

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR HVO NO PORTO DO  
ITAQUI COM APOIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

**EVALUATION OF DIESEL SUBSTITUTION SCENARIOS WITH HVO AT THE PORT OF  
ITAQUI USING A COMPUTATIONAL TOOL**

**EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE SUSTITUCIÓN DE DIÉSEL POR HVO EN EL  
PUERTO DE ITAQUI CON EL APOYO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**



10.56238/revgeov17n3-177

**João Vitor Lima Sousa**

Engenheiro de Transportes

Instituição: Universidade de Brasília (UnB)

E-mail: vitor\_lima@egresso.ufg.br

**Felipe Azevedo Rios Silva**

Doutor em Físico-Química

Instituição: Universidade de Brasília (UnB)

E-mail: felipearsilva@gmail.com

**Yaeko Yamashita**

Doutora em Transportes

Instituição: Universidade de Brasília (UnB)

E-mail: yaekoyamashita@gmail.com

**João Gabriel Gonçalves França Vasconcelos**

Engenheiro de Computação

Instituição: Universidade de Brasília (UnB)

E-mail: jgvasconcelos16@gmail.com

---

**RESUMO**

A descarbonização das operações portuárias tem ganhado centralidade nas políticas climáticas nacionais e internacionais, especialmente diante da elevada dependência de diesel fóssil no transporte aquaviário e terrestre. Este artigo avalia cenários de substituição do diesel por Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO) no Porto do Itaquí, estimando custos e emissões de CO<sub>2</sub> em diferentes combinações de uso de combustível e precificação de carbono. Com base em fatores de emissão e parâmetros econômicos obtidos na literatura e em inventário oficial, desenvolveu-se uma ferramenta computacional que operacionaliza um modelo de cálculo de emissões e custos líquidos, considerando também receitas associadas a créditos de carbono. A ferramenta foi aplicada a cinco cenários para veículos de transporte e retroescavadeira do Porto do Itaquí, comparando a manutenção do diesel com substituições parciais e totais por HVO em horizontes de 2025 e 2050. Os resultados indicam reduções significativas de emissões nos cenários com HVO e sugerem que, em um contexto de maior valorização do carbono, o HVO pode tornar-se economicamente mais atrativo que o diesel fóssil.



Conclui-se que o modelo e a ferramenta associada podem apoiar o planejamento estratégico da transição energética portuária, ao integrar variáveis econômicas e ambientais em análises de cenários.

**Palavras-chave:** Descarbonização. Portos. HVO. Créditos de Carbono. Porto do Itaqui.

### ABSTRACT

The decarbonization of port operations has gained prominence in national and international climate policies, particularly due to the high dependence on fossil diesel in both maritime and land transportation. This article evaluates scenarios for replacing diesel with Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) at the Port of Itaqui, estimating costs and CO<sub>2</sub> emissions under different fuel-use combinations and carbon pricing conditions. Based on emission factors and economic parameters obtained from the literature and official inventories, a computational tool was developed to operationalize a model for calculating emissions and net costs, also considering revenues associated with carbon credits. The tool was applied to five scenarios involving transport vehicles and a backhoe loader at the Port of Itaqui, comparing the continued use of diesel with partial and full substitution by HVO for the years 2025 and 2050. The results indicate significant emission reductions in scenarios involving HVO and suggest that, in a context of higher carbon valuation, HVO may become economically more attractive than fossil diesel. It is concluded that the model and the associated tool can support strategic planning for the port energy transition by integrating economic and environmental variables into scenario analyses.

**Keywords:** Decarbonization. Ports. HVO. Carbon Credits. Port of Itaqui.

### RESUMEN

La descarbonización de las operaciones portuarias ha ganado protagonismo en las políticas climáticas nacionales e internacionales, especialmente debido a la elevada dependencia del diésel fósil en el transporte marítimo y terrestre. Este artículo evalúa escenarios de sustitución del diésel por Aceite Vegetal Hidrotratado (HVO) en el Puerto de Itaqui, estimando costos y emisiones de CO<sub>2</sub> bajo diferentes combinaciones de uso de combustible y precios del carbono. Con base en factores de emisión y parámetros económicos obtenidos de la literatura y de inventarios oficiales, se desarrolló una herramienta computacional que operacionaliza un modelo de cálculo de emisiones y costos netos, considerando también los ingresos asociados a créditos de carbono. La herramienta se aplicó a cinco escenarios para vehículos de transporte y una retroexcavadora del Puerto de Itaqui, comparando el mantenimiento del diésel con sustituciones parciales y totales por HVO en los horizontes de 2025 y 2050. Los resultados indican reducciones significativas de emisiones en los escenarios con HVO y sugieren que, en un contexto de mayor valorización del carbono, el HVO puede volverse económicamente más atractivo que el diésel fósil. Se concluye que el modelo y la herramienta asociada pueden apoyar la planificación estratégica de la transición energética portuaria al integrar variables económicas y ambientales en análisis de escenarios.

**Palabras clave:** Descarbonización. Puertos. HVO. Créditos de Carbono. Puerto de Itaqui.



## 1 INTRODUÇÃO

A descarbonização do setor portuário tem se consolidado como agenda estratégica diante das metas globais de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e da crescente pressão regulatória sobre o transporte marítimo (IEA, 2021; Di Majo, 2022; IMO, 2023). O uso intensivo de óleo diesel em navios, equipamentos portuários e veículos terrestres contribui de forma relevante para as emissões de CO<sub>2</sub>, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e material particulado, com impactos diretos sobre o clima e a qualidade do ar em áreas urbanas e portuárias (Di Majo, 2022).

No contexto brasileiro, diferentes instrumentos regulatórios buscam induzir a transição energética, como a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV), que estabelecem metas de redução de emissões e ampliam o uso de combustíveis de baixo carbono na matriz energética (Brasil, 2009; Brasil, 2017; Brasil, 2024). Paralelamente, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) vem estruturando diretrizes e diagnósticos voltados à descarbonização dos portos brasileiros, destacando o papel de inventários setoriais de emissões e a necessidade de adoção de combustíveis alternativos, entre eles o HVO, o hidrogênio de baixa emissão e a amônia (ANTAQ, 2023; ANTAQ, 2024).

Entre as alternativas ao diesel convencional, o Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO) se destaca por combinar elevado potencial de redução de emissões ao longo do ciclo de vida com compatibilidade com motores e infraestrutura existentes, o que reduz custos de transição (Arvidsson et al., 2011; Szeto; Leung, 2022; Gomes et al., 2025). Estudos indicam reduções de 60% a 95% nas emissões de CO<sub>2</sub> em comparação ao diesel fóssil, dependendo das matérias-primas e rotas tecnológicas, além de significativa diminuição de outros poluentes atmosféricos (Arvidsson et al., 2011; Gomes et al., 2025).

Apesar do potencial técnico e ambiental do HVO, sua difusão enfrenta desafios associados à competitividade de custos frente ao diesel e à incerteza em torno da precificação de carbono e de mecanismos de políticas públicas, como CBIOs e mercados regulados de emissões (Lee et al., 2024; Pereda et al., 2025). No setor portuário brasileiro, estudos recentes têm avançado na elaboração de inventários e na análise de alternativas de mitigação, mas ainda são escassos os trabalhos que integram, em uma abordagem quantitativa, custos de combustível, emissões de GEE e receitas de créditos de carbono em cenários de substituição de diesel por HVO (Pereda, 2025).

Diante desse quadro, este artigo busca responder à seguinte questão: em que condições econômicas o uso de HVO em operações terrestres portuárias pode tornar-se competitivo em relação ao diesel fóssil, considerando a precificação de carbono e a redução de emissões? O objetivo é avaliar cenários de substituição do diesel por HVO no Porto do Itaquí, estimando custos e emissões de CO<sub>2</sub> em diferentes combinações de uso de combustível e valores de créditos de carbono. Para tanto, propõe-se um modelo de cálculo de emissões e custos líquidos, operacionalizado por uma ferramenta



computacional, aplicado a um estudo de caso com base em dados do inventário de emissões do porto.

## **2 MARCO LEGAL E POLÍTICAS DE DESCARBONIZAÇÃO**

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009, estabelece princípios, objetivos e instrumentos para a implementação de medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas no Brasil (Brasil, 2009). Entre seus instrumentos, destacam-se os planos setoriais de mitigação e adaptação e o estímulo ao desenvolvimento de mercados de redução de emissões, visando consolidar uma economia de baixo carbono. Embora a PNMC não trate especificamente do setor portuário, suas diretrizes abrangem o transporte como um todo, influenciando as operações portuárias e a adoção de combustíveis mais limpos.

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), definida pela Lei nº 13.576/2017, busca contribuir para o cumprimento dos compromissos climáticos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris, promover a expansão da produção e do uso de biocombustíveis e melhorar a eficiência energética setorial (Brasil, 2017). Entre seus mecanismos centrais estão as metas compulsórias anuais de descarbonização para distribuidores de combustíveis e os Créditos de Descarbonização (CBIOS). Esses instrumentos reforçam a importância de contabilizar emissões e reduções associadas a combustíveis alternativos, como o HVO, em análises de viabilidade econômica.

Mais recentemente, a Lei nº 14.993/2024 instituiu o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV), voltado à promoção de diesel de baixo carbono na matriz energética, estabelecendo diretrizes para participação volumétrica mínima desse combustível e para a definição de percentuais obrigatórios de mistura com diesel fóssil (Brasil, 2024). Embora o HVO não seja citado nominalmente, sua produção a partir de biomassa renovável via hidrotreatamento o enquadra no escopo de diesel verde, contribuindo para o atendimento das metas estabelecidas pelo programa.

No setor aquaviário e portuário, a ANTAQ tem discutido diretrizes para a descarbonização e a elaboração de inventários setoriais de emissões, destacando oportunidades e desafios relacionados à adoção de combustíveis alternativos e à infraestrutura necessária para seu uso (ANTAQ, 2023). Em estudo recente sobre descarbonização, infraestrutura e aplicações do hidrogênio nos portos brasileiros, a agência aponta estratégias para alinhar a infraestrutura portuária às exigências da neutralidade de carbono (ANTAQ, 2024). Essas iniciativas convergem com metas internacionais da Organização Marítima Internacional (IMO), que preveem redução significativa das emissões do transporte marítimo até meados do século (IMO, 2023).

Em síntese, o arcabouço normativo brasileiro, articulado com compromissos internacionais, cria incentivos regulatórios e econômicos para a substituição de combustíveis fósseis por alternativas de menor intensidade de carbono. Ao mesmo tempo, reforça a relevância de considerar explicitamente preços de carbono, créditos de descarbonização e metas de redução de emissões na avaliação de



viabilidade do uso de HVO em portos, dimensões incorporadas ao modelo de cenários desenvolvido neste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a construção da ferramenta computacional, bem como para a obtenção dos dados e dos parâmetros de base.

#### 3.1 ESTRUTURA GERAL DO MODELO

A análise desenvolvida neste artigo baseia-se em um modelo que estima, para cada cenário considerado, o custo de abastecimento, as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso de diesel e HVO e o custo líquido após a contabilização de créditos de carbono. O modelo foi parametrizado com base em fatores de emissão e reduções relativas reportados na literatura, bem como em dados econômicos recentes de preços de combustíveis e créditos de carbono.

Como referência, utiliza-se o volume de diesel consumido por veículos de transporte e retroescavadeira do Porto do Itaqui, conforme o inventário de emissões elaborado pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP, 2022). A partir desse volume, são simuladas diferentes combinações de uso de diesel e HVO em dois horizontes temporais (2025 e 2050) e sob distintos valores de créditos de carbono.

#### 3.2 MODELO DE CÁLCULO

Para cada cenário, o custo direto de abastecimento com diesel e HVO é calculado como o produto entre o volume consumido e o preço unitário de cada combustível. As emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao diesel são estimadas por meio de um fator de emissão médio por litro, enquanto as emissões correspondentes ao HVO são obtidas pela aplicação de uma redução percentual em relação ao diesel, seguindo os parâmetros presentes na literatura. A diferença de emissões entre os cenários é multiplicada pelo preço do crédito de carbono para estimar a receita potencial proveniente das emissões evitadas, que é então utilizada para calcular um custo líquido.

De forma simplificada, o modelo segue as seguintes relações:

Custo do combustível  $C_f$ :

$$C_f = V_f \cdot P_f \quad (1)$$

Onde:

$V_f$  = Volume consumido

$P_f$  = preço por litro do combustível  $f$  (diesel ou HVO)



Emissões de CO<sub>2</sub> com diesel  $E_d$ :

$$E_d = V_d \cdot FE_d \quad (2)$$

Onde:

$V_d$  = Volume de diesel

$FE_d$  = Fator de emissão médio por litro

Emissões de CO<sub>2</sub> com HVO  $E_h$ :

$$E_h = E_d \cdot (1 - R) \quad (3)$$

Onde:

$R$  = Redução percentual de emissões do HVO em relação ao diesel

Emissões evitadas  $E_{ev}$ :

$$E_{ev} = E_d - E_h \quad (4)$$

Receita de créditos de carbono  $R_c$ :

$$R_c = E_{ev} \cdot P_c \quad (5)$$

Onde:

$P_c$  = Preço por tonelada de CO<sub>2</sub>

Custo líquido  $C_{líq}$ :

$$C_{líq} = C_d + C_h - R_c \quad (6)$$

Onde:

$C_d$  = Custo de abastecimento com diesel

$C_h$  = Custo de abastecimento com HVO

Os valores de fatores de emissão, reduções percentuais e preços de carbono são obtidos em estudos de ciclo de vida e análises econômicas de combustíveis alternativos, bem como em bases de



mercado de créditos de carbono (Arvidsson et al., 2011; Solakivi; Paimander; Ojala, 2022; Gomes et al., 2025; Lee et al., 2024; Investing.com, 2025).

### 3.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O modelo foi implementado em uma ferramenta computacional desenvolvida em linguagem *Python*, com interface em formato de painel interativo, utilizando a biblioteca *Streamlit*. A ferramenta permite ao usuário inserir os principais parâmetros de entrada, tais como tipo de equipamento, volume consumido, preços de diesel e HVO, valor dos créditos de carbono, fatores de emissão e percentuais de redução associados ao HVO, vale destacar que, a ferramenta apresenta valores padrões de variáveis, com preços praticados na data de referência (Maio de 2025) e fatores presentes na literatura, para os casos em que o usuário opte por não inserir os valores manualmente na ferramenta. A partir desses dados, a aplicação realiza automaticamente os cálculos descritos na subseção anterior e apresenta, como saída, tabelas com custos, emissões e custos líquidos para cada cenário.

A opção por uma interface simplificada visa facilitar a utilização por gestores e técnicos do setor portuário, permitindo a replicação do modelo em diferentes portos ou conjuntos de equipamentos. Nesta versão, não há armazenamento persistente das informações, de modo que a ferramenta se destina principalmente ao apoio a análises de cenários, sem função de banco de dados operacional.

## 4 ESTUDO DE CASO: PORTO DO ITAQUI E CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS

Esta seção apresenta o estudo de caso e as premissas utilizadas para parametrizar o modelo de avaliação da substituição de diesel por HVO em operações terrestres portuárias.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO E DADOS DE ENTRADA

O estudo de caso foi conduzido no Porto do Itaqui, localizado no estado do Maranhão, cuja autoridade portuária disponibiliza inventários periódicos de emissões de GEE (EMAP, 2022). Considerou-se o volume de diesel consumido por veículos de transporte e retroescavadeira, que totalizou 17.158,30 litros em 2021, com fator de emissão médio de 3,20 kgCO<sub>2</sub>/litro, de acordo com o inventário e cálculos estequiométricos para obtenção do valor médio (EMAP, 2022; CETESB, 2023). Este conjunto de equipamentos foi selecionado por representar uma parcela relevante das emissões diretas associadas às operações terrestres do porto.

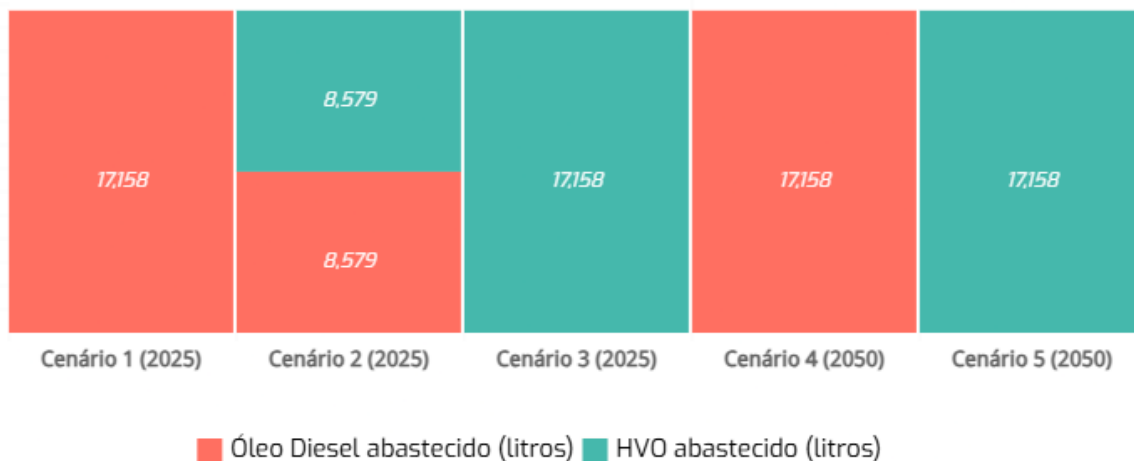
### 4.2 DESENHO DOS CENÁRIOS

A fim de responder às perguntas norteadoras do artigo, foram definidos cinco cenários para comparação entre o diesel fóssil e o HVO. O objetivo é identificar em quais condições o HVO se torna economicamente e ambientalmente competitivo em relação ao diesel. Para isso, foram considerados



cenários que analisam a substituição total do diesel por HVO com base nos preços praticados em 2025 e em estimativas para 2050. Adicionalmente, foi avaliado um cenário de mistura de 50% de HVO, considerando os preços de 2025. A partir dessas comparações, busca-se identificar as condições mais favoráveis para a utilização do HVO. Assim, os cenários apresentados são: (i) Cenário 1: Uso integral de diesel em 2025; (ii) Cenário 2: Substituição parcial, com uso de 50% de diesel e 50% de HVO em 2025; (iii) Cenário 3: Substituição total de diesel por HVO em 2025; (iv) Cenário 4: Uso integral de diesel em 2050; (v) Cenário 5: Substituição total de diesel por HVO em 2050.

Figura 1. Cenários de abastecimento



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Os preços do diesel e do HVO, assim como os valores dos créditos de carbono, foram estabelecidos com base em dados de mercado e em estudos prospectivos. Para 2025, adotou-se um preço de 0,50 US\$/litro para o diesel e de 1,75 US\$/litro para o HVO, além de um preço de carbono de 70,65 US\$/tCO<sub>2</sub> (Investing.com, 2025; Solakivi, Paimander e Ojala, 2022).

Para 2050, considerou-se o mesmo preço para o diesel, uma redução no preço do HVO para 1,00 US\$/litro e um valor de carbono de 250 US\$/tCO<sub>2</sub>, em linha com cenários de maior restrição climática (Lee et al., 2024; Pereda et al., 2025). A redução de emissões associada ao HVO foi definida em 85% para 2025 e 95% para 2050, refletindo a expectativa de melhorias na cadeia produtiva, aumento da participação de matérias-primas sustentáveis e ganhos tecnológicos na rota de produção (Arvidsson et al., 2011; Gomes et al., 2025; Solakivi; Paimander; Ojala, 2022). Esses valores foram agrupados e encontram-se na tabela 1.



Tabela 1. Parâmetros adotados para os cenários

Variáveis	2025	2050
Custo do Diesel (USD/l)	0,5	0,5
Custo do HVO (USD/l)	1,75	≈ 1
Valor do crédito de carbono (USD/ton)	70,65	250 (Lee et al., 2024)
Redução nas emissões de CO <sub>2</sub> do HVO em relação ao Diesel fóssil	85%	95%

Fonte: adaptado dos autores

Com base nesses parâmetros, a ferramenta computacional calculou, para cada cenário, o custo total de abastecimento, as emissões de CO<sub>2</sub> e o custo líquido após a consideração das receitas de créditos de carbono. Os resultados foram sintetizados em tabelas de comparação, permitindo avaliar os impactos econômicos e ambientais da substituição do diesel por HVO em curto e longo prazo.

#### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos presentes na Tabela 2 indicam que, em 2025, os cenários com uso de HVO apresentam custos diretos de abastecimento superiores aos do cenário de referência com diesel, devido ao preço unitário mais elevado do biocombustível.

Tabela 2 - Cenários da substituição de Diesel por HVO

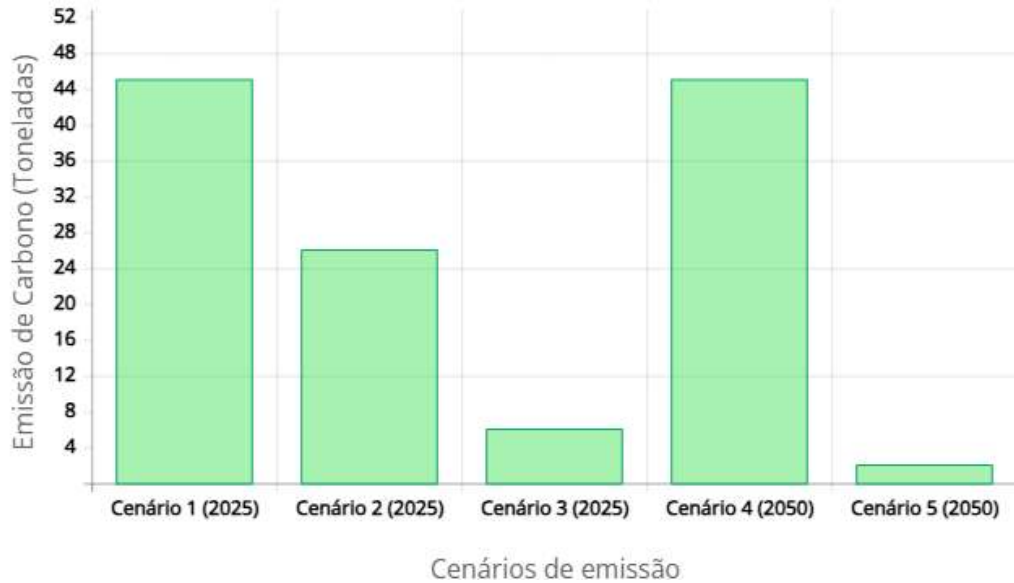
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
<b>Óleo Diesel abastecido (litros)</b>	17.158,30	8.579,15	0	17.158,30	0
<b>HVO abastecido (litros)</b>	0	8.579,15	17.158,30	0	17.158,30
<b>Valor total de abastecimento (USD)</b>	8.579,15	19.303,08	30.027,02	8.579,15	17.158,30
<b>Valor considerando os créditos de carbono (USD)</b>	11.826,46	21.170,29	30.514,12	22.366,19	17.985,52
<b>Emissões de CO<sub>2</sub> (ton)</b>	45,96	26,43	6,89	45,96	2,29

Fonte: dos autores

Por outro lado, observam-se reduções expressivas nas emissões de CO<sub>2</sub> nos cenários de substituição parcial e total, em decorrência da menor intensidade de carbono associada à queima do HVO, conforme ilustrado na Figura 2 (Arvidsson et al., 2011; Gomes et al., 2025).



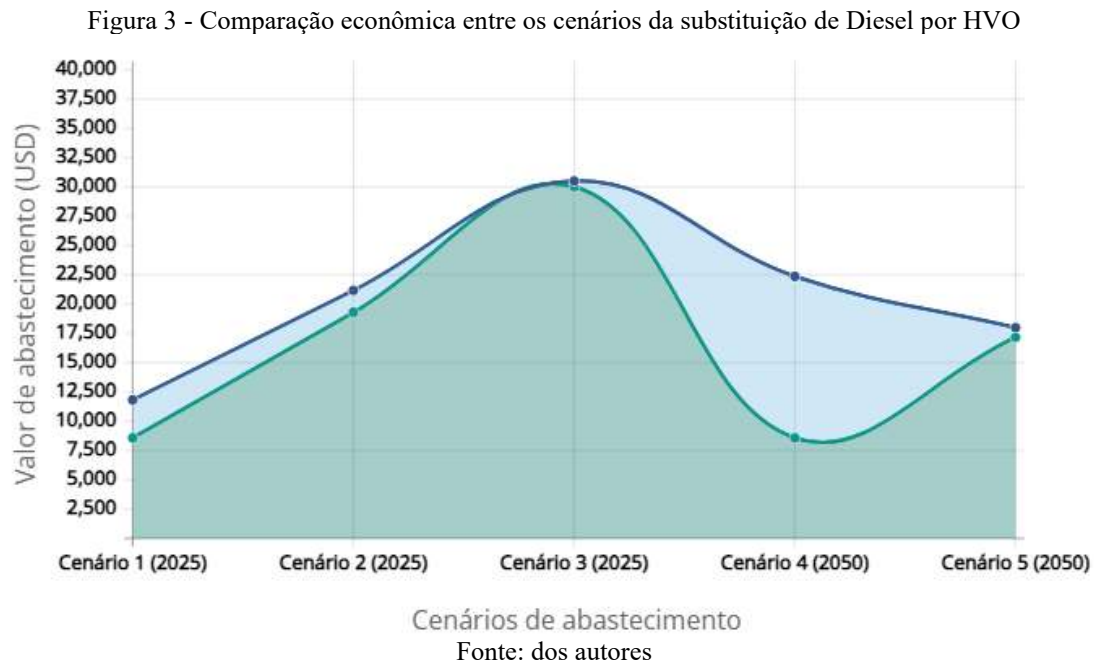
Figura 2. Comparação entre as emissões de CO<sub>2</sub> entre os cenários



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Apesar de a inclusão dos créditos de carbono reduzir parcialmente a diferença de custo líquido entre as alternativas, o diesel permanece economicamente mais competitivo no curto prazo, entre os cenários baseados nos preços de 2025. Ainda assim, mesmo em cenários de substituição parcial, observam-se reduções significativas nas emissões de CO<sub>2</sub>, evidenciando o potencial ambiental do combustível renovável. Para 2050, a combinação entre a queda projetada do preço do HVO, o aumento da redução percentual de emissões ao longo do ciclo de vida e a valorização do crédito carbono, altera de maneira significativa a comparação econômica. Nesses cenários, no caso de substituição total, o custo de abastecimento de HVO torna-se mais favorável que o custo de abastecimento com diesel, uma vez internalizados os benefícios econômicos dos créditos de carbono (Lee et al., 2024; Pereda et al., 2025; Solakivi; Paimander; Ojala, 2022). Ao mesmo tempo, as emissões de CO<sub>2</sub> são substancialmente reduzidas, podendo aproximar-se da neutralidade em cenários que consideram maiores reduções no ciclo de vida.





Esses resultados sugerem que a competitividade econômica do HVO em operações terrestres portuárias é fortemente dependente da trajetória de preços de carbono e de avanços tecnológicos na cadeia de produção do combustível. Em um ambiente regulatório mais rigoroso, com preços de carbono elevados e políticas de incentivo a combustíveis renováveis, o HVO tende a tornar-se uma alternativa atrativa do ponto de vista econômico e ambiental. Em contrapartida, em contextos de baixa precificação de carbono, a adoção do HVO depende de políticas adicionais de apoio ou de estratégias corporativas de descarbonização que internalizam benefícios reputacionais e de risco regulatório.

## 5 CONCLUSÃO

As simulações realizadas para o Porto do Itaquí mostram que a substituição do diesel por HVO em veículos de transporte e retroescavadeira pode resultar em reduções significativas de emissões de CO<sub>2</sub>, sobretudo em cenários com maior valorização do carbono (Arvidsson et al., 2011; Gomes et al., 2025; EMAP, 2022). A aplicação do modelo e da ferramenta computacional evidenciou que os cenários com HVO tendem a apresentar menor intensidade de emissões, com reduções que podem alcançar patamares superiores à metade das emissões observadas no cenário com uso exclusivo de diesel, dependendo das premissas adotadas para a rota de produção.

Do ponto de vista econômico, os resultados indicam que, embora o HVO permaneça mais caro que o diesel em termos de custo direto de abastecimento no curto prazo, a combinação entre queda projetada do preço do HVO e elevação do preço do carbono tende a reduzir essa diferença e, em horizontes mais longos, a tornar o HVO competitivo ou mesmo vantajoso em termos de custo líquido (Lee et al., 2024; Pereda et al., 2025; Solakivi; Paimander; Ojala, 2022). Em cenários de



descarbonização mais ambiciosos, a internalização dos benefícios econômicos decorrentes da redução de emissões pode inverter a hierarquia de custos entre diesel e HVO.

O estudo apresenta algumas limitações que devem ser destacadas. Em primeiro lugar, a análise concentra-se em um conjunto específico de equipamentos de um único porto, o que restringe a generalização dos resultados. Em segundo lugar, não se consideram investimentos em infraestrutura de abastecimento, custos de adaptação operacional ou incertezas associadas à disponibilidade futura de HVO e à dinâmica de preços de insumos. Além disso, não foi conduzida uma análise sistemática de sensibilidade dos resultados em relação às principais variáveis do modelo, como preços de combustíveis, fatores de emissão e valores de créditos de carbono.

Futuras pesquisas podem ampliar o modelo para incluir múltiplos portos e categorias de equipamentos, incorporar custos de capital e operação associados à infraestrutura de combustíveis alternativos e explorar metodologias de análise de sensibilidade e risco. A ferramenta computacional desenvolvida pode ser expandida para integrar bases de dados externas, permitir o armazenamento de séries históricas e incorporar novos indicadores, como custos de saúde associados à poluição local, fortalecendo seu papel como instrumento de apoio à decisão na transição energética portuária.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento: Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, da Nectere e da Universidade de Brasília (UnB), que viabilizou a realização deste estudo.



**REFERÊNCIAS**

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). International shipping. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/international-shipping>. Acesso em: 22 mai. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). Diagnóstico de descarbonização, infraestrutura e aplicações do hidrogênio nos portos brasileiros. Brasília: ANTAQ; GIZ, 2024.

ARVIDSSON, R.; PERSSON, S.; FRÖLING, M.; SVANSTRÖM, M. Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 1, p. 129–137, 2011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.02.004.

ART FUELS FORUM. HVO: hydrotreated vegetable oil. Bruxelas, 2018. Disponível em: <http://artfuelsforum.eu/wp-content/uploads/2018/05/Acrobat-Document-1.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

BODEMER, O. Charging ahead or running on fumes? A ‘totally unbiased’ look at electric, hydrogen, HVO, and those old-school petrol cars. 2023. Preprint. Disponível em: [https://figshare.com/articles/preprint/Charging\\_Ahead\\_or\\_Running\\_on\\_Fumes\\_A\\_Totally\\_Unbiased\\_Look\\_at\\_Electric\\_Hydrogen\\_HVO\\_and\\_Those\\_Old-School\\_Petrol\\_Cars/24441256](https://figshare.com/articles/preprint/Charging_Ahead_or_Running_on_Fumes_A_Totally_Unbiased_Look_at_Electric_Hydrogen_HVO_and_Those_Old-School_Petrol_Cars/24441256). Acesso em: 28 abr. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm). Acesso em: 12 mai. 2025.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 dez. 2017. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm). Acesso em: 12 mai. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e institui, entre outros, o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 out. 2024. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm). Acesso em: 12 mai. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Guia para avaliação de biocombustíveis e seus impactos na qualidade do ar em ambientes urbanos e portuários. São Paulo: CETESB, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: 8 mai. 2025.

DI MAJO, F. M. I. I prossimi scenari ambientali europei nel settore marittimo e problematiche giuridiche nell’attuazione delle future normative. *Rivista del Diritto della Navigazione*, v. 2022, p. 217–258, 2022.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA (EMAP). Ciclo de inventários de emissões de gases de efeito estufa do Porto do Itaqui – 2021. São Luís: EMAP, 2022. Disponível em: [https://www.portodoitaqui.com/\\_files/arquivos/Ciclo-2021.pdf](https://www.portodoitaqui.com/_files/arquivos/Ciclo-2021.pdf). Acesso em: 22 mai. 2025.



EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano decenal de expansão de energia 2032: o papel dos biocombustíveis na transição energética brasileira. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-639/NT%20Energia%20e%20Meio%20Ambiente%20-%20PDE%202032.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2025.

GOMES, D. M.; NETO, R. C.; BAPTISTA, P.; RAMOS, C. P.; CORREIA, C. B.; ROCHA, R. A review of advanced techniques in hydrotreated vegetable oils production and life cycle analysis. *Biomass and Bioenergy*, v. 170, p. 106476, 2025. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.106476.

INICIATIVA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS PORTOS (IRENA). Innovation outlook: ocean energy technologies. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Innovation-Outlook-Ocean-Energy-Technologies>. Acesso em: 22 mai. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 15 mai. 2025.

INVESTING.COM. Carbon emissions futures. 2025. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>. Acesso em: 22 mai. 2025.

KIM, S.; JUNG, P.-G.; LIM, Y.-I.; KIM, Y.; YANG, Y.; PARK, S. T. Economic and environmental analyses of biodiesel production processes from unused low-grade oil. *BioEnergy Research*, v. 18, n. 1, p. 9, 2024. DOI: 10.1007/s12155-024-10805-9.

LEE, H.; KIM, T.; PARK, J.; et al. Comparative life cycle assessments and economic analyses of alternative marine fuels: insights for practical strategies. *Sustainability*, v. 16, n. 5, p. 2114, 2024. DOI: 10.3390/su16052114.

MENEZES, N. A.; et al. Obtaining bioLPG via the HVO route in Brazil: a prospect study based on life cycle assessment approach. *Sustainability*, v. 14, n. 23, p. 15734, 2022. DOI: 10.3390/su142315734.

ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL (IMO). Reducing greenhouse gas emissions from ships. 2023. Disponível em: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>. Acesso em: 22 mai. 2025.

PEREDA, P. C.; et al. Carbon tax in the shipping sector: Assessing economic and environmental impacts. *Energy Policy*, v. 190, 2025. DOI: 10.1016/j.enpol.2025.114627.

PIPICELLI, M.; et al. Alcohol fuels in compression ignition engines. In: DI BLASIO, G.; et al. (org.). *Application of clean fuels in combustion engines*. Singapore: Springer Nature, 2022. p. 9–31. DOI: 10.1007/978-981-16-8751-8\_2.

SHUKLA, P.; et al. Introduction to renewable fuels for sustainable mobility. In: SHUKLA, P.; et al. (org.). *Renewable fuels for sustainable mobility*. Singapore: Springer, 2023. cap. 1. DOI: 10.1007/978-981-99-1392-3\_1.

SOLAKIVI, T.; PAIMANDER, A.; OJALA, L. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 113, 2022. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103500.



SZETO, W.; LEUNG, D. Y. C. Is hydrotreated vegetable oil a superior substitute for fossil diesel? A comprehensive review on physicochemical properties, engine performance and emissions. Fuel, v. 327, p. 125065, 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125065.

