de transporte, entretanto, esse peso é raramente alcançado já que é posto em práticas regulamentações de segurança que limitam a pressão dos tubos. Por esses fatores, os caminhões com tanques criogênicos para transporte do hidrogênio líquido são comumente mais usados, e podem transportar cerca de 4000 kg/H₂ além de serem usados para distâncias de até 4000 km. Para longas distâncias o uso rodoviário não é recomendado, pois o hidrogênio pode receber calor do ambiente aumentando sua temperatura e causando perigo, além disso, foi citado anteriormente por [7] o efeito *boil-off* sentido pelo líquido criogênico.

De acordo com o [8], os custos capital (CAPEX) para um caminhão que transporta o hidrogênio comprimido é de cerca de A\$ 776.700 para uma capacidade padrão de 700 kg/H₂ além de um custo adicional da unidade tratora movida a diesel custando cerca de US\$ 115,1 mil, totalizando cerca de aproximadamente US\$ 604,8 mil. Já para um caminhão utilizado para transportar hidrogênio criogênico, o CAPEX é de cerca de US\$ 760,3 mil para uma capacidade de 4.400 kg/H₂, considerando o custo adicional da unidade tratora a diesel, totalizamos cerca de US\$ 875,7 mil. As informações anteriores a respeito do transporte rodoviário foram resumidas e podem ser vista na Tabela 2.

TABELA 2. Detalhamento de custos para transporte de hidrogênio em caminhões.

Tipo	Custo CAPEX (US\$)	Capacidade
CGH ₂	~ 604,8 K	700 kg/H ₂
LH ₂	~ 875,7 K	4.400 kg/H ₂

3.4.3 NAVIOS

A análise da viabilidade do transporte marítimo de hidrogênio através de navios também passa pela infraestrutura portuária existente para manuseio do gás, segundo [8], essas infraestruturas incluem tanques de armazenamentos, processos de liquefação, gaseificação e plantas de conversão. Possuir uma infraestrutura

apropriada para o manuseio do hidrogênio garante carregamentos e recebimentos apropriados sem grandes perdas de cargas.

Economicamente, o Brasil possui portos importantes para o comércio interno e externo, podemos citar um dos mais conhecidos sendo o Porto de Santos localizado na cidade de Santos/SP, entretanto, existem outros que devem ser postos em destaque como por exemplo o Porto de Rio de Janeiro. Novamente, a movimentação marítima auxilia no transporte do hidrogênio em cidades do leste brasileiro, enquanto o transporte para o oeste não é facilitado através de fluxos marítimos, nem toda embarcação consegue atravessar certos canais o que diminui o abastecimento do hidrogênio. Uma das soluções passa pelo chamado Porto de Manaus, localizado na cidade de Manaus/AM na qual poderia servir como ponto de chegada do hidrogênio através do transporte marítimo e servir como ponto inicial de distribuição para demais localidades através da combinação com o transporte rodoviário.

Além disso, o tamanho dos navios para transporte do hidrogênio é bem menor se comparado aos navios de GNL (do inglês LNG – Liquefied Natural Gas) devido a novos desenvolvimentos de projetos que garantem a confiabilidade e a segurança do transporte do hidrogênio, além de que os navios devem estar regulados de acordo com organizações marítimas internacionais. Ainda utilizando parâmetros de comparação com navios GNL, eles possuem cerca de 350 m de comprimento e capacidade de até 260.000 m^3 . Outra preocupação é com a inflamabilidade e vazamento que os compartimentos marítimos possam sofrer além do *boil-off*.

Devido ao percurso marítimo ser bem maior do que o rodoviário, as perdas por *boil-off* também são mais significativas, de acordo com [8] em uma embarcação que percorre um trajeto da Austrália até o Japão por exemplo, a duração do percurso é de 16 dias com cerca de 0,2-3,2% de *boil-off* por dia.

4. CONCLUSÃO

Em suma, este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade do transporte de hidrogênio no Brasil com ênfase no transporte rodoviário, considerando os desafios técnicos, geográficos e logísticos envolvidos na distribuição desse combustível no extenso território brasileiro. O estudo ressaltou o potencial do hidrogênio como fonte energética, mas também identificou os obstáculos relacionados à infraestrutura de transporte no país.

A dimensão territorial do Brasil se mostra um fator crítico, uma vez que o vasto território nacional impõe grandes desafios logísticos. Regiões distantes dos grandes centros consumidores enfrentam barreiras significativas para a implementação de uma rede eficiente de transporte de hidrogênio. Essas dificuldades são agravadas pela infraestrutura rodoviária precária em diversos estados, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, onde a falta de estradas de qualidade e a conectividade limitada dificultam o transporte de cargas, incluindo o hidrogênio. Acrescentado a estes fatores, temos o fator do clima majoritariamente tropical que poderá aquecer o hidrogênio em longos percursos terrestres.

Além disso, a situação do transporte rodoviário poderia ser substituída por um sistema ferroviário, porém a ausência deste sistema robusto restringe ainda mais as opções logísticas no país. Diferente de outros países que utilizam amplamente o transporte ferroviário para cargas perigosas e pesadas, a malha ferroviária brasileira é insuficiente e mal distribuída, tornando essa modalidade de transporte pouco viável no contexto atual.

O transporte marítimo pode oferecer uma solução parcial, mas é limitado principalmente ao litoral, onde se encontram os maiores portos. As regiões do interior, longe da costa, enfrentariam grandes dificuldades logísticas devido à dependência de outros meios de transporte.

Outro fator relevante é a falta de um sistema de gasodutos que abranja todos os estados brasileiros. O transporte de hidrogênio por gasodutos poderia ser uma solução eficiente e segura, mas atualmente o Brasil não possui uma rede nacional de gasodutos que conecte todas as regiões do país, o que limita severamente a

distribuição do combustível. A expansão dessa infraestrutura seria fundamental para possibilitar o transporte em larga escala e aumentar a competitividade do hidrogênio como fonte de energia alternativa.

Portanto, conclui-se que, apesar do grande potencial do hidrogênio, o transporte no Brasil enfrenta graves desafios logísticos, entre eles a falta de rodovias adequadas, uma malha ferroviária insuficiente, a concentração do transporte marítimo no litoral e a ausência de uma rede de gasodutos que cubra todo o país. O desenvolvimento de uma infraestrutura integrada e moderna é essencial para viabilizar o transporte de hidrogênio em larga escala no território brasileiro. Sem esses investimentos, a distribuição do hidrogênio continuará limitada, dificultando sua adoção como alternativa energética sustentável no Brasil.

Futuras pesquisas podem explorar soluções práticas para superar essas barreiras, como o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o transporte de hidrogênio ou a criação de polos regionais que minimizem a necessidade de transporte de longas distâncias.

5. REFERÊNCIAS

- [1] PIVA, R. B. Economia ambiental sustentável: Os combustíveis fósseis e as alternativas energéticas. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [2] LARA, D. M. de; Richter, M.F. Hidrogênio verde: A fonte de energia do futuro. Novos cadernos – NAEA, jan.-abr. 2023, v.26, n.1, ISSN 1516-6481/2179-7536.
- [3] XAVIER, C. L. B. Produção de hidrogênio verde a partir da energia solar no Brasil. Monografia, Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.
- [4] ESTÊVÃO, T. E. R. O hidrogênio como combustível. Dissertação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2008.
- [5] NORONHA, M. E. S. de; et. Al. Hidrogênio e energia eólica: Uma revisão sistemática. Congresso de Administração, Sociedade e Inovação – CASI, mai. 2021, 1-18, ISSN 2318-6984.
- [6] Albatayneh, A.; Juaidi, A.; Jaradat, M.; Manzano-Agugliaro, F. Future of Electric and Hydrogen Cars and Trucks: An Overview. *Energies* 2023, 16, 3230. <https://doi.org/10.3390/en16073230>.
- [7] GARDESTEN, S.; MODIN, J. Transportation of hydrogen: A comprehensive analysis of the cost of different methods of transportation of hydrogen. Degree project in Technology, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2023.
- [8] Hydrogen transportation. Em *The ANZ Hydrogen Handbook*, v. 2, p. 49–56, Australia, 2024. Disponível em: <https://www.anz.com/content/dam/anzcom/pdf/institutional/reports/hydrogen-handbook-vol-2.pdf>. Acesso em: 9 set. 2024.