


## O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA DESCARBONIZAÇÃO DOS PORTOS NO BRASIL

 <https://doi.org/10.56238/arev6n3-386>

Data de submissão: 29/10/2024

Data de publicação: 29/11/2024

**Felipe Azevedo Rios Silva**

PhD em Química

Universidade de Brasília

E-mail: [felipearsilva@gmail.com](mailto:felipearsilva@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7791-4933>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1698702244134690>

**Yaeko Yamashita**

PhD em Engenharia de Transportes

Universidade de Brasília

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3402-695X>

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/8819896625349855>

**Luis Claudio Rios Santos**

Especialista em Modernização, Infraestrutura e Gestão Portuária

Universidade de Brasília

E-mail: [rioslcs@gmail.com](mailto:rioslcs@gmail.com)

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/6605221250220623>

### RESUMO

O presente artigo analisa o papel do hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) na descarbonização dos portos brasileiros, com foco em iniciativas como os projetos dos portos de Pecém e Suape. Destaca o hidrogênio verde como um combustível alternativo produzido por eletrólise de água com energia renovável, alinhando-se às metas climáticas da Organização Marítima Internacional (IMO). A pesquisa avalia benefícios, como redução de emissões, geração de empregos e fortalecimento da competitividade, bem como desafios relacionados a custos de produção e infraestrutura. O estudo também apresenta exemplos globais, como os portos de Rotterdam e Yokohama, que integram tecnologias sustentáveis nas operações. Conclui que o hidrogênio verde é uma solução viável para a transição energética do Brasil, com potencial para liderar o mercado global de energias limpas.

**Palavras-chave:** Hidrogênio Verde. Descarbonização. Portos Brasileiros. Sustentabilidade.

## 1 INTRODUÇÃO

A intensificação da busca por alternativas energéticas limpas e renováveis nas últimas décadas está diretamente ligada à crescente conscientização sobre os impactos negativos das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e à necessidade urgente de descarbonização de setores essenciais da economia global. O setor marítimo, tradicionalmente dependente de combustíveis fósseis, tem se destacado como um dos principais alvos dessas iniciativas, devido às suas emissões substanciais e constantes. Segundo dados da Organização Marítima Internacional (IMO), o transporte marítimo contribui com cerca de 2,89% das emissões globais de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), tornando sua descarbonização uma prioridade estratégica no cenário internacional (IMO, 2020).

Em resposta a essa necessidade, em 2023, a IMO revisou sua Estratégia de Gases de Efeito Estufa, estabelecendo metas ambiciosas, como a redução de 40% nas emissões de CO<sub>2</sub> até 2030 e 70% até 2050, com o objetivo de alcançar emissões líquidas zero até meados do século XXI. Essa estratégia inclui a adoção de combustíveis alternativos, como o hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) e outros de baixa emissão de carbono e impõe pressões adicionais sobre os países membros para adaptarem suas políticas e regulamentos a essas metas globais (IMO, 2023).

Dentro desse contexto, os portos, fundamentais para o comércio e a logística mundial, emergem como pontos focais para a implementação de soluções energéticas sustentáveis. O hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), produzido a partir de fontes renováveis por meio da eletrólise da água, surge como uma alternativa promissora para a descarbonização das operações portuárias, contribuindo para a transição energética no setor. No Brasil, a estratégia de alinhamento com as metas da IMO é visível em iniciativas como o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), que incentiva a utilização do H<sub>2</sub>V no setor marítimo. Destacam-se, ainda, os portos de Pecém e Suape, que lideram projetos-piloto voltados para a produção e uso do H<sub>2</sub>V, reforçando o compromisso do país com a redução das emissões no transporte marítimo e nas atividades portuárias.

O presente artigo tem como objetivo discutir a importância da descarbonização do setor marítimo, destacando a necessidade de alternativas energéticas limpas e renováveis em resposta às preocupações com as emissões de gases de efeito estufa. Enfatiza ainda a contribuição significativa do transporte marítimo para as emissões globais de CO<sub>2</sub> e a urgência de implementar estratégias para reduzir essas emissões, conforme as metas estabelecidas pela Organização Marítima Internacional (IMO).

Dessa forma, seguindo da introdução tem-se na seção dois uma breve revisão sobre portos marítimos com os principais equipamentos necessários para a sua operação. A descarbonização é apresentada na seção 4 e na seção 5 a produção da energia bem como seus desafios e oportunidades

são abordados. O entendimento sobre o hidrogênio verde é apresentado na seção 6, para na seção 7 a sua relação com o porto ser discutida. Uma análise comparativa de custo e impacto ambiental é apresentada para um equipamento, no sentido de comprovar o impacto da descarbonização contribuindo para redução de emissões, como também hidrogênio verde como fonte de energia limpa. O estudo finaliza com uma breve conclusão sobre a importância da descarbonização na busca de um mundo mais sustentável.

## 2 METODOLOGIA

Este estudo utilizou uma abordagem qualitativa e exploratória, com foco na análise de iniciativas, políticas e tecnologias relacionadas à integração do hidrogênio verde nas operações portuárias brasileiras. A metodologia baseou-se em uma revisão bibliográfica e análise documental, abrangendo relatórios técnicos, artigos acadêmicos e estudos de caso relevantes para o tema.

Os dados foram coletados a partir de fontes secundárias, incluindo relatórios da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que destacam o potencial do Brasil para a produção e uso do hidrogênio verde em operações portuárias. Além disso, artigos acadêmicos como os de Carlson e Trencher (2024) e Chen et al. (2024) foram utilizados para embasar a análise das tecnologias de eletrificação e combustíveis alternativos no contexto portuário global.

A análise de iniciativas e estudos de caso foi realizada para identificar práticas de descarbonização e uso do hidrogênio verde. O Porto de Pecém foi um dos exemplos principais no Brasil, sendo reconhecido como um hub emergente de hidrogênio verde com projetos de eletrificação e infraestrutura para produção e exportação de H<sub>2</sub>V. Internacionalmente, o Porto de Rotterdam foi considerado uma referência, destacando-se por sua integração de células a combustível e sistemas de Onshore Power Supply (OPS) (EPE, 2022); (PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY, 2022).

Os benefícios ambientais, sociais e econômicos das tecnologias foram avaliados com base em indicadores reportados na literatura, como a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o potencial de geração de empregos. Paralelamente, os desafios técnicos e econômicos, como os altos custos de produção e barreiras regulatórias, foram discutidos à luz de experiências relatadas em outros contextos portuários (CHEN *et al.*, 2024); (HOWARTH *et al.*, 2021).

Para enriquecer a análise, foi apresentado um comparativo de impacto ambiental e de custo com de custo de um caminhão elétrico com movido a diesel. Este comparativo utilizou métricas como redução de emissões e eficiência operacional, alinhadas às diretrizes globais de descarbonização estabelecidas pela Organização Marítima Internacional (IMO) (IMO, 2020).

### 3 ENTENDENDO O PORTO

Os portos marítimos são complexas infraestruturas que desempenham um papel vital no comércio internacional. Eles são definidos como áreas abrigadas que permitem a atracação de embarcações e a movimentação de cargas e passageiros conforme Mamigonian (2017) e CTC Infra (2023).

Um porto marítimo é uma instalação projetada para facilitar o embarque e desembarque de mercadorias e passageiros. Os principais elementos que garantem a sua funcionalidade segundo CTC Infra<sup>(1)</sup> (2023), Intermodal Digital (2023), Sistema Portuário Nacional (2023), CTC Infra<sup>(2)</sup> (2023), PUC-Rio. (2017) incluem:

- **Área de Atracação:** Espaço onde os navios se ancoram para carregar ou descarregar mercadorias. Essa área deve ter profundidade adequada para acomodar diferentes tipos de embarcações.
- **Canais de Navegação:** Caminhos aquáticos que permitem a entrada e saída segura dos navios. A profundidade e largura desses canais são críticas para evitar encalhes e garantir a fluidez do tráfego marítimo.
- **Cais ou Doca:** Estruturas que permitem o acesso dos navios à terra, facilitando o carregamento e descarregamento das cargas. Os cais são equipados com guindastes e outros equipamentos para movimentação de cargas.
- **Áreas de Armazenamento:** Espaços designados para armazenar mercadorias temporariamente antes ou após o transporte. Essas áreas podem incluir armazéns cobertos e pátios ao ar livre.
- **Infraestrutura Terrestre:** Redes rodoviárias e ferroviárias conectam os portos ao interior do país, permitindo o escoamento eficiente das cargas. A integração com outros modais de transporte é vital para a logística moderna.

Os portos também abrigam uma variedade de instalações industriais e serviços que suportam suas operações:

- **Terminais Específicos:** Áreas dentro do porto dedicadas ao manuseio de tipos específicos de carga, como terminais de contêineres, terminais graneleiros (para produtos a granel) e terminais líquidos (para combustíveis e produtos químicos).
- **Serviços Portuários:** Incluem rebocadores, guindastes, estivadores e serviços administrativos que garantem a operação eficiente do porto. Esses serviços são cruciais para otimizar o tempo de atracação dos navios.

- Instalações de Segurança e Controle: Sistemas integrados que garantem a segurança das operações portuárias, incluindo monitoramento ambiental, controle de tráfego marítimo e inspeções sanitárias.

Os navios desempenham um papel central nas operações portuárias. Eles variam em tamanho e tipo, desde pequenos barcos pesqueiros até grandes cargueiros. Os principais tipos incluem:

- Navios Cargueiros: Projetados para transportar mercadorias em grande escala, podem ser especializados em contêineres, granel sólido ou líquido.
- Petroleiros: Embarcações específicas para o transporte de petróleo e derivados.
- Navios Graneleiros: Utilizados para transportar produtos agrícolas ou minerais a granel.
- Navios de Passageiros: Incluem cruzeiros e *ferries* que transportam pessoas entre destinos turísticos ou regiões costeiras.

### 3.1 EQUIPAMENTOS

Os portos utilizam uma variedade de equipamentos para garantir a movimentação eficiente das cargas. Esses equipamentos podem ser classificados em duas categorias principais: movimentação vertical e movimentação horizontal.

#### a. Movimentação Vertical

**Guindastes:** Utilizados para levantar cargas do navio para o cais ou vice-versa. Os guindastes de pórtico são comuns em terminais de contêineres.

**Portêineres:** Máquinas grandes responsáveis pelo carregamento e descarregamento de contêineres em navios. Podem operar com alta eficiência, movimentando até 45 contêineres por hora.

#### b. Movimentação Horizontal

**Empilhadeiras:** Usadas para mover cargas entre diferentes áreas do porto. Existem variações como empilhadeiras elétricas, a gás e *Reach Stackers*, que são especialmente projetadas para manuseio de contêineres.

**Esteiras Transportadoras:** Equipamentos utilizados para transportar materiais entre armazéns e áreas de carga.

**Carregadores Mecânicos:** Equipamentos especializados para carregar materiais sólidos a granel nos navios.

### 3.2 FONTES DE ENERGIA UTILIZADAS

A operação dos equipamentos portuários requer diversas fontes de energia, que podem incluir:

**Combustíveis Fósseis:** Muitos guindastes e empilhadeiras ainda operam com diesel ou gasolina, embora haja uma crescente pressão para reduzir as emissões associadas a esses combustíveis.

**Energia Elétrica:** Equipamentos elétricos, como empilhadeiras elétricas e guindastes elétricos, são cada vez mais comuns devido à sua eficiência energética e menores emissões.

**Energia Renovável:** A instalação de painéis solares e turbinas eólicas nos portos está se tornando uma prática comum para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar o impacto ambiental das operações portuárias.

A eficiência das operações portuárias depende da sincronização entre as atividades dos navios e as operações terrestres. A modernização contínua das infraestruturas portuárias é essencial para atender às crescentes demandas do comércio global, enquanto se busca minimizar os impactos ambientais para aprimorar as operações logísticas e promover práticas sustentáveis no setor. A descarbonização das atividades portuárias deve ser uma prioridade para garantir um futuro mais sustentável no comércio internacional.

## 4 DESCARBONIZAÇÃO

A descarbonização é o processo de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), particularmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Este conceito envolve a transição de sistemas energéticos, econômicos e industriais baseados em combustíveis fósseis para alternativas de baixo carbono ou carbono zero, como energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) (UNFCCC, 2015).

A descarbonização é um dos pilares centrais do Acordo de Paris, que estabeleceu o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, requerendo esforços coordenados de países para reduzir significativamente suas emissões até meados do século (UNFCCC, 2015).

Estratégias gerais de descarbonização variam entre os países, mas têm como eixo comum a redução da dependência de combustíveis fósseis e a promoção de fontes renováveis de energia. Na União Europeia, o Pacto Verde Europeu (*European Green Deal*) busca tornar o continente o primeiro a alcançar neutralidade climática até 2050. A estratégia inclui investimentos em energias renováveis, eletrificação do transporte e reestruturação de indústrias pesadas, como a produção de aço e cimento, para reduzir emissões (EUROPEAN COMMISSION, 2019).

A China, maior emissora de CO<sub>2</sub> em termos absolutos (EUROPEAN COMMISSION, 2024), comprometeu-se a atingir o pico de suas emissões antes de 2030 e alcançar neutralidade de carbono até 2060. Sua estratégia inclui o desenvolvimento massivo de energia solar e eólica, além de investimentos em tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CHINA STATE COUNCIL, 2021). O Japão e a Coreia do Sul também se concentram na transição para o hidrogênio como combustível alternativo e no aumento da eficiência energética de suas indústrias (IEA, 2021).

Nos Estados Unidos, segundo maior emissor global, o *Inflation Reduction Act* de 2022 apresenta diretrizes para grandes investimentos em segurança energética e climática no país. A lei oferece incentivos financeiros significativos para tecnologias de baixo carbono, como veículos elétricos, hidrogênio verde e energia solar. Estima-se que essas medidas possam reduzir as emissões de GEE americanas em até 40% até 2030, em relação aos níveis de 2005 (US GOVERNMENT, 2022).

No Brasil, o compromisso com a descarbonização é fortalecido por sua matriz energética predominantemente renovável. Cerca de 84% da energia elétrica no país é gerada por fontes renováveis, como hidrelétricas, eólicas e solares. O Plano Nacional de Energia 2050 prevê a expansão dessas fontes e a integração de tecnologias de hidrogênio verde, biocombustíveis avançados e sistemas de eletrificação do transporte (MME, 2020).

#### 4.1 DESCARBONIZAÇÃO DE PORTOS

No contexto da descarbonização, os portos desempenham papel estratégico no contexto global, pois ao exigirem operações com consumo intensivo de energia como movimentações de carga, operações de atracação, equipamentos portuários e atividades logísticas, emitem grandes quantidades de GEE (IMO, 2020).

A transição energética nos portos começa com a eletrificação de equipamentos essenciais, como guindastes, empilhadeiras e veículos de movimentação de carga. Esses equipamentos, que tradicionalmente utilizam combustíveis fósseis, estão sendo substituídos por versões elétricas ou movidas a hidrogênio (CARLSON *et al.*, 2024). Fontes de energia renovável podem ser integrados às operações portuárias de modo a alimentar equipamentos e infraestruturas, reduzindo a dependência de eletricidade gerada por combustíveis fósseis.

Portos sustentáveis estão investindo em tecnologias modernas e práticas sustentáveis para reduzir emissões e aumentar a eficiência operacional. A tabela 1 apresenta exemplos detalhados de iniciativas de descarbonização adotadas em portos de diferentes continentes.

Tabela 1: Exemplos de iniciativas de descarbonização em diversos continentes

| Continente | Porto             | Iniciativas  | Referência                      |
|------------|-------------------|--|---------------------------------|
| Ásia       | Porto de Xangai   | Automação, energia renovável                               | (ALAMOUSH <i>et al.</i> , 2023) |
| Europa     | Porto de Roterdã  | Guindastes elétricos, infraestrutura para GNL e hidrogênio | (ALAMOUSH <i>et al.</i> , 2023) |
| Américas   | Porto de Santos   | Estudos para infraestrutura de hidrogênio                  | (WEI <i>et al.</i> , 2023)      |
| Oceania    | Porto de Auckland | Investimentos em energias renováveis                       | (AGARWALA <i>et al.</i> , 2021) |
| África     | Porto de Durban   | Modernização de guindastes e energias limpas               | (ALAMOUSH <i>et al.</i> , 2023) |

Além da transição para energias renováveis, a eficiência operacional desempenha um papel importante. O uso de tecnologias digitais, como *digital twins*, representações virtuais que permitem simular o comportamento de sistemas reais, sistemas de monitoramento em tempo real e inteligência artificial, permite otimizar o fluxo logístico e reduzir desperdícios energéticos (EOM *et al.*, 2023). Estudos indicam que a aplicação dessas tecnologias pode reduzir as emissões portuárias em até 50% (CHEN *et al.*, 2024).

A descarbonização dos portos é parte importante na tentativa de atingir objetivos climáticos globais e garantir a sustentabilidade da cadeia logística marítima. Além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, ela promove benefícios econômicos e sociais, como a atração de novos investimentos, geração de empregos e fortalecimento da competitividade global. Para maximizar esse potencial, é fundamental implementar políticas públicas robustas, estimular parcerias público-privadas e investir em pesquisa e desenvolvimento, transformando os portos em hubs sustentáveis e protagonistas na transição energética global (IMO, 2020).

No transporte marítimo, a descarbonização também é uma medida estratégica para mitigar mudanças climáticas e atender metas globais de sustentabilidade. A Organização Marítima Internacional (IMO) aponta que o setor é responsável por 2,89% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, destacando a necessidade de ações coordenadas para reduzir sua pegada ambiental e cumprir o Acordo de Paris, bem como as metas de sua estratégia de 2023 para a Redução de Emissões de GEE (IMO, 2020).

Entre os objetivos mais recentes da IMO, destaca-se a meta de emissões líquidas zero até meados do século, com redução de 40% na intensidade de carbono até 2030. Outro ponto importante é a ampliação do uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, como hidrogênio verde e amônia, que devem compor pelo menos 10% da energia consumida pelo setor marítimo até o mesmo ano (IMO, 2023). Apesar do grande potencial de redução das emissões, os altos custos de produção e a falta de infraestrutura ainda são desafios significativos para a implementação desses combustíveis, especialmente em países em desenvolvimento (MALLOUPPAS *et al.*, 2021).



Iniciativas como os Princípios Poseidon, que promovem financiamento sustentável para embarcações de baixo carbono, são fundamentais para acelerar a transição energética (IMO, 2020). No Brasil, o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>) tem impulsionado projetos de descarbonização no transporte marítimo. O país, com uma matriz energética renovável robusta que inclui energia hidrelétrica, solar e eólica, possui grande potencial para liderar o uso de hidrogênio verde em operações marítimas (EPE, 2022).

A transição para práticas marítimas mais sustentáveis exige cooperação global, inovação tecnológica e suporte financeiro. Combustíveis alternativos, tecnologias digitais e políticas regulatórias sólidas representam o caminho mais promissor para atingir as metas climáticas e reduzir a pegada de carbono do setor. O Brasil, com seu potencial renovável e iniciativas emergentes, pode desempenhar um papel central nessa transformação global.

## **5 PRODUÇÃO DE ENERGIA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**

A produção de energia é uma questão central para o desenvolvimento sustentável e a mitigação das mudanças climáticas. Com a crescente necessidade de descarbonização, novas fontes de energia, como o hidrogênio verde, estão ganhando destaque. A produção de energia no Brasil e no mundo, com foco nas novas energias, especialmente o hidrogênio, e discute os desafios e oportunidades associados a essas fontes.

O Brasil é um dos líderes mundiais na geração de energia renovável, com uma matriz energética que se destaca pela sua sustentabilidade. Aproximadamente 84% da capacidade instalada do país provém de fontes renováveis, sendo as principais:

- Hidrelétricas: Representam cerca de 68% da geração elétrica, aproveitando a vasta disponibilidade hídrica do país.
- Energia Eólica: Com um crescimento acelerado, a energia eólica já responde por aproximadamente 15% da matriz elétrica.
- Energia Solar: A energia solar tem mostrado um aumento significativo na capacidade instalada, contribuindo com cerca de 7% da geração total.

Além dessas fontes tradicionais, o Brasil está se posicionando para se tornar um líder na produção de hidrogênio verde. O hidrogênio verde é produzido por meio da eletrólise da água utilizando eletricidade gerada por fontes renováveis. Esse processo não emite gases de efeito estufa, tornando-o uma alternativa promissora para a descarbonização em setores difíceis de eletrificar.

Globalmente, a matriz energética ainda é dominada por combustíveis fósseis, que representam cerca de 78% da geração de eletricidade. No entanto, as energias renováveis estão crescendo rapidamente:

Crescimento das Energias Renováveis em 2022, as energias solar e eólica foram responsáveis por atender cerca de 77% do aumento na demanda global por eletricidade. A transição para essas fontes é impulsionada pela necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono.

O hidrogênio verde está emergindo como uma solução viável para a descarbonização em setores como transporte, indústria e aquecimento. Produzido por meio da eletrólise com eletricidade renovável, o hidrogênio verde não gera emissões durante sua produção ou uso.

Desafios também existem segundo Barroso *et al.* (2023), PUCRS. (2023), Ministério de Minas e Energia (2023) e CAF (2024) para serem enfrentados como:

- **Custo da Produção:** A produção de hidrogênio verde ainda é mais cara do que as alternativas baseadas em combustíveis fósseis (hidrogênio cinza e marrom). A necessidade de investimentos significativos em tecnologia e infraestrutura é um desafio importante para sua adoção em larga escala.
- **Tecnologia de Armazenamento:** O armazenamento e transporte do hidrogênio são complexos. Embora o hidrogênio seja uma forma eficiente de armazenar energia, as tecnologias atuais ainda precisam ser aprimoradas para garantir segurança e eficiência.
- **Integração na Matriz Energética:** Integrar o hidrogênio como uma fonte significativa dentro da matriz energética requer uma reconfiguração das infraestruturas existentes e políticas públicas que incentivem sua adoção.
- **Legislação e Políticas Públicas:** A falta de políticas consistentes pode dificultar o avanço das energias renováveis.
- **Aceitação Social:** A resistência local a projetos de energia renovável pode atrasar sua implementação.

Oportunidades por outro surgem na produção do H2Verde conforme Barroso et al (2023), PUCRS. (2023), Ministério de Minas e Energia (2023), CIBiogás. (2023), GNPW Group (2023), Nova Energia. (2023), Ember Climate. (2022) e IEE/USP (2023) como:

- **Criação de Empregos:** O crescimento do setor de energias renováveis está gerando novas oportunidades de emprego em diversas áreas, desde fabricação até instalação e manutenção.

- **Inovação Tecnológica:** O setor é fértil para inovações que podem melhorar a eficiência na geração e armazenamento de energia. Tecnologias emergentes como inteligência artificial podem otimizar processos.
- **Liderança Global:** Países que lideram na transição energética podem estabelecer padrões globais e obter vantagens econômicas significativas ao se posicionarem como líderes em tecnologias limpas.
- **Apoio à Sustentabilidade:** A transição para energias renováveis não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também promove um uso mais sustentável dos recursos naturais.

Verifica-se que a produção de energia está passando por uma transformação significativa tanto no Brasil quanto globalmente. O hidrogênio verde emerge como uma solução promissora para a descarbonização, oferecendo oportunidades econômicas substanciais enquanto enfrenta desafios técnicos e financeiros. A integração eficaz do hidrogênio na matriz energética pode não apenas ajudar na mitigação das mudanças climáticas, mas também posicionar o Brasil como um líder global em energias renováveis.

## **6 ENTENDENDO SOBRE O H<sub>2</sub>VERDE**

Nessa seção abordaremos de forma sintetizada o processo de produção do hidrogênio verde e os seus diferentes derivados.

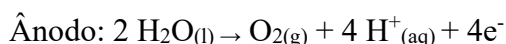
### **6.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO**

O hidrogênio verde é obtido através da eletrólise da água, um procedimento que utiliza eletricidade gerada por fontes renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica, para dividir a água em hidrogênio e oxigênio. Este método é considerado ambientalmente sustentável, pois não libera gases de efeito estufa durante sua produção, ao contrário do hidrogênio cinza e azul, que são gerados a partir de combustíveis fósseis e estão associados a emissões significativas de CO<sub>2</sub> (IRENA, 2020). Projeções indicam que a produção de hidrogênio verde poderá alcançar 16 milhões de toneladas anuais até 2030, caso haja condições favoráveis de investimento e políticas públicas adequadas (IEA, 2021).

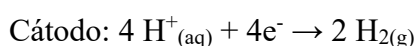
O hidrogênio verde se apresenta como uma alternativa aos outros tipos, pois utiliza energia proveniente de fontes renováveis e realiza a separação das moléculas de água por meio do processo de eletrólise. Essa técnica de produção não gera gases de efeito estufa durante sua execução, tornando-se uma opção viável para a diminuição das emissões de carbono (SEDAI *et al.*, 2023; SCHMIDT *et al.*, 2020).

A eletrólise é um processo eletroquímico que aplica eletricidade para decompor substâncias químicas. No contexto da produção de hidrogênio verde, a eletrólise da água é utilizada, onde a água (H<sub>2</sub>O) é fragmentada em hidrogênio (H<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) pela passagem de corrente elétrica. O processo ocorre em uma célula eletrolítica composta por três componentes principais: dois eletrodos (ânodo e cátodo) e um eletrólito.

As reações químicas são representadas pelas equações:

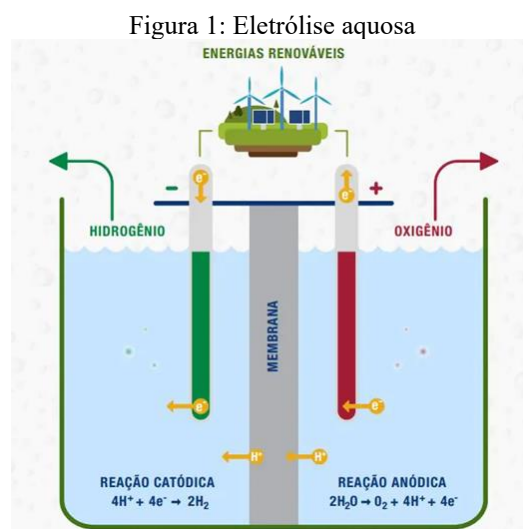


Eq.01



Eq.02

O hidrogênio produzido pode ser armazenado e utilizado como fonte de energia em diversas aplicações. A figura 1 ilustra esse processo.



Fonte: Departamento de energia dos EUA (2022)

O dispositivo utilizado no processo da eletrólise aquosa é o eletrolisador. Ele desempenha o papel de fornecer a plataforma onde as reações eletroquímicas ocorrem para decompor a água em hidrogênio e oxigênio. Sua função é otimizar a eficiência energética do processo, minimizar perdas e garantir a segurança operacional.

Existem três tipos principais de processos de eletrólise utilizados atualmente segundo Albretch *et al.*, 2020; Karayel *et al.* 2022; Jansons *et al.* 2023; Lahnaoui *et al.*, 2021: (i) alcalina, (ii) membrana polimérica e (iii) células de eletrólise de óxido sólido (ainda em fase de implementação).

As unidades de eletrólise são amplamente utilizadas para gerar alta pureza no hidrogênio por quebra de água, sendo que a eletrólise alcalina é uma das técnicas mais antigas para produção de

hidrogênio (KARAYEL *et al.*, 2022) e a eficiência dos processos de eletrólise existentes variam entre 60 e 81% (IEA, 2021).

Para a produção eficaz de hidrogênio verde, é essencial considerar a disponibilidade de fontes de energia renovável, a eficiência dos eletrolisadores, a infraestrutura para armazenamento e transporte, e os custos envolvidos. No Brasil, a abundância de recursos hídricos e a crescente capacidade de geração de energia eólica e solar colocam o país em uma posição vantajosa para se tornar um líder global na produção de hidrogênio verde (ANEEL, 2021). A eletrólise da água requer aproximadamente 50 kWh de eletricidade para produzir 1 kg de hidrogênio, tornando a eficiência energética e o custo da eletricidade fatores críticos (IRENA, 2020).

## 6.2 PRODUTOS DERIVADOS

O hidrogênio verde pode ser utilizado em diversas aplicações industriais e energéticas. Entre os produtos derivados, destacam-se o *Sustainable Aviation Fuel* (SAF), o óleo vegetal hidrotratado (HVO), a amônia, o metanol e o aço verde.

### 6.2.1 saf e hvo

O hidrogênio verde é crucial na produção de combustíveis sustentáveis para aviação (SAF) e diesel verde, também conhecido como óleo vegetal hidrotratado (HVO), ambos essenciais para a descarbonização do setor de transportes. O SAF pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em até 80% em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais (ICAO, 2019). O HVO, por sua vez, é um substituto direto para o diesel fóssil, oferecendo uma redução significativa nas emissões de poluentes (IEA, 2021). O SAF é produzido a partir de biomassa e outros resíduos, enquanto o HVO é produzido por meio da hidrogenação de óleos vegetais e gorduras animais, utilizando hidrogênio verde no processo (IEA, 2021). Estima-se que a demanda global por SAF atinja 100 milhões de toneladas até 2050, impulsionada pelas metas de descarbonização da aviação (ICAO, 2019). A demanda por HVO também deve crescer significativamente, com a Europa liderando o mercado de biocombustíveis avançados (IEA, 2021).

### 6.2.2 amônia

Utilizada amplamente na produção de fertilizantes, a amônia verde, produzida a partir do hidrogênio verde, oferece uma alternativa de baixo carbono em comparação com a amônia convencional, que utiliza gás natural como matéria-prima. A produção global de amônia é responsável por cerca de 1,8% das emissões de CO<sub>2</sub>, o que pode ser drasticamente reduzido com a transição para

a amônia verde (FAO, 2020). No Brasil, a produção de fertilizantes à base de amônia verde pode reduzir a dependência de importações e promover uma agricultura mais sustentável (MME, 2020). Além de fertilizantes, a amônia verde pode ser usada como combustível em motores marítimos, proporcionando uma alternativa limpa para o transporte marítimo (IRENA, 2020).

### **6.2.3 metanol**

O metanol verde pode ser usado como combustível e matéria-prima química, substituindo o metanol tradicional produzido a partir de combustíveis fósseis. A produção de metanol verde pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em até 90% (IRENA, 2021). O metanol é um insumo essencial na produção de produtos químicos como formaldeído, ácido acético e plásticos, além de ser usado como combustível em células a combustível e motores de combustão interna. A demanda global por metanol deve crescer de 100 milhões de toneladas em 2020 para 500 milhões de toneladas em 2050, com a transição para uma economia de baixo carbono (IRENA, 2021).

### **6.2.4 aço verde**

A produção de aço verde utiliza hidrogênio verde em vez de carvão, resultando em uma significativa redução das emissões de CO<sub>2</sub>. A demanda europeia por aço verde apresenta uma oportunidade substancial para o Brasil, que é um grande exportador de aço. A Europa planeja comprar apenas aço verde a partir de 2030, o que pode impulsionar a demanda por hidrogênio verde no Brasil (EUROPEAN COMMISSION, 2020). O aço verde é produzido por meio da redução direta do minério de ferro usando hidrogênio em vez de carvão, resultando em uma redução de até 90% nas emissões de CO<sub>2</sub> comparado aos métodos tradicionais (IEA, 2021).

Os produtos derivados do hidrogênio verde apresentam vantagens significativas em termos de sustentabilidade e redução de emissões de carbono em comparação com suas contrapartes fósseis. Por exemplo, o SAF e o HVO produzidos a partir de hidrogênio verde têm uma pegada de carbono significativamente menor do que os combustíveis fósseis tradicionais (ICAO, 2019). Similarmente, a amônia e o metanol verdes oferecem uma produção mais limpa e sustentável, alinhada com as metas globais de descarbonização (IRENA, 2020). No entanto, a produção de hidrogênio verde ainda enfrenta desafios como o alto custo de produção e a necessidade de infraestrutura adequada, em comparação com os métodos tradicionais mais estabelecidos e baratos (IEA, 2021).

O custo do hidrogênio verde atualmente varia entre US\$ 4 a US\$ 6 por kg, enquanto o hidrogênio cinza custa aproximadamente US\$ 1 a US\$ 2 por kg (IEA, 2021). No entanto, com a

redução dos custos das energias renováveis e avanços tecnológicos, espera-se que o custo do hidrogênio verde caia para cerca de US\$ 2 por kg até 2030 (IRENA, 2020).

### 6.3 CONTEXTO GLOBAL DO HIDROGÊNIO VERDE NA DESCARBONIZAÇÃO

Para aprofundar a análise sobre o papel do hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) na descarbonização dos portos brasileiros, é crucial contextualizar essa tecnologia em um cenário global. O H<sub>2</sub>V tem se estabelecido como uma solução central na descarbonização de setores industriais e de mobilidade em diversas regiões do mundo, especialmente na Europa e na Ásia.

Países como a Itália adotaram a criação de hubs de hidrogênio em seus portos como estratégia crucial para a transição energética. Esses hubs não apenas fornecem hidrogênio para operações portuárias, mas também abastecem indústrias próximas, contribuindo de forma significativa para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Essa experiência pode ser uma referência importante para o Brasil, onde a implementação de hubs de H<sub>2</sub>V pode transformar os portos em centros estratégicos de descarbonização e inovação tecnológica (PIVETTA *et al.*, 2022).

Na Ásia, China, Japão e Coreia do Sul estão na vanguarda do desenvolvimento de hidrogênio. A China, com o "Plano de Desenvolvimento da Indústria de Hidrogênio 2021-2035", está investindo tanto na produção de hidrogênio azul quanto de hidrogênio verde, além de expandir sua infraestrutura de reabastecimento, com o objetivo de se tornar um dos maiores produtores e consumidores de hidrogênio até 2035 (CHINA HYDROGEN ALLIANCE, 2021).

O Japão, com sua "*Basic Hydrogen Strategy*" de 2017, visa tornar-se uma sociedade baseada no hidrogênio até 2050, com foco na importação de H<sub>2</sub>V de regiões com alta disponibilidade de energia renovável, como a Austrália. A Coreia do Sul, por meio do "*Hydrogen Economy Roadmap*", lançado em 2020, traçou metas para figurar entre as cinco maiores economias de hidrogênio até 2040. Ambos os países estão investindo pesadamente em infraestrutura e em políticas públicas para o desenvolvimento do hidrogênio, com ênfase no setor portuário e de mobilidade (SASAKI *et al.*, 2020; CHUNG *et al.*, 2021).

Além de China, Japão e Coreia do Sul, a Índia também se destaca como potencial líder na economia do hidrogênio, com sua "*National Hydrogen Mission*" de 2021, busca consolidar-se como um dos maiores produtores e exportadores de H<sub>2</sub>V, aproveitando seus abundantes recursos solares e eólicos para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e atingir suas metas de descarbonização até 2050 (GOVERNMENT OF INDIA, 2021).

Esses exemplos globais demonstram que políticas públicas robustas, combinadas com investimentos substanciais em infraestrutura, são fundamentais para o sucesso na implementação do

H<sub>2</sub>V. O Brasil, com seu vasto potencial em energias renováveis, como a solar e a eólica, tem a oportunidade de seguir esses exemplos e aplicar estratégias semelhantes. A criação de hubs de H<sub>2</sub>V nos portos brasileiros não apenas contribuiria para a descarbonização das operações portuárias, mas também atrairia investimentos internacionais, consolidando o país como líder global na transição energética.

#### 6.4 IMPACTOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DO H<sub>2</sub>V

Embora o hidrogênio verde se destaque como uma fonte de energia limpa em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE), sua produção não é isenta de impactos ambientais. Um dos principais desafios está relacionado ao uso intensivo de recursos hídricos, uma vez que o processo de eletrólise demanda grandes volumes de água. Esse fator pode representar um obstáculo considerável, sobretudo em regiões com escassez hídrica. Além disso, a produção de H<sub>2</sub>V pode gerar subprodutos que necessitam de gestão adequada para prevenir contaminações ambientais. Para que os benefícios ambientais do hidrogênio verde sejam maximizados e seus impactos negativos minimizados, é fundamental que sejam adotadas práticas sustentáveis e regulamentações ambientais rigorosas (ULLMAN *et al.*, 2022).

Em comparação com outras formas de hidrogênio, como o hidrogênio cinza e o azul, o hidrogênio verde apresenta uma vantagem significativa devido às suas baixíssimas emissões de GEE. O hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis, emite entre 9 e 12 kg de CO<sub>2</sub> por kg de hidrogênio gerado, o que contribui diretamente para o aumento das emissões globais (EPE, 2022). Já o hidrogênio azul, que utiliza tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS), pode reduzir essas emissões para aproximadamente 2 a 3 kg de CO<sub>2</sub> por kg de hidrogênio, dependendo da eficiência do processo de captura. No entanto, o hidrogênio azul enfrenta obstáculos significativos, como a eficiência variável do CCS e os riscos de vazamento de CO<sub>2</sub> durante o armazenamento, o que pode comprometer os ganhos ambientais dessa tecnologia (HOWARTH *et al.*, 2021).

Por outro lado, o hidrogênio verde é produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar e eólica, por meio da eletrólise da água, o que resulta em emissões de CO<sub>2</sub> praticamente nulas. No entanto, o consumo elevado de água continua sendo uma preocupação ambiental significativa: estima-se que cerca de 9 litros de água são necessários para produzir 1 kg de hidrogênio por eletrólise (SENAI, 2023). Para mitigar esse impacto, o Brasil tem investido no desenvolvimento de tecnologias de dessalinização e no reaproveitamento de água de reuso, especialmente em regiões como o Nordeste, que possui abundância de recursos renováveis e proximidade com áreas costeiras, o que favorece a implementação dessas soluções (BRASIL, 2021).



O hidrogênio verde se consolida como a alternativa mais sustentável a longo prazo, especialmente no contexto brasileiro, onde há um vasto potencial de energias renováveis. O Plano Nacional de Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), lançado pelo governo brasileiro, tem como objetivo fomentar o desenvolvimento do H<sub>2</sub>V, aproveitando os abundantes recursos solares e eólicos, com destaque para a região Nordeste. Nessa região, o impacto ambiental da produção de hidrogênio verde pode ser significativamente mitigado por meio da implementação de tecnologias avançadas, como a dessalinização e o reaproveitamento de água (BRASIL, 2021; EPE, 2022). Dessa forma, o hidrogênio verde não apenas contribui para o cumprimento das metas climáticas, mas também se apresenta como uma solução viável e sustentável para o futuro energético do Brasil.

## 6.5 GERAÇÃO DE ENERGIA COM BAIXA EMISSÃO DE CARBONO

Outra aplicação promissora do hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) nos portos brasileiros é a geração de energia por meio de células a combustível. Atualmente, muitos portos dependem da rede elétrica convencional para sustentar suas operações, o que pode apresentar problemas tanto em termos de custo quanto de segurança energética, especialmente em regiões onde a oferta de energia é limitada ou instável. A geração de eletricidade utilizando células a combustível de hidrogênio pode fornecer uma fonte de energia local, limpa e confiável, capaz de alimentar as operações portuárias de maneira contínua e com menor impacto ambiental.

A implementação de sistemas de geração de energia a partir de H<sub>2</sub>V oferece a oportunidade de reduzir a dependência dos portos em relação à rede elétrica tradicional, proporcionando maior resiliência energética. Esse aspecto se torna particularmente relevante em um contexto de crescente demanda por eletricidade e eventuais restrições no fornecimento de energia devido a eventos climáticos extremos ou falhas na infraestrutura elétrica. Além disso, o uso de H<sub>2</sub>V como fonte energética contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à geração de eletricidade, especialmente em regiões cuja matriz energética ainda depende fortemente de fontes fósseis (Serratt et al., 2024).

Experiências internacionais demonstram o sucesso do uso de células a combustível de hidrogênio em operações portuárias. No Porto de Yokohama, no Japão, um projeto-piloto implementou o uso de células a combustível para alimentar guindastes e fornecer eletricidade a parte das instalações portuárias. Desenvolvido em parceria com empresas japonesas de tecnologia, o projeto tem como objetivo reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e aumentar a eficiência energética do porto. Esta iniciativa faz parte da estratégia do Japão de se tornar uma sociedade baseada no hidrogênio até 2050, aplicando essa tecnologia em setores críticos, como o transporte e a logística portuária (METI, 2021).

Outro exemplo importante é o Porto de Rotterdam, nos Países Baixos, que está investindo na integração de células a combustível de hidrogênio em suas operações. O porto tem utilizado hidrogênio para alimentar geradores móveis e empilhadeiras, reduzindo sua dependência de geradores a diesel. O uso de células a combustível no Porto de Rotterdam faz parte de um plano mais amplo para transformá-lo em um hub de hidrogênio verde na Europa, com investimentos significativos em infraestrutura voltada para a produção, armazenamento e distribuição de H<sub>2</sub>V. O objetivo é criar um modelo de porto sustentável que possa ser replicado em outras regiões do mundo (PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY, 2022).

No Brasil, pesquisadores e projetos locais também estão avançando na aplicação dessa tecnologia. Estudos realizados no âmbito do Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis destacam o potencial das células a combustível de hidrogênio para utilização em portos, especialmente no Nordeste, onde há abundância de fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica. Pesquisadores brasileiros vêm analisando a viabilidade da implementação de sistemas de células a combustível no Porto de Pecém, que já se posiciona como um dos principais hubs de hidrogênio verde no país (SENAI, 2023). Esses projetos buscam integrar a produção de hidrogênio com sua utilização direta nas operações portuárias, promovendo a redução de emissões e a independência energética.

Esses exemplos, tanto internacionais quanto nacionais, evidenciam o grande potencial das células a combustível de hidrogênio para transformar operações portuárias em verdadeiros hubs energéticos sustentáveis. No Brasil, a integração de células a combustível no setor portuário, como já está sendo estudado no Porto de Pecém, não apenas reduziria as emissões de GEE, mas também aumentaria a resiliência energética e a competitividade global dos portos brasileiros.

Além do Porto de Pecém, outros portos brasileiros estão iniciando iniciativas voltadas para a descarbonização. O Porto de Suape, em Pernambuco, conta com um projeto em andamento para a instalação de uma planta piloto de produção de hidrogênio verde, utilizando energia solar e eólica. De forma semelhante, o Porto de Santos, o maior da América Latina, também está explorando a implementação de tecnologias de H<sub>2</sub>V para reduzir suas emissões e se posicionar como um hub de energia limpa. A tabela 2 exemplifica algumas iniciativas em andamento para a produção e desenvolvimento de H<sub>2</sub>V no Brasil

Tabela 2 iniciativas em andamento para a produção de H<sub>2</sub>V no Brasil

| Porto          | Localização | Iniciativas em andamento   | Parceiros   |
|----------------|-------------|--|---|
| Porto de Pecém | Ceará       | Hub de Hidrogênio Verde; Produção, armazenamento e exportação de H <sub>2</sub> V                  | Porto de Roterdã, Governo do Ceará, empresas privadas |
| Porto de Suape | Pernambuco  | Estudos de viabilidade para produção e uso de H <sub>2</sub> V; Desenvolvimento de projetos-piloto | Governo de Pernambuco, empresas privadas              |

|               |                  |   |  |
|---------------|------------------|---|--|
| Porto do Açu  | Rio de Janeiro   | Produção de H <sub>2</sub> V a partir de energia eólica offshore; Abastecimento de caminhões e navios | Governo do Rio de Janeiro, empresas privadas |
| Outros portos | Diversas regiões | Estudos de viabilidade; Desenvolvimento de projetos-piloto  | Governos estaduais, empresas privadas        |

Nota: A tabela apresenta algumas das principais iniciativas de hidrogênio verde em portos brasileiros. É importante ressaltar que novos projetos e parcerias estão em constante desenvolvimento, impulsionando a expansão do mercado de H<sub>2</sub>V no Brasil.

## 7 HIDROGÊNIO VERDE E O SETOR PORTUÁRIO BRASILEIRO

O Brasil conta com uma vasta rede portuária, composta por 37 portos públicos e mais de 120 terminais de uso privado, conforme dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ). Esses portos exercem um papel crucial na economia do país, sendo responsáveis por grande parte das exportações e importações nacionais. Nesse contexto, a adoção de tecnologias voltadas para a descarbonização, como o hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), torna-se uma medida essencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas às operações portuárias e ao transporte marítimo.

A introdução do H<sub>2</sub>V nos portos brasileiros é uma estratégia-chave para a descarbonização das atividades portuárias, configurando-se como um passo decisivo na transição energética do Brasil. Esse processo envolve a substituição gradual dos combustíveis fósseis por hidrogênio verde em diversas operações, o que não apenas gera benefícios ambientais expressivos, como também impulsiona a inovação tecnológica e promove um aumento significativo na eficiência operacional.

### 7.1 EQUIPAMENTOS PORTUÁRIOS

Os equipamentos portuários, como empilhadeiras, guindastes, rebocadores e outros veículos utilizados nas operações diárias, são grandes responsáveis pela emissão de poluentes locais, como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e partículas finas (PM). A adaptação ou substituição desses equipamentos por modelos movidos a células a combustível de hidrogênio oferece uma oportunidade significativa para a redução das emissões, além de contribuir para a diminuição do nível de ruído nas áreas portuárias. Estudos indicam que a eletrificação de equipamentos portuários por meio do uso de células a combustível de hidrogênio pode reduzir as emissões de NO<sub>x</sub> em até 80% e virtualmente eliminar as partículas finas, impactando positivamente a qualidade do ar e a saúde pública nas comunidades ao redor dos portos (CHEN *et al.*, 2024).

O uso do H<sub>2</sub>V em equipamentos portuários também proporciona vantagens operacionais importantes, como maior autonomia e tempos de recarga significativamente menores em comparação com baterias elétricas convencionais. Por exemplo, uma empilhadeira movida a hidrogênio pode ser reabastecida em poucos minutos, enquanto uma empilhadeira elétrica a bateria pode levar várias horas

para completar sua carga. Isso resulta em maior eficiência operacional, com redução dos tempos de inatividade dos equipamentos e um aumento na produtividade geral das operações portuárias (CARLSON *et al.*, 2024).

Diversos projetos-pilotos ao redor do mundo já estão explorando o uso de equipamentos movidos a hidrogênio em portos. Um exemplo de destaque é o Porto de Los Angeles, nos Estados Unidos, que está realizando testes com caminhões movidos a células a combustível de hidrogênio. Esse projeto faz parte de uma iniciativa mais ampla de descarbonização do transporte portuário, com a meta ambiciosa de reduzir as emissões de carbono em 100% até 2035. O Porto de Los Angeles colabora com empresas como Toyota e Kenworth para desenvolver e testar esses caminhões movidos a H<sub>2</sub>, que já estão sendo utilizados em operações diárias de transporte de mercadorias dentro e fora do porto (CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD, 2022).

No Brasil, o Porto de Pecém, no Ceará, também está se destacando como um centro de inovação em hidrogênio verde, com foco não apenas na exportação de H<sub>2</sub>V, mas também na utilização de equipamentos portuários movidos a hidrogênio. O projeto inclui o uso de guindastes e outros veículos pesados alimentados por células a combustível, tornando-se um dos primeiros portos da América Latina a adotar essa tecnologia. Este projeto piloto está sendo desenvolvido em colaboração com empresas privadas e instituições de pesquisa, alinhado aos objetivos do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>) (EPE, 2022).

Esses exemplos ilustram que o uso do hidrogênio verde em equipamentos portuários já é uma realidade em expansão, com grande potencial para ser ampliado globalmente. A implementação de H<sub>2</sub>V em portos como o de Los Angeles e o de Pecém não apenas demonstra a viabilidade dessa solução sustentável, mas também evidencia seu potencial para aumentar significativamente a eficiência operacional.

Outra importante iniciativa, fundamental para a descarbonização da operação de navios dentro dos portos, é a aplicação do Sistema OPS (*Onshore Power Supply*), também conhecido como “*cold ironing*” ou “*shore-to-ship power*”, uma tecnologia que permite que os navios atracados desliguem seus motores auxiliares movidos à diesel e se conectem a uma rede elétrica local e utilizem a energia elétrica, o que reduz significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>.

O OPS tem sido atualmente a melhor opção para descarbonização da operação de navios atracados, contribuindo também para uma redução dos níveis de ruído. Sua implantação nos portos brasileiros está próxima de uma realidade tendo em vista que alguns portos estratégicos já consideram essa tecnologia como iniciativas que compõem suas Agendas de ESG.

Na Europa, os portos da Alemanha, Suécia e Noruega encontram-se na vanguarda da aplicação dessa solução no atendimento de grandes navios comerciais e de cruzeiro. A tabela 3 apresenta alguns benefícios e impactos ambientais relacionados à descarbonização equipamentos portuários.

Tabela 3. Impactos ambientais e benefícios relacionados à descarbonização de equipamentos portuários

| Benefício                                  | Impacto ambiental   |
|--|---|
| 1. Redução de emissões de carbono          | A eliminação do uso de motores a diesel reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa e poluentes.                               |
| 2. Melhoria na qualidade do ar             | Com a diminuição de poluentes atmosféricos, a qualidade do ar nas regiões portuárias é consideravelmente melhorada, beneficiando a saúde pública. |
| 3. Conformidade com regulações ambientais: | Países europeus têm adotado regulamentos rígidos que incentivam ou obrigam o uso do OPS, contribuindo para os objetivos de sustentabilidade.      |
| 4. Redução do ruído:                       | O desligamento dos motores auxiliares também reduz os níveis de ruído, impactando positivamente o ambiente urbano próximo aos portos.             |

A seguir, a Tabela 4 apresenta exemplos de portos ao redor do mundo que já implementaram o sistema Onshore Power Supply - OPS e outras tecnologias voltadas para a descarbonização:

Tabela 4- Alguns portos que já utilizam o OPS

| Porto                | Localização   | Tecnologia implementada        | Ano de implementação | Impacto ambiental  |
|----------------------|---------------|--------------------------------|----------------------|--|
| Porto de Los Angeles | EUA           | Onshore Power Supply           | 2013                 | Redução de 30% nas emissões de NOx durante operações.                        |
| Porto de Roterdã     | Países Baixos | Onshore Power Supply           | 2015                 | Diminuição significativa das emissões de CO <sub>2</sub> durante atracações. |
| Porto de Hamburgo    | Alemanha      | Abastecimento com GNL e OPS    | 2018                 | Redução de 50% nas emissões de GEE em operações portuárias.                  |
| Porto de Cingapura   | Cingapura     | Onshore Power Supply           | 2020                 | Melhoria na qualidade do ar e redução das emissões locais.                   |
| Porto de Xangai      | China         | Infraestrutura para hidrogênio | 2022                 | Início da transição para combustíveis alternativos.                          |
| Porto do Pecém       | Brasil        | Onshore Power Supply           | 2024 (previsto)      | Potencial para reduzir significativamente as emissões locais.                |

Esses exemplos demonstram como a implementação de tecnologias como o *Onshore Power Supply* e outras inovações podem contribuir para a descarbonização dos portos marítimos,

promovendo um ambiente mais sustentável e reduzindo as emissões associadas às operações portuárias.

A Figura 1 apresenta alguns dos mais importantes equipamentos utilizados na operação dos portos onde os combustíveis mais utilizados são o diesel e apresentamos ainda as possíveis rotas de energia de baixo carbono, onde surgem a eletricidade e os hidrogênios.

Figura 1- Equipamentos Portuários com os seus respectivos combustíveis utilizados e possíveis rotas a serem usadas

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| <p><b>Portêiner</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – Eletricidade, HVO, H2 (Célula de Hidrogênio)</p>  | <p><b>Guindaste Portuário</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – Eletricidade, HVO, H2 (Célula de Hidrogênio)</p>  | <p><b>RTG – RUBBER TYRED GANTRY</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – Eletricidade, HVO, H2 (Célula de Hidrogênio)</p>   | <p><b>EMPILHADORAS DE CARGAS PALETIZADAS</b></p>   |
| <p><b>RMG – RAIL MOUNTED GANTRY CRANES</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – Eletricidade, HVO, H2 (Célula de Hidrogênio)</p>                        | <p><b>CAMINHÕES &amp; VEÍCULO PORTUÁRIO TT - TERMINAL TRACTORS</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – Eletricidade, HVO, GNL, H2 (Célula de Hidrogênio)</p> | <p><b>REACH STACKER</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – Eletricidade, HVO, H2, GNL (Célula de Hidrogênio)</p>   | <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – Eletricidade, HVO, GNL, H2 (Célula de Hidrogênio)</p>   |
| <p><b>Equipamento Portuário Especial</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL UTILIZADO – Diesel<br/>ROTAS DE DESCARBONIZAÇÃO – Eletricidade, H2 (Célula de Hidrogênio)</p> |   | <p><b>Armazém</b></p>  <p><b>Pátio de Contêineres, Carga Geral e Granéis Sólidos</b></p>  <p><b>Pátio de Triagem e Pátio Ferroviário</b></p>  <p><b>Prédios Administrativos</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL UTILIZADO – Eletricidade fornecida por concessionária e/ou gerada por queima de diesel;<br/>ROTAS DE DESCARBONIZAÇÃO – Eletricidade Eólica/Solar, Queima de HVO, H2 (Célula de Hidrogênio)</p> |   |
| <p>Transporte</p>   |   |   |   |
| <p><b>Navios</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Banker oil<br/>ROTAS – HVO, H2 (Amônia ou Célula de Hidrogênio)</p>   | <p><b>Locomotiva de Carga</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – HVO, GNL, H2 (Célula de Hidrogênio)</p>   | <p><b>Rebocadores</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – HVO, H2 (Amônia ou Célula de Hidrogênio)</p>  | <p><b>Veículo de Transporte Rodoviário de Carga</b></p>  <p>COMBUSTÍVEL – Diesel<br/>ROTAS – HVO, GNL, H2 (Célula de Hidrogênio)</p> |

Fonte: do próprio autor.

As Figuras 2 e 3 apresentam os equipamentos utilizados atualmente na grande maioria dos portos com a sua respectiva rota de alternativa de energia descarbonizada e alguns dos equipamentos já existente no mercado desde energias fósseis a descarbonizados.

Figura 3 – Equipamentos disponíveis no mercado

|  |   |   |   |
|--|---|---|---|
| <p>Transportador de Estrado</p>  <p>Diesel, GLP, Elétrico</p> | <p>Veículo</p>  <p>Gasolina, diesel ,GNV, GLP Elétrico</p> | <p>Trator de Terminal</p>  <p>Diesel, Híbrido, Elétrico</p>                 | <p><b>Mercado</b></p> <p>Manipulador Lateral</p>  <p>Diesel ,GNV, GLP e Elétrico</p> |
| <p>Transpaleta</p>  <p>Elétrico</p>                          | <p>Empilhadeira de Alcance</p>  <p>Diesel e Elétrico</p>  | <p>Guindaste de Pórtico sobre Pneus</p>  <p>Diesel ,híbrido e Elétrico</p> | <p>Sistema OPS - OnShore Power Supply</p>  <p>Eletricidade</p>                      |

Fonte: US Department of Energy

## 8 EXEMPLO DE IMPACTO AMBIENTAL

Estudo da Empresa XCMG do Brasil conforme a Figura 4 apresenta um comparativo de custo de um caminhão elétrico com movido a diesel (VW Constellation 30.320 8x2 diesel-E6) e o caminhão elétrico E7-29R XCMG.

As iniciativas para descarbonização de equipamentos de transporte de cargas e de movimentação de cargas tem prosperado de forma significativa no mundo. Atualmente no Brasil, já existem empresas que promovem a descarbonização desses equipamentos de transporte e movimentação de cargas por meio do desenvolvimento de soluções de *powertrain*<sup>1</sup> compatíveis com a realidade de cada território.

Como exemplo de uma dessas soluções de *powertrain* existente no mercado e acessíveis às empresas de logística, transporte e operação portuária, a *XUZHOU CONSTRUCTION MACHINERY GROUP – XCMG*, multinacional chinesa, investiu 0,5 bilhão de dólares na implantação de uma fábrica de equipamentos em Pouso Alegre - MG com capacidade de produção de 10.000 equipamentos por

<sup>1</sup> Do momento em que você dá partida e a vela liga o motor até que a força gerada por ele seja transferida às rodas motrizes ela passa por um sistema. Ao conjunto: embreagem, caixa de marchas, eixos de transmissão, diferencial e rodas motrizes é dado o nome de Powertrain ou trem de força.

ano, com configurações de motores térmicos (Biocombustíveis), híbridos (térmicos e elétricos), elétricos (BEV) e motores movidos a eletricidade gerada à partir de células de hidrogênio.

Iniciativas mundiais como a promovida pela XCMG são responsáveis por colocar a descarbonização das operações de logística e transporte em um patamar de escala superior, tendo em vista que a predominância das cargas que são transportadas do ponto de origem aos portos, e que posteriormente são movimentadas internamente nos pátios e terminais portuários, utilizam equipamentos com motores predominantemente movidos a combustão de diesel.

O quadro abaixo compara os custos das duas soluções de veículo de carga, o E7-29R Caminhão Elétrico XCMG e o VW 28.480 Meteor (Diesel E6):

Figura 4 – Comparação de custo realizado pela Empresa XCM-Brasil de um caminhão a diesel e elétrico

### E7-29R Caminhão Elétrico XCMG

| Comparativo de Custo:<br>Caminhão Diesel (VW Constellation 30.320 8x2 (diesel - E6) x Caminhão |                                |  |          |
|--|--------------------------------|--|----------|
|  | VW Constellation<br>30.320 8x2 | Custo Energia fora de Pico<br>ou Mercado Livre<br>E7-29R | Economia |
| Km diária  | 150                            |  |          |
| Dias por semana  | 6                              |  |          |
| Km Mês   | 3.600                          |  |          |
| Km ano   | 43.200                         |  |          |
| Km para Amortizar o Investimento   | 187.172                        |  |          |
| Tempo para Amortizar o Investimento  | 4,33                           |  |          |
| <b>Valor de Aquisição FIPE</b>   | 741.500                        | 1.000.000  | -258.500 |
| Consumo Médio Km/L - Km/Kwh  | 3,00                           | 0,67   |          |
| Preço/Litro Diesel - Kwh   | 5,71                           | 0,43   |          |
| <b>Custo de Abastecimento</b>  | 356.251                        | 122.083  | 234.168  |
| Custo Abastecimento /Km rodado   | 1,90                           | 0,65   | 1,25     |
| Consumo Arla (Km/l)  | 50                             | -  |          |
| Preço/Litro Arla   | 4,00                           | -  |          |
| <b>Custo de Arla</b>   | 14.974                         | -  | 14.974   |
|  | 0,08                           |  |          |
| <b>Custo Abastecimento + Arla</b>  | 371.225                        | 122.083  | 249.141  |
| <b>Valor Acumulado de Manutenção</b>   | 56.152                         | 46.793   | 9.359    |
| Manutenção/Km rodado   | 0,30                           | 0,25   | 0,05     |
| <b>Custo Operacional Total</b>   | 427.377                        | 168.877  | 258.500  |
| <b>Custo Operacional / Km Rodado</b>   | 2,28                           | 0,90   | 1,38     |



Figura 5- Resultados apresentados pela empresa XCMG do impacto ambiental



- Redução de **65%** de custo por km rodado de R\$ 1,90 para R\$ 0,65 por Km no elétrico.
- Em 4 ano teremos uma redução de CO2 para a atmosfera em torno **47.000t/ ano**, por cada caminhão.
- Evitando consumo de mais de **15 mil litros** de óleo Diesel por Caminhão.
- **Credito de Carbono**  
Valor do Carbono = 1.000 toneladas x \$76,46/tonelada.  
 $47.000T \times \$76,46 = \$3.593.62$

A transição para veículos elétricos no setor de transporte, especialmente caminhões, é uma estratégia importante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade. Este estudo analisa o impacto econômico e ambiental da adoção de caminhões elétricos em comparação com caminhões a diesel, considerando diversos fatores como custo de aquisição, consumo, preço da energia, custo de abastecimento, custo do Arla, manutenção por quilômetro rodado e custo operacional total.

## 8.1 ANÁLISE DE CUSTOS

O investimento inicial na aquisição de um caminhão elétrico é geralmente superior ao de um caminhão a diesel. No entanto, a diferença de R\$258.500,00, que é amortizado em 4 anos para depois apresentar resultado positivo durante a sua vida útil justificando essa escolha. Este valor considera não apenas o preço de aquisição, mas também as economias geradas em consumo e manutenção.

Os caminhões elétricos apresentam uma eficiência energética significativamente maior. Enquanto um caminhão a diesel consome cerca de 15 mil litros de combustível por ano, um caminhão elétrico utiliza eletricidade que, em termos financeiros, resulta em um custo operacional reduzido. Com o preço médio da energia elétrica sendo inferior ao do diesel, a economia se torna evidente. O custo por quilômetro rodado para o caminhão elétrico é reduzido em até 65% em comparação com o caminhão a diesel.

Os caminhões a diesel requerem o uso de Arla (Agente Redutor Líquido de NOx), que representa um custo adicional significativo. Em contraste, os caminhões elétricos não possuem essa necessidade, eliminando custos associados à compra e ao armazenamento desse aditivo.

Os custos de manutenção para veículos elétricos são consideravelmente mais baixos devido à menor quantidade de peças móveis e à ausência de componentes como filtros de óleo e sistemas de escapamento. Isso resulta em uma redução significativa nos custos operacionais totais.

## 8.2 ANÁLISE AMBIENTAL

A adoção de caminhões elétricos não apenas gera economias financeiras substanciais, mas também contribui significativamente para a redução das emissões de carbono. Este estudo estima que a transição para caminhões elétricos pode evitar a emissão de aproximadamente 47 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano ao longo de quatro anos. Essa redução é alcançada pela eliminação do consumo dos mais de 15 mil litros de diesel que seriam utilizados por um caminhão convencional. Além disso, essa mudança gera um crédito de carbono estimado em U\$3.593,62 anualmente, contribuindo para a sustentabilidade financeira das operações logísticas e promovendo práticas empresariais mais responsáveis.

A comparação entre caminhões a diesel e elétricos revela que a transição para veículos elétricos não só oferece vantagens econômicas significativas por meio da redução dos custos operacionais totais, mas também desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas. Com uma economia estimada em R\$258.500,00 que é amortizado em 4 anos para depois apresentar resultado positivo durante a sua vida útil justificando essa escolha além de uma redução substancial nas emissões de CO<sub>2</sub>, os caminhões elétricos se posicionam como uma solução viável e sustentável para o futuro do transporte.

## 9 CONCLUSÃO

O avanço do hidrogênio verde no Brasil representa uma oportunidade para complementar a matriz energética do país, alinhando-se estrategicamente às metas globais de sustentabilidade e descarbonização. A integração do hidrogênio verde nas operações portuárias brasileiras, como no caso emblemático do Porto de Pecém, reforça o compromisso nacional com a redução das emissões de gases de efeito estufa e consolida o Brasil como um ator emergente na economia global do hidrogênio.

Para que o Brasil se destaque nesse cenário, é essencial expandir a infraestrutura de produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio verde. Essa evolução demandará investimentos significativos em tecnologia e inovação, além de parcerias estratégicas, como a colaboração com atores nacionais e internacionais, que podem acelerar o desenvolvimento de hubs de hidrogênio verde com relevância internacional.

O fortalecimento do marco regulatório será um pilar crucial para garantir a competitividade do hidrogênio verde brasileiro no mercado global. Políticas públicas que incentivem sua adoção, associadas a mecanismos de certificação e padrões de sustentabilidade, são fundamentais para assegurar que o hidrogênio produzido no Brasil seja reconhecido como confiável e sustentável em mercados internacionais.

A transição para o hidrogênio verde trará impactos socioeconômicos profundos, incluindo a geração de empregos, o desenvolvimento econômico local e a melhoria na qualidade de vida das comunidades próximas aos portos. Contudo, para que essa transição seja equitativa, é essencial oferecer suporte e capacitação aos trabalhadores atualmente dependentes das indústrias de combustíveis fósseis, assegurando sua integração nas novas oportunidades da economia do hidrogênio.

A longo prazo, a integração do hidrogênio verde nos portos brasileiros pode servir como modelo para descarbonizar outros setores críticos, como a indústria e o transporte. O êxito dessa transição energética será crucial para o desenvolvimento sustentável do Brasil e para fortalecer sua posição como líder na arena global de energias renováveis.

Nos próximos anos, será de suma importância que o Brasil capitalize seus vastos recursos naturais e avanços tecnológicos para se estabelecer como uma potência global na economia do hidrogênio. A superação dos desafios regulatórios, tecnológicos e socioeconômicos será determinante para assegurar que o hidrogênio verde desempenhe um papel central na transformação energética do país e na promoção de um futuro mais sustentável.

Com uma visão estratégica clara e um compromisso sólido com a inovação e a sustentabilidade, o Brasil possui uma oportunidade única de liderar a transição para uma economia de baixo carbono, posicionando o hidrogênio como pilar essencial de um futuro mais verde, resiliente e próspero.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro a este estudo

## REFERÊNCIAS

AGARWALA, P.; CHHABRA, S.; AGARWALA, N. Using digitalisation to achieve decarbonisation in the shipping industry. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, v. 5, p. 161-174, 2021.

ALAMOUSH, A. S.; DALAKLIS, D.; BALLINI, F.; ÖLÇER, A. Consolidating Port Decarbonisation Implementation: Concept, Pathways, Barriers, Solutions, and Opportunities. *Sustainability*, 2023.

ANP. *Discussão sobre a regulamentação do hidrogênio no Brasil*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022.

ANTAQ. *Diagnóstico de Descarbonização, Infraestrutura e Aplicações do Hidrogênio nos Portos*, 2024. Disponível em: link. Acesso em: [data de acesso].

BEZERRA, B. M. et al. Hidrogênio Verde como Potencializador do Comércio Internacional no Estado do Ceará. 2023.

BMWK – MINISTÉRIO FEDERAL DE ECONOMIA E PROTEÇÃO DO CLIMA. *Germany's National Hydrogen Strategy*. Berlim: BMWK, 2022. Disponível em: <https://www.bmwk.de>. Acesso em: 1 set. 2024.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Hidrogênio Verde: Oportunidades para o Brasil*. Rio de Janeiro: BNDES, 2023. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 5 set. 2024.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Relatório de Sustentabilidade 2022: Apoio ao Setor de Energias Renováveis no Brasil*. Rio de Janeiro: BNDES, 2022. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br>. Acesso em: 1 set. 2024.

BNDES. *Linhas de crédito para projetos de hidrogênio verde*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Programa Nacional de Hidrogênio: diretrizes para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil*. Brasília: MME, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/politica-energetica/hidrogenio/programa-nacional-de-hidrogenio>. Acesso em: 5 set. 2024.

CARLSON, E.; TRENCHER, G. Green hydrogen applications in port decarbonization. *Renewable Energy*, 2024. DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.004.

CARLSON, E.; TRENCHER, G. Green hydrogen in Brazil: A review of the policy landscape. *Energy Policy*, v. 189, p. 113116, 2024.

CHEN, C. et al. Hydrogen applications for sustainable port operations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydrogen.2024.02.003.

CHEN, C. et al. Readiness assessment of port infrastructure for effective integration of hydrogen applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, n. 35, p. 20409–20424, 2024.

CHINA HYDROGEN ALLIANCE. *China Hydrogen Industry Development Report 2021*. Pequim: China Hydrogen Alliance, 2021.

COMISSÃO EUROPEIA. *The European Green Deal*. Bruxelas, 2020. Disponível em: <https://ec.europa.eu/green-deal>. Acesso em: 01 set. 2024.

CTC Infra (1). *Tudo o que você precisa saber sobre portos marítimos*, 2023. Disponível em: <https://ctcinfra.com.br/porto-maritimo/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

CTC Infra (2). *Conheça as características de cada tipo de porto*, 2023. Disponível em: <https://ctcinfra.com.br/tipos-de-portos/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

DA SILVA, V. L. et al. Green hydrogen production potential in Brazil: A comprehensive assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 155, p. 112045, 2024.

EOM, J. et al. GHG reduction strategies in maritime transport. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023. DOI: 10.1016/j.ijggc.2023.103654.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Descarbonização do Transporte Aquaviário*, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/fact-sheet-descarbonizacao-do-transporte-aquaviario>. Acesso em: 11 nov. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Estudo sobre o Potencial de Produção de Hidrogênio no Brasil: Perspectivas e desafios*. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Estudo-sobre-o-Potencial-de-Producao-de-Hidrogenio-no-Brasil>. Acesso em: 23 ago. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: EPE, 2022.

EPE. *Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)*. Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

EUROPEAN COMMISSION: JOINT RESEARCH CENTRE, CRIPPA, M., GUIZZARDI, D., PAGANI, F., BANJA, M. et al. *GHG emissions of all world countries*. Publications Office of the European Union, 2024. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897>

EUROPEAN COMMISSION. *The European Green Deal*. Bruxelas: European Union, 2019. Disponível em: <https://ec.europa.eu>. Acesso em: 21 nov. 2024.

GONZÁLEZ, L. et al. Viabilidade do Uso do Hidrogênio em Portos do Nordeste Brasileiro: Um Estudo Exploratório. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 8, p. 45-59, 2022.

GOVERNMENT OF INDIA. *National Hydrogen Mission: A Roadmap to India's Decarbonization*. Nova Deli: Ministry of Power, 2021.

GRAY, D. et al. Techno-economic assessment of zero-carbon fuels for the maritime sector. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, v. 238, n. 1, p. 189–203, 2024.

GUIA MARÍTIMO. *A Descarbonização nos Portos Brasileiros*, 2024. Disponível em: <https://www.guiamaritimo.com.br/noticias/portos/a-descarbonizacao-nos-portos-brasileiros>. Acesso em: 31 out. 2024.

HOWARTH, R. W.; JACOBSON, M. Z. How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, v. 9, n. 10, p. 1676-1687, 2021.

IBP – INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. *Oportunidades e Desafios para o Hidrogênio Verde no Brasil*. Rio de Janeiro: IBP, 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global Energy Review 2021*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 11 nov. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global Hydrogen Review 2021*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. Acesso em: 1 set. 2024.

IMO - INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Fourth IMO GHG Study 2020*. Londres: IMO, 2020. Disponível em: <https://www.imo.org>. Acesso em: 11 nov. 2024.

IMO. *Fourth IMO GHG Study 2020*. International Maritime Organization, 2020.

IMO. *IMO Strategy for GHG Emissions Reduction*, 2023. Disponível em: <https://www.imo.org>. Acesso em: 21 nov. 2024.

IMO. *IMO's Initial Greenhouse Gas (GHG) Strategy*. International Maritime Organization, 2023.

INTERMODAL DIGITAL. *Os tipos de portos e suas funções*, 2023. Disponível em: <https://digital.intermodal.com.br/artigos/os-tipos-de-portos-e-suas-funcoes/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

JURADO, F. et al. Hydrogen Infrastructure Development for Maritime Ports in Spain. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, p. 890-909, 2023.

KAZI, R. A. et al. Economic viability of green hydrogen in the Middle East: Key enablers and challenges. *Renewable Energy Research Journal*, v. 87, p. 98-110, 2020.

MALLOUPAS, G.; YFANTIS, E. Decarbonization in shipping: Hydrogen vs. ammonia fuels. *Transportation Research Procedia*, 2021. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.05.027.

MAMIGONIAN, A. Navegações e Portos. *Cadernos Geográficos*, 2017.

MATOS, L. O.; BITENCOURT, A. C. P. Green Hydrogen in Brazil: An Overview of the Regulatory Framework and Challenges, 2023.

METI – MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY. *Japan's Hydrogen Strategy*. Tóquio: METI, 2021. Disponível em: <https://www.meti.go.jp>. Acesso em: 23 ago. 2024.

MME. *Plano Nacional de Energia 2050*. Ministério de Minas e Energia, 2020.

PIVETTA, G. et al. Green Hydrogen Hubs: European Models and Implications for Developing Economies. *International Journal of Hydrogen Economy*, v. 45, n. 9, p. 1015-1027, 2022.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. *Hydrogen Projects in Rotterdam*. Roterdã: Port of Rotterdam, 2022. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com>. Acesso em: 23 ago. 2024.

PORTAL GOV.BR. *Sistema Portuário Nacional — Portos e Aeroportos*, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aquaviario/sistema-portuario>. Acesso em: 23 ago. 2024.

PRINZHOFER, A. et al. Natural hydrogen: A new resource in the energy mix? *Elements*, v. 20, n. 3, p. 181–186, 2024.

PUC-RIO. *O Porto e o Terminal de Contêiner*, 2017. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9451/9451\\_5.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9451/9451_5.PDF). Acesso em: 23 ago. 2024.

SANTOS, R. F. et al. Desafios e Perspectivas da Regulamentação do Hidrogênio no Brasil. *Journal of Sustainable Energy*, v. 48, n. 2, p. 159-174, 2024.

SASAKI, T. et al. Japan's Basic Hydrogen Strategy and its Implications for Energy Policy. *Energy Policy*, v. 142, p. 111521, 2020.

SCITA, G. et al. Geopolitics of Green Hydrogen: New Dependencies and Power Shifts. *Global Energy Policy Review*, v. 34, n. 5, p. 445-462, 2020.

SENAI. *Cenário Brasileiro do Hidrogênio Verde: Potencial de Produção e Aplicações*. Brasília: SENAI, 2023. Disponível em: <https://www.senai.org.br/hidrogenio-verde>. Acesso em: 23 ago. 2024.

SERRATT, T. M. et al. Exploring the Capacity and Economic Viability of Green Hydrogen Production by Utilizing Surplus Energy from Wind Farms and Small Hydropower Plants in Southern Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 64, p. 567-589, 2024.

SMITH, H. et al. Global Hydrogen Strategies: Learning from International Best Practices. *Energy Reports*, v. 9, p. 455-467, 2023.

ULLMAN, M.; KITTNER, N. Environmental Impacts of Hydrogen Production: Water Consumption and Electrolysis Byproducts. *Journal of Clean Energy Technologies*, v. 48, n. 4, p. 287-296, 2022.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). *Paris Agreement*, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int>. Acesso em: 21 nov. 2024.

US GOVERNMENT. *Inflation Reduction Act*, 2022. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov>. Acesso em: 21 nov. 2024.

WAYCARBON. O setor portuário e a descarbonização no transporte marítimo, 2024. (“O setor portuário e a descarbonização no transporte marítimo”) Disponível em: <https://blog.waycarbon.com/2024/05/o-setor-portuario-e-a-descarbonizacao-no-transporte-maritimo/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

WEI, H.; MÜLLER-CASSERES, E.; BELCHIOR, C.; SZKLO, A. Evaluating the Readiness of Ships and Ports to Bunker and Use Alternative Fuels: A Case Study from Brazil. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023.