



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



MAPEAMENTO DOS PARÂMETROS QUE REPRESENTAM AS CARACTERÍSTICAS DO TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO VERDE NO ESTADO DA BAHIA

VITÓRIO DONATO – vitorio.donato2@gmail.com
CENTRO UNIVERSITARIO SENAI CIMATEC - SALVADOR-BA

MAÍRA SILVA ANDRADE - maira.andrade@fieb.org.br
CENTRO UNIVERSITARIO SENAI CIMATEC - SALVADOR-BA

DOUGLAS GOMES DE MAGALHÃES - douglas.magalhaes@fieb.org.br
CENTRO UNIVERSITARIO SENAI CIMATEC – SALVADOR-BA

PEDRO VEIGA SANTOS - pedro.veiga@fieb.org.br
CENTRO UNIVERSITARIO SENAI CIMATEC - SALVADOR-BA

ÁREA: 2. LOGÍSTICA

SUBÁREA: 2.5 – TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO FÍSICA

RESUMO: O BRASIL APRESENTA VANTAGENS COMPETITIVAS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE (H₂V) DEVIDO AO ELEVADO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL E À DISPONIBILIDADE DE ÁGUA. NO ENTANTO, AINDA EXISTEM QUESTÕES A SEREM ESTUDADAS E DISCUTIDAS, ESPECIALMENTE NO QUE SE REFERE AO TRANSPORTE DO H₂V. É POSSÍVEL TRANSPORTAR O HIDROGÊNIO DA SEGUINTE MANEIRA: EM FORMA GASOSA COMPRIMIDA A 350 OU 700 BAR (70 MPa); NA FORMA DE MISTURA COM GÁS NATURAL; NA FORMA LIQUEFEITA (LH₂) POR MEIO DE REDUÇÃO DE TEMPERATURA A -253 °C; E, FINALMENTE, NA FORMA DE TRANSPORTADORES QUÍMICOS, QUE NECESSITAM DE ENERGIA PARA SEPARAÇÃO DO HIDROGÊNIO (H₂), SENDO OS PRINCIPAIS AGENTE TRANSPORTADORES A AMÔNIA (NH₃), OS LIQUID ORGANIC HYDROGEN CARRIER (LOHC) E O METANOL. NESSE CONTEXTO, ESSE TRABALHO TEVE COMO OBJETIVO REALIZAR O MAPEAMENTO DOS PARÂMETROS QUE REPRESENTAM AS CARACTERÍSTICAS DO TRANSPORTE DO H₂V NO ESTADO DA BAHIA. PARA O ARTIGO FORAM REALIZADAS PESQUISAS DOCUMENTAIS EM FONTES PÚBLICAS E ESTUDOS DE CASO.

Palavras-chaves: TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO; HIDROGÊNIO VERDE; CARACTERÍSTICA DO TRANSPORTE DO H₂V.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a produção de hidrogênio (H₂) mundial é majoritariamente de origem fóssil com concentração da produção em plantas estacionárias. Por isso, apenas 5% do volume de hidrogênio produzido é de fato mundialmente comercializado, fazendo com que o transporte do H₂ de longa distância ainda seja pouco expressivo e desafiador.

O Brasil apresenta vantagens competitivas para produção do hidrogênio verde (H₂V) em razão do elevado potencial de produção de energia renovável como a hidrelétrica, eólica e a solar, e pela competitividade da energia gerada por essas fontes, em comparação com outros países (BEZERRA, 2021). No entanto, ainda há questões a serem estudadas e discutidas, principalmente no que se refere ao transporte do H₂V.

É possível transportar o hidrogênio em sua forma gasosa comprimida a 350 ou 700 bar (70 MPa) ou na forma de *blending*. Cada método de transporte consiste em uma série de operações e processos diferentes como forma de armazenamento, infraestrutura existente para o transporte (na forma de gás ou líquido), de mercado (demanda e disponibilidade), e distância de onde o H₂ é produzido ao local de consumo.

A seguir, na seção 2 serão discutidos o H₂ e a cadeia de suprimentos, na seção 3 são abordados os sistemas de transporte e o transporte de produtos perigosos, na seção 4, apresenta-se as características do transporte rodoviário do hidrogênio verde, na seção 5, são mapeados os parâmetros do transporte rodoviário do hidrogênio verde e, por fim, na seção 6, é apresentada a aplicação dos parâmetros no sistema de transporte da Bahia.

2. HIDROGÊNIO

O hidrogênio é um elemento químico com número atômico 1, representado pelo símbolo H. Com uma massa atômica de aproximadamente 1,0 u, o hidrogênio é o elemento menos denso. Ele geralmente apresenta-se em sua forma molecular, formando o gás diatômico (H₂) nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). O H₂ é um gás inflamável, incolor, inodoro e insolúvel em água (AZEVEDO, s.d.).

Quanto a questão ambiental, o que mais diferencia o H₂ é o volume de emissões no processo produtivo e o modelo de cadeia logística. Os principais tipos de hidrogênio são apresentados no Quadro 1, bem como sua cadeia de suprimentos e fonte de emissão.

QUADRO 1 – Principais fontes de emissões X tipo de H₂.

TIPO DE H ₂	H ₂ Cinza	H ₂ Azul	H ₂ Musgo	H ₂ Verde
Matéria Prima	Gás natural	Gás natural	Biomassa	Água
Processo de produção	Decomposição do gás natural em H ₂ e CO ₂	Semelhante ao cinza, mas com sequestro e/ou armazenamento do CO ₂	Reforma catalítica, gaseificação ou digestão anaeróbica, com/sem captura de CO ₂	Decomposição da água em H ₂ e O ₂ em um catalisador utilizando energias renováveis
Emissões de CO ₂	~10	~1-3 (+ o CO ₂ armazenado)	n.d.	~0
Fonte prioritária de energia	Gerada a partir da queima de gás natural	Gerada a partir da queima de gás natural	Gerada a partir da queima de biomassa	Gerada a partir de fontes eólica e/ou fotovoltaica
Cadeia de Suprimento	Convencional (apresenta emissões de CO ₂)	Convencional (apresenta emissões de CO ₂)	Convencional (apresenta emissões de CO ₂)	Verde (zero emissões de CO ₂)

Fonte: De autoria própria, 2024.

Para cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris, será necessário que os países cortem em 60% as emissões de dióxido de carbono até 2050, e o hidrogênio verde surge como opção para descarbonização de alguns setores, como a siderurgia, refinarias e a produção de fertilizantes. Como o Brasil possui uma matriz energética composta por 85% de energia de origem renovável, principalmente hidrelétrica, mas com presença crescente de energia eólica, solar e de biomassa, a produção de hidrogênio verde nacional poderia se beneficiar da integração da rede elétrica existente, afinal, 70% do custo de produção do hidrogênio é o custo de energia.

2.1 O Hidrogênio Verde (H₂V)

O hidrogênio é considerado verde quando é obtido de fontes renováveis de energia (que emitem pouco ou nenhum CO₂ para a atmosfera utilizando energia gerada por usina eólica, hidrelétricas, de biomassa ou fotovoltaica), ou por meio de um eletrolisador de água, que faz com que a partir de uma certa tensão decomponha a água em hidrogênio e oxigênio (ATLAS H₂V BAHIA, 2023).

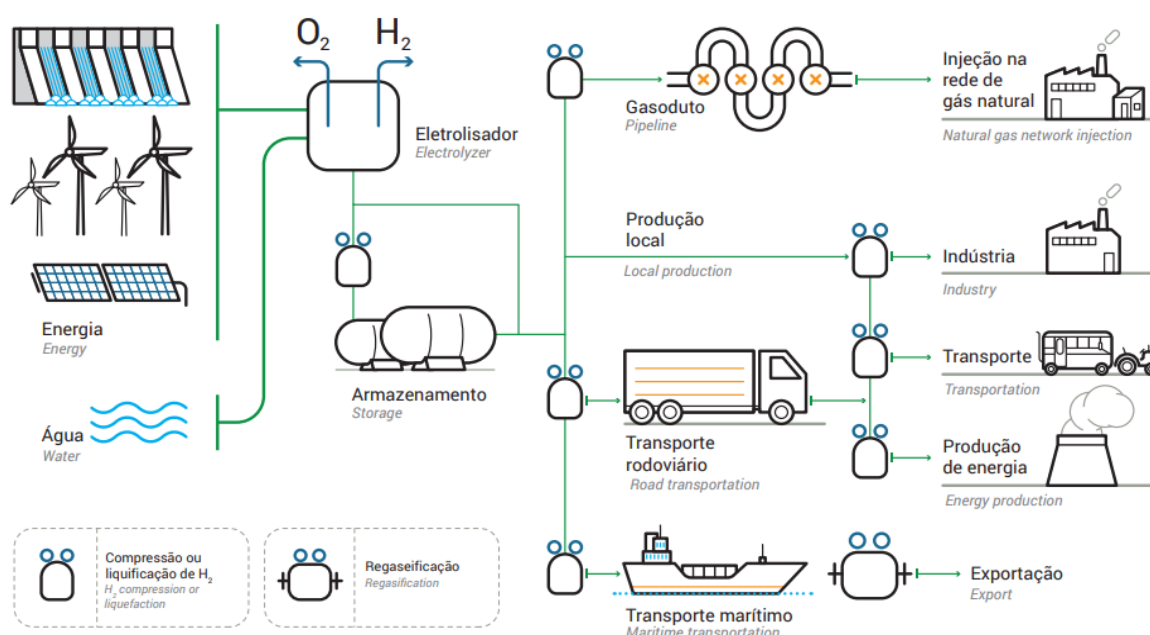
O hidrogênio verde vem sendo considerado a chave para a descarbonização mundial. Com potencial de geração energética três vezes maior que a gasolina, o combustível pode ser utilizado na indústria e no transporte, reduzindo as emissões.

A cadeia de suprimento que pode contribuir com a produção do H₂V é a *Green Logistics Chain* que é, portanto, toda a cadeia logística que atua na produção do H₂V, desde os fornecedores de matéria prima, passando pela produção até a distribuição do produto ao cliente.

2.2 A Cadeia Logística Verde

A logística verde visa garantir a redução dos impactos ambientais gerados em cada fase do processo logístico (DONATO, 2008). A cadeia da logística verde é, portanto, toda a cadeia logística que atua na produção, armazenagem e distribuição, desde os fornecedores de matéria prima, passando pela produção, a armazenagem até a distribuição do produto, conforme ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1 – Cadeia logística do H2V.



Fonte: Atlas do H2V da Bahia, 2023.

A cadeia de suprimento que atua na produção do H2V tem que ser de baixo impacto ambiental, isto é, tem de ser verde. Com a implantação deste modelo se busca minimizar o desperdício, o consumo de recursos naturais e eliminar as emissões de gases do efeito estufa ao longo de toda a cadeia de suprimentos. Isso envolve a seleção cuidadosa de fornecedores, o uso de materiais sustentáveis, a otimização dos processos de produção e eliminação das emissões de CO2 no transporte.

3. O SISTEMA DE TRANSPORTE

O sistema de transportes é uma estrutura organizada que engloba todos os meios e infraestruturas necessárias para o deslocamento de pessoas e mercadorias de um ponto A para um ponto B. Os meios de transporte são formas utilizadas para realizar diferentes

deslocamentos pelo espaço e tempo. Ele é composto por diversos elementos interligados, como veículos, vias de transporte, terminais, sistemas de comunicação e gestão.

Os sistemas de transportes são desenvolvidos em meios físicos e os meios de transporte são compostos de modais de transporte: o terrestre (rodoviário, dutoviário, ferroviário), o aquaviário (hidroviário, lacustre e o marítimo) e o aéreo, totalizando sete modos de transporte (BALLOU, 2011).

3.1 O Sistema de Transporte de Cargas

O crescimento econômico mundial impulsionou o desenvolvimento dos modais de transporte tornando-os mais eficientes. O transporte de cargas é a movimentação de produtos com fins econômicos, sejam matérias-primas ou mercadorias. As cargas podem ser movimentadas por todos os modos de transportes disponíveis. A seguir serão detalhados todos os modos de transportes disponíveis para o transporte de carga (BOWERSOX & CLOSS, 2004):

3.1.1 TRANSPORTE TERRESTRE

É o meio físico de transporte ou movimentação de pessoas, animais ou mercadorias de um local para outro em terra. Os três principais modais de transporte terrestre são detalhados a seguir.

3.1.1.1 Modal Rodoviário

Realizado por meio de rodovias e estradas utilizando como veículo transportador caminhões, carretas etc. Possui alta capilaridade sendo muito versátil e ideal para transportar todos os tipos de mercadoria, porém possui limitações de volume por unidade transportadora. É um dos meios de transporte que necessita de maior investimento em infraestrutura em países de dimensões continentais, como por exemplo o Brasil.

3.1.1.2 Modal Ferroviário

Limitado a alguns tipos de cargas, tem grande capacidade para carregamento de commodities. Como característica principal, possui um trajeto fixo, portanto, as chances de acidentes são menores. Tem um alto custo de implementação e no Brasil possui reduzida malha ferroviária.

3.1.1.3 Modal Dutoviário

Acontece por meio de dutos, sejam aparentes, subterrâneos ou submarinos. É utilizado somente para o transporte de cargas específicas, por exemplo, gases, fluídos e líquidos. Também tem um alto custo de implementação, porém baixo custo de manutenção. Ideal para o transporte de grandes volumes de mercadorias direcionadas para longas distâncias.

3.1.2 TRANSPORTE AQUAVIÁRIO

Realizado por meio dos mares, lagos e rios, com o uso de barcas e navios. Os equipamentos transportadores têm grande capacidade para o transporte de mercadorias. É um meio ideal para o transporte de longas distâncias de commodities. O transporte aquaviário é composto dos seguintes modais de transporte: o marítimo, o hidroviário e o lacustre.

3.1.2.1 Modal Marítimo

O transporte marítimo é realizado por diversos modelos de navios. Para este transporte são utilizados equipamentos onde o casco é desenhado para cortar ondas. Os principais modelos de navios são descritos a seguir.

- Navios petroleiros – Equipamento transportador especializado no transporte de petróleo bruto e derivados, essas embarcações possuem capacidade de mais de 300 mil litros por viagem.
- Navios gaseiros – Equipamento transportador especializado no transporte de produtos gasosos. Neste caso, o navio possui configuração fixa não sendo adequado para transporte de outros produtos.
- Navios graneleiros - Equipamento transportador especializado no transporte de produtos a granel (grãos, minérios etc.). Este equipamento é mais flexível podendo ser utilizado para o transporte de diversos produtos.
- Navios frigoríficos - Equipamento transportador especializado no transporte de carga que necessitam ser mantidos sob refrigeração.
- Navios porta-contêineres - Equipamento transportador especializado no transporte de contêiner. Trata-se de um equipamento com baixa flexibilidade para atender o transporte de outros produtos.
- Navios para cargas vivas - Equipamento transportador especializado no transporte de

animais vivos.

3.1.2.2 Modal Hidroviário

O transporte de interior é o hidroviário. Ele é realizado por diversos modelos de embarcações. Para este transporte são utilizados equipamentos onde o casco é desenhado para águas não profundas. Os principais modelos são descritos a seguir.

- Barçaça – Embarcação larga e de pouco profundidade, destinada a serviços auxiliares de navegação em rios.
- Balsa - A balsa é um barco de grande porte, de serviço regular, que geralmente faz travessias em rios, para transportes de passageiros, veículos ou mercadorias.

3.1.2.3 Modal Lacustre

É realizado pelo transporte em regiões de lagos, ou seja, não apresenta um curso longo, sendo esse transporte geralmente efetivado, em lagos e lagoas dentro do país. No Brasil este modal não é representativo.

3.1.3 TRANSPORTE AÉREO

Tem a rapidez do processo como grande diferencial; costuma ser utilizado especialmente para cargas de alto valor agregado, porém apresenta restrições relacionadas ao peso, periculosidade e volume das mercadorias.

Este modal de transporte não é adequado para o transporte comercial de produtos inflamáveis.

3.2 O Transporte de Produtos Perigosos

Dentro da área de transporte de cargas, estas são classificadas em: carga geral; carga a granel; carga neo-granel; carga frigorífica; carga viva; carga containerizada; carga perigosa; cargas indivisíveis e excepcionais de grande porte. O produto perigoso é qualquer produto que de acordo com um determinado sistema de classificação tenha potencial de causar dano ou apresentar risco a saúde e ao meio ambiente. Ou seja, é aquele que em si representa risco químico, físico e/ou biológico. É um produto que pode prejudicar pessoas, animais, plantas, recursos naturais e/ou patrimônio/instalações (ANTT, 2022).

O transporte de carga é classificado como perigoso quando a carga transportada coloca

em risco a segurança das pessoas ou pode causar danos ambientais. Alguns exemplos disso são produtos químicos ou inflamáveis, pesticidas e combustíveis. O transporte de produtos perigosos deve seguir as exigências estabelecidas para a classe ou subclasse à qual pertence, avaliando os riscos e critérios de classificação. As unidades transportadoras têm que atender a legislação internacional. A sinalização dos veículos que transportam produtos perigosos é feita por meio de painel de segurança e rótulo de risco.

Os produtos perigosos são classificados pela Organização das Nações Unidas (ONU) em nove classes de riscos, sendo estas: classe 1 - explosivos; classe 2 - gases; classe 3 - líquidos inflamáveis; classe 4 - sólidos inflamáveis; classe 5 - substâncias oxidantes e peróxidos orgânicos; classe 6 - substâncias tóxicas e infectantes; classe 7 - material radioativo; classe 8 - substâncias corrosivas; e classe 9 - substâncias e artigos perigosos diversos (ANTT, 2022).

O hidrogênio comprimido é classificado, segundo a ONU, como gás inflamável, na classe 2, subclasse 2.1, com o número da ONU 1049. Apresenta reação química com água, em temperatura ambiente, causando vigorosa vaporização do hidrogênio.

4. PARÂMETROS DO TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO VERDE

O transporte possui diversos parâmetros que influenciam na sua eficiência, no seu custo, e no impacto ambiental. Para realizar o transporte do hidrogênio verde estes parâmetros devem ser atendidos.

É necessário definir parâmetros assertivos para que o transporte do hidrogênio verde seja eficaz com seus custos minimizados. Ao ser desenvolvida uma rota tecnológica, precisam ser considerados estes parâmetros, dentre os quais se destacam: o Hinterland, o Vorland, o Umland, o Foreland, o Hafen Stadt e o Gotland (MARINHO; DONATO; VIEIRA; ANDRADE, 2022).

1. O Hinterland diz respeito ao potencial de geração do produto e de consumo da região. Podemos analisar a Hinterlândia de um produto analisando a abrangência terrestre. A disponibilidade de boas estradas, por exemplo, é fundamental para o desenvolvimento do Hinterland quando se considera o modal rodoviário.
2. O Vorland está relacionado à área de abrangência, ou seja, a distância entre ele e as principais rotas de escoamento. Quanto melhor o Vorland menores os custos de transporte. Considerando que as principais rotas comerciais estão próximas ao litoral, pode-se supor que a região costeira do Brasil possui Vorland superior as demais regiões nacionais.

3. O Umland faz referência ao ambiente físico. Este aspecto considera a infraestrutura disponível (rodovias duplicadas, pátios, cais acostável, berços de atracação, calado etc.), a superestrutura (equipamentos de carregamento/descarregamento, terminais, tancagem etc.), os custos da operação (tarifas e despesas portuárias) e a qualidade dos serviços prestados.
4. O Hafen Stadt trata-se da proximidade do ponto de produção a um ponto consumidor. Neste caso é considerada a distância linear.
5. Vorschriften trata-se da etapa legal do transporte como leis, regulamentações etc.

Com o objetivo de mapear a intensidade de cada parâmetro deste para o transporte do H2V, foi definida uma escala de intensidade, sendo:

- Limitado: Quando o parâmetro atende muito pouco.
- Médio: Quando o parâmetro atende parcialmente.
- Forte: Quando o parâmetro atende de forma plena.

Para um transporte ser considerado verde é necessário que pelo menos 4 dos parâmetros tenham sua intensidade forte. Além disso, devem ser analisados os fatores que vão influenciar diretamente na operação, bem como para onde o hidrogênio será transportado.

5. APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS NO SISTEMA DE TRANSPORTE DA BAHIA

A infraestrutura do transporte da Bahia é composta por uma rede de vias que se conecta a todo o país e ao mundo, o que permite e facilita a compra e distribuição de produtos em todo o Brasil, Mercosul, América Latina, Ásia, África e Oriente Médio. O Estado possui a 2º maior malha rodoviária do Brasil; o 3º sistema de aeroportos regionais; três portos: Salvador, Aratu e Ilhéus, e cinco terminais marítimos privados. A sua infraestrutura é preparada a partir de uma logística forte e consolidada, formada por uma vasta malha rodoviária, ferroviária, metroviária e aeroportuária (INVESTE BAHIA, s.d.).

O Estado da Bahia, a partir da elaboração do seu Atlas do H2V, vem buscando atrair investimentos para esta área, com intuito de descarbonizar a matriz energética, produtiva e de transporte, aproveitando o potencial de geração total de energia elétrica de fontes renováveis que o Estado possui. Deste modo, é importante analisar os parâmetros do transporte para o Estado, buscando identificar quais dos modais possuem maior viabilidade para o transporte do H2V.

O Quadro 2 apresenta a aplicação do mapeamento, onde é feita uma comparação dos diferentes modais e identifica-se quais deles possuem maior viabilidade para o transporte do hidrogênio verde no estado.

QUADRO 2 – Mapeamento dos parâmetros do transporte do H2V na Bahia.

Modal Parâmetros	Rodoviário	Ferrovário	Dutoviário	Marítimo
Hinterland	Forte	Limitado	Médio	Forte
Vorland	Forte	Limitado	Médio	Forte
Umland	Forte	Limitado	Forte	Forte
Hafen Stadt	Forte	Limitado	Forte	Forte
Vorschriften	Médio	Médio	Médio	Médio

Fonte: De autoria própria, 2024.

Conforme mapeado, nota-se que na escala de intensidade, o modal rodoviário e marítimo são os mais viáveis atualmente. Para o caso do rodoviário, em específico, que é tema do estudo do artigo, isso se dá devido a infraestrutura rodoviária que o Estado possui.

O sistema rodoviário da Bahia tem uma extensão de 124.545 km entre rodovias federais, estaduais e municipais e é estruturado sobre quatro eixos principais, que permitem a integração total do estado com todas as regiões do Brasil e com o Mercosul, são elas BR-116, BR-101, BR-324, BR-407 e BR-242 (Investe Bahia, s.d.).

A rede rodoviária estadual é caracterizada do seguinte modo (Secretaria de Infraestrutura da Bahia, 2020):

- Radiais: as rodovias que partem do entorno de Salvador (capital) para qualquer direção;
- Longitudinais: as que têm predominantemente a direção Norte-Sul;
- Transversais: as que têm predominantemente a direção Leste-Oeste;
- Ligações: as que não se enquadram nas definições anteriores, e ligam rodovias estaduais ou federais entre si;
- Ramais: são aquelas que ligam rodovias estaduais, ou federais, às sedes municipais, ou povoadas, como também às regiões produtoras, industriais ou de interesse turístico.

Para o transporte do H2V pelo modal rodoviário, é necessário entender as características deste, de acordo com cada forma de transporte disponível, seja no estado líquido, gasoso ou sólido.

6. CARACTERÍSTICAS DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO HIDROGÊNIO

Transportar hidrogênio por meio do transporte rodoviário é tecnicamente desafiador, não somente pelo fato de ser potencialmente explosivo em contato com o oxigênio, mas também pelo fato de precisar ser comprimido, refrigerado ou fazer uso de algum hidreto sólido para o seu transporte.

Para o transporte do hidrogênio comprimido, o equipamento que regula e mede a pressão do gás garante que nem pressão negativa nem positiva ocorra durante o transporte. Se o hidrogênio for transportado em um tanque de gás, a proteção contraexplosão deve ser assegurada.

Para o hidrogênio líquido, o transporte caracteriza-se por alguns aspectos, sendo um deles a necessidade de tanques criogênicos para armazenar o H₂ a -253°. Já para o transporte do hidrogênio sólido, uma das características é que ele tende a ter um manuseio mais simples, em comparação ao líquido e comprimido. A Figura 2, mostra um resumo das características do transporte de hidrogênio pelo modal rodoviário, associando com o meio de armazenamento para fazer o transporte.

FIGURA 2: Características dos métodos de transporte do H₂ no modal rodoviário.

Características Método de armazenagem	Infraestrutura	Veículos	Operação	Segurança
Comprimido	Necessidade de cilindros ou tubos de alta pressão (geralmente entre 200 a 700 bar); e estação de carregamento de H ₂ em cilindros, com equipamentos que possam manejar em alta pressão	Caminhões de tubo (tube trailers) equipados com cilindros de alta pressão ou conjunto de cilindros	Procedimento rigoroso para carregamento e descarregamento com o objetivo de prevenir vazamentos, bem como o uso de sistemas de monitoramento contínuo para garantir que a pressão dos cilindros permaneça dentro dos limites seguros	Conformidade com as normas vigentes para transporte de materiais perigosos e treinamento para motoristas e operadores sobre procedimentos de segurança para manuseio dos cilindros
Líquido	Necessidade de tanques criogênicos utilizando temperaturas baixas (-253°) e com isolamento que mantenha a temperatura e minimize evaporação. Além disso, pontos de reabastecimento, que deve incluir instalações de manuseio criogênico	Caminhões equipados com tanques criogênicos para transportar hidrogênio líquido	Procedimentos rigorosos para carregamento e descarregamento do hidrogênio líquido, incluindo prevenção de fugas e a minimização de riscos de incêndio e explosão. Além disso, um sistema de monitoramento contínuo da temperatura e pressão durante o transporte	Conformidade com as normas vigentes para transporte de materiais perigosos e treinamento para motoristas e operadores sobre procedimentos de segurança para lidar com hidrogênio líquido
Sólido	O hidrogênio sólido é armazenado em materiais que absorvem e liberam o hidrogênio, como hidretos metálicos. A infraestrutura necessária para carregar e descarregar necessita de instalações para adsorção e dessorção	Caminhões adaptados e com capacidade de carga para transportar os materiais contendo hidrogênio sólido	Os procedimentos operacionais são mais simples e seguros para carregar e descarregar o hidrogênio sólido, em comparação com os outros. Algumas formas de hidrogênio sólido necessitam de controle de temperatura	O H ₂ na forma sólida tende a ser mais estável e menos suscetível a vazamentos ou explosões, em comparação aos outros. As normas são menos rigorosas para este tipo de transporte, porém é necessário seguir as regulações vigentes e treinar os motoristas e operadores

Fonte: De autoria própria, 2024.

Cada tipo de método de transporte tem suas particularidades, o que demonstra o quão complexo é o transporte do hidrogênio e a necessidade de se fazer uma avaliação criteriosa para escolher a adoção do método menos custoso para as empresas. Diante disso, é necessário o uso dos parâmetros para nortear a tomada de decisão, em especial para o hidrogênio verde, que necessita ter uma pegada de carbono zero.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração de energia limpa para setores difíceis de descarbonizar é o caminho da transição energética. O hidrogênio verde está entre as grandes apostas, mas ainda há dúvidas sobre como será o transporte e a distribuição, dadas sua alta volatilidade, inflamabilidade e efeitos sobre os materiais dos recipientes contentores, isto levando em conta a localização dos projetos, já que muitos dos investimentos estão a um oceano de distância dos grandes centros consumidores.

O hidrogênio pode ser transportado na sua forma líquida, gasosa ou sólida e por diferentes modais, sendo eles o rodoviário, ferroviário, dutoviário e o marítimo. Para cada um deste, é necessário ter parâmetros definidos que auxiliem na tomada de decisão, com o objetivo de determinar qual o modal mais viável em termos gerais para o transporte do H₂V, minimizando ou zerando a pegada de carbono.

Devido à sua baixa densidade de energia, o hidrogênio, não é o ideal para transporte na sua forma pura. E, portanto, geralmente é transportado sob a forma de um derivado, ou seja, em combinação com outras substâncias. A Agência Internacional de Energias Renováveis aponta que o transporte de hidrogênio via navios, na forma de hidreto químico (amônia), formando corredores marítimos de combustível limpo, será a forma mais competitiva de fazer o novo energético atravessar longas distâncias.

Para o caso da Bahia, objeto de estudo do artigo, foram definidos como parâmetros o Hinterland, o Vorland, o Umland, o Hafen Stadt e o Vorschriften, e conforme analisado no Quadro 2, foi identificado que os modais rodoviários e marítimo são os mais viáveis para o estudo, em especial o rodoviário, dada a infraestrutura rodoviária existente.

São necessários estudos mais aprofundados que englobem o tipo de estratégia e o estado da molécula do H₂ (líquido, gasoso ou sólido) para que se possa ter conclusões mais assertivas a respeito da viabilidade em termos técnicos e de custo.

REFERÊNCIAS

ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Resolução 5998/2022**. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=0005998&sgl_tipo=RES&sgl_orgao=DG/ANTT/MI&vlr_ano=2022&seq_ato=000&cod_modulo=161&cod_menu=5408. Acesso em: 27/05/2024.

ATLAS H2V BAHIA. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI CIMATEC. Secretaria de Estado do Meio Ambiente da Bahia, Salvador, 2023.

AZEVEDO, J. **O que é hidrogênio e quais suas características?**. Ecycle. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/hidrogenio/>>. Acesso em: 25 de junho de 2024.

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial: Transportes, administração de materiais e distribuição física**. São Paulo: Atlas, 2011.

BEZERRA, F. D. **Hidrogênio Verde: Nasce um gigante no setor de energia**. Caderno Setorial ETENE (Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste. Ano 6, nº 212, 2021.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento**. 1º edição. Editora Atlas, São Paulo, 2004.

DONATO, V. **Logística Verde: uma abordagem socioambiental**. Rio de Janeiro. Ed. Ciência Moderna. 2008.

INVESTE BAHIA. **Investimentos em infraestrutura têm sido prioridade na Bahia**. Disponível em: < <http://www.investebahia.com/sobre-a-bahia/infraestrutura/>>. Acesso em: 26 de junho de 2024.

MARINHO, C. B.; DONATO, V. ; VIEIRA, C. S. ; ANDRADE, M. S. . **Analysis of the port environment for the export of green hydrogen**. In: ENCIT - 19th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2022, Bento Gonçalves. 19th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2022.

SLACK, N.; CHAMBER, S.; HARDLAND, C.; HARRISON, A. e JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 1999.