



**DESCARBONIZAÇÃO DE OPERAÇÕES PORTUÁRIAS COM HVO: ARCABOUÇO
NORMATIVO, MODELAGEM ECONÔMICA E ESTUDOS DE CASO NO PORTO DO
ITAQUI**

**DECARBONIZATION OF PORT OPERATIONS WITH HVO: REGULATORY
FRAMEWORK, ECONOMIC MODELING, AND CASE STUDIES AT THE PORT OF
ITAQUI**

**DESCARBONIZACIÓN DE LAS OPERACIONES PORTUARIAS CON HVO: MARCO
REGULATORIO, MODELIZACIÓN ECONÓMICA Y ESTUDIOS DE CASO EN EL
PUERTO DE ITAQUI**



10.56238/2ndCongressSevenMultidisciplinaryStudies-076

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 Itaqui, estimando custos e emissões de CO₂ 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 Itaqui, 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. HVO. Políticas Climáticas. Modelagem Econômica. Portos Brasileiros.

ABSTRACT

The decarbonization of port operations has gained centrality in national and international climate policies, especially given the high dependence on fossil diesel in waterborne and land transport. This article evaluates scenarios for replacing diesel with Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) at the Port of Itaquí, estimating costs and CO₂ emissions in different fuel use combinations and carbon pricing. Based on emission factors and economic parameters obtained from the literature and an official inventory, a computational tool was developed that operationalizes a model for calculating emissions and net costs, also considering revenues associated with carbon credits. The tool was applied to five scenarios for transport vehicles and backhoe loaders at the Port of Itaquí, comparing the maintenance of diesel with partial and total replacements with HVO in horizons of 2025 and 2050. The results indicate significant emission reductions in the scenarios with HVO and suggest that, in a context of greater carbon valuation, HVO may become more economically attractive than fossil diesel. It is concluded that the model and associated tool can support the strategic planning of the port energy transition by integrating economic and environmental variables in scenario analyses.

Keywords: Decarbonization. HVO. Climate Policies. Economic Modeling. Brazilian Ports.

RESUMEN

La descarbonización de las operaciones portuarias ha cobrado gran importancia en las políticas climáticas nacionales e internacionales, especialmente dada la alta dependencia del diésel fóssil en el transporte marítimo y terrestre. Este artículo evalúa escenarios para la sustitución del diésel por aceite vegetal hidrotratado (HVO) en el Puerto de Itaquí, estimando los costos y las emisiones de CO₂ en diferentes combinaciones de uso de combustible y precios del carbono. Con base en factores de emisión y parámetros económicos obtenidos de la literatura y un inventario oficial, se desarrolló una herramienta computacional que operacionaliza un modelo para calcular las emisiones y los costos netos, considerando también los ingresos asociados a los créditos de carbono. La herramienta se aplicó a cinco escenarios para vehículos de transporte y retroexcavadoras en el Puerto de Itaquí, comparando el mantenimiento del diésel con sustituciones parciales y totales por HVO en 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 valoración del carbono, el HVO podría resultar más atractivo económicamente que el diésel fóssil. Se concluye que el modelo y la herramienta asociada pueden respaldar la planificación estratégica de la transición energética portuaria mediante la integración de variables económicas y ambientales en los análisis de escenarios.

Palabras clave: Descarbonización. HVO. Políticas Climáticas. Modelización Económica. Puertos Brasileños.



1 INTRODUÇÃO

Os portos marítimos desempenham papel central nas cadeias globais de suprimentos, articulando fluxos de mercadorias entre modos aquaviário, rodoviário e ferroviário, o que os posiciona como fontes relevantes de emissões de GEE e poluentes atmosféricos (Pinto, Oliveira e Mendes, 2018; Di Majo, 2022). A dependência de combustíveis fósseis, notadamente óleo diesel, em operações de navios auxiliares, equipamentos portuários e frotas terrestres contribui para impactos climáticos e sanitários em áreas costeiras e urbanas, desafiando a sustentabilidade do setor diante das metas de neutralidade de carbono estabelecidas para meados do século (IEA, 2021; IMO, 2023).

No Brasil, esse desafio se insere em um arcabouço normativo complexo que articula compromissos internacionais do Acordo de Paris com políticas setoriais nacionais, incluindo a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e o recente Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) (BRASIL, 2009; BRASIL, 2017; BRASIL, 2024). Paralelamente, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) tem coordenado diagnósticos e diretrizes para descarbonização de portos, enfatizando inventários de emissões, combustíveis alternativos e infraestrutura para hidrogênio verde (ANTAQ, 2023; ANTAQ, 2024).

Entre as alternativas ao diesel, o óleo vegetal hidrotratado (HVO) emerge com atributos particularmente adequados ao contexto portuário: reduções significativas de emissões de CO₂ no ciclo de vida, baixa emissão de poluentes locais e compatibilidade com motores e infraestrutura existentes (Arvidsson et al., 2011; Szeto e Leung, 2022). Contudo, sua adoção depende de avaliações que integrem custos diretos, emissões evitadas e mecanismos econômicos de mitigação, como créditos de descarbonização (CBIOS) e mercados de carbono (Solakivi, Paimander e Ojala, 2022; Lee et al., 2024). Este artigo organiza-se em torno de quatro eixos analíticos principais, apresentados nas seções subsequentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL: DO MARCO NORMATIVO AO MODELO DE AVALIAÇÃO DO HVO

A seção 2 apresenta o arcabouço normativo brasileiro e internacional relevante para descarbonização portuária, destacando convergências entre políticas nacionais e compromissos globais.

2.1 POLÍTICAS CLIMÁTICAS NACIONAIS

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009, estabelece princípios, objetivos e instrumentos para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, incluindo planos setoriais de redução de emissões e estímulo a mercados de carbono (BRASIL, 2009). Embora não trate especificamente do setor portuário, suas diretrizes abrangem o transporte como um



todo, criando condições institucionais para internalização de custos ambientais em operações logísticas.

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), definida pela Lei nº 13.576/2017, estabelece metas compulsórias anuais de descarbonização para distribuidores de combustíveis, operacionalizadas por meio de Créditos de Descarbonização (CBIOS), que monetizam reduções certificadas de emissões (BRASIL, 2017). O sistema reforça a importância de contabilizar intensidades de carbono de combustíveis ao longo do ciclo de vida, beneficiando alternativas como o HVO.

Mais recentemente, a Lei nº 14.993/2024 institui o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV), definindo diretrizes para participação mínima de diesel de baixo carbono na matriz energética e percentuais obrigatórios de mistura com diesel fóssil (BRASIL, 2024). Produzido a partir de biomassa renovável via hidrotreatamento, o HVO enquadra-se no conceito de diesel verde, posicionando-se como alternativa viável para cumprimento das metas do programa.

2.2 DIRETRIZES SETORIAIS PARA TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS

A Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) tem estruturado diretrizes para descarbonização, com ênfase em inventários de emissões setoriais e adoção de combustíveis alternativos (ANTAQ, 2023). Estudos recentes identificam o HVO, hidrogênio verde e amônia como opções promissoras, embora apontem desafios de infraestrutura para abastecimento em portos brasileiros (ANTAQ, 2024).

Essas diretrizes articulam-se com o diagnóstico Descarbonização, Infraestrutura e Aplicações do Hidrogênio nos Portos Brasileiros, que mapeia estratégias para adequação da infraestrutura portuária às metas de neutralidade de carbono (ANTAQ, 2024). A ANTAQ também discute a criação de inventário nacional de emissões portuárias, instrumento essencial para priorização de investimentos em tecnologias limpas.

2.3 ALINHAMENTO COM COMPROMISSOS INTERNACIONAIS

As políticas nacionais convergem com metas da Organização Marítima Internacional (IMO), que prevê redução de 30% nas emissões absolutas do transporte marítimo até 2030 (base 2008) e neutralidade de carbono até 2050 (IMO, 2023). No âmbito do Acordo de Paris, o Brasil assumiu compromissos de redução de emissões que se desdobram em planos setoriais, incluindo transportes (IEA, 2021). Essa convergência reforça a relevância de instrumentos econômicos, como precificação de carbono e créditos de descarbonização, na avaliação de combustíveis alternativos para portos.



3 HVO E COMBUSTÍVEIS DE BAIXO CARBONO EM PORTOS

Esta seção apresenta as principais alternativas de combustíveis para descarbonização portuária, com ênfase nas características técnicas e ambientais do HVO.

3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO HVO

O óleo vegetal hidrotratado (HVO) resulta do processamento de óleos vegetais e gorduras animais por hidrotratamento, que remove oxigênio e produz um parafínico renovável com propriedades físico-químicas superiores ao diesel fóssil (Kalnes, Marker e Shonnard, 2007; Art Fuels Forum, 2018). Estudos de ciclo de vida reportam reduções de 60–95% nas emissões de CO₂ (well-to-wheel), dependendo da matéria-prima, rota e maturidade tecnológica (Arvidsson et al., 2011; Gomes et al., 2025).

O HVO apresenta cetano superior (70–90), ausência de enxofre e aromáticos, e excelente estabilidade térmica/oxidativa, resultando em menores emissões de NO_x, SO_x e material particulado (Szeto e Leung, 2022; Shukla et al., 2023). Sua miscibilidade com diesel permite uso em misturas ou substituição total sem adaptações em motores.

3.2 COMPARAÇÃO COM OUTRAS ALTERNATIVAS

Hidrogênio verde e amônia são promissores para propulsão marítima de longo curso, mas enfrentam desafios de infraestrutura, densidade energética e segurança em operações portuárias (ANTAQ, 2024). Biocombustíveis avançados (e.g., biodiesel de segunda geração) apresentam limitações de compatibilidade e emissões de NO_x (Pipicelli et al., 2022).

Gás natural liquefeito (GNL) reduz emissões de SO_x e particulado, mas mantém metano slip e dependência fóssil (Lee et al., 2024). Eletrificação é viável para equipamentos de curta distância, mas limitada por capacidade de baterias em operações portuárias intensivas (Bodemer, 2023).

O HVO destaca-se por "drop-in compatibility", permitindo transições graduais sem investimentos proibitivos em infraestrutura, especialmente relevante para portos brasileiros com restrições orçamentárias (ANTAQ, 2023; Solakivi, Paimander e Ojala, 2022).

3.3 DESAFIOS ECONÔMICOS E BARREIRAS À DIFUSÃO

O principal entrave à consolidação do HVO no mercado reside em sua estrutura de custos, a qual é condicionada por fatores como escala de produção, oscilações nos preços das matérias-primas e mecanismos de precificação de carbono (Solakivi, Paimander e Ojala, 2022). Análises prospectivas sugerem que, mediante a valorização do carbono na faixa de US\$ 100–300/tCO₂ e a obtenção de ganhos de escala produtiva, o HVO poderá alcançar paridade econômica com combustíveis



convencionais em horizontes temporais compreendidos entre 2030 e 2050 (Lee et al., 2024; Pereda et al., 2025).

A seção subsequente apresenta o modelo elaborado para a quantificação dessas dinâmicas econômicas, com vistas a subsidiar processos decisórios relacionados à transição energética.

4 MODELAGEM ECONÔMICA E FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Esta seção detalha o modelo quantitativo desenvolvido para avaliação integrada de emissões e custos, bem como sua implementação computacional.

4.1 ESTRUTURA CONCEITUAL DO MODELO

O modelo estima, para combinações de combustíveis e parâmetros econômicos, três indicadores principais: custo direto de abastecimento, emissões de CO₂ e custo líquido (após créditos de carbono). Baseia-se em dados de atividade (volume consumido), fatores de emissão do ciclo de vida e preços de mercado (EMAP, 2022; Arvidsson et al., 2011).

4.2 EQUAÇÕES DE CÁLCULO

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂

Custo líquido C_{liq} :

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

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).

4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O modelo foi implementado na forma de um painel interativo (dashboard) desenvolvido em Python utilizando a biblioteca Streamlit, possibilitando a inserção de parâmetros pelo usuário e a visualização instantânea dos resultados obtidos. A interface encontra-se estruturada em três módulos funcionais: (i) painel de dados de entrada; (ii) painel de parametrização econômica e ambiental; e (iii) painel de saída, compreendendo tabelas e representações gráficas.

Entre as funcionalidades disponibilizadas pela ferramenta, destacam-se: a seleção de equipamentos e volumes de consumo; a parametrização de preços e fatores de emissão; a simulação



de cenários alternativos, incluindo misturas e substituição integral de combustível; e a exportação dos resultados gerados. A adoção de arquitetura monolítica confere portabilidade à aplicação, dispensando a necessidade de infraestrutura computacional externa. A seção subsequente apresenta a aplicação do modelo ao contexto do Porto do Itaqui.

5 ESTUDOS DE CASO: PORTO DO ITAQUI

O Porto do Itaqui, situado no município de São Luís (MA) e administrado pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP), constitui um porto público de relevância estratégica no âmbito do Corredor de Exportação Centro-Norte brasileiro, com especialização no escoamento de grãos (soja e milho), combustíveis, celulose e granéis minerais. A infraestrutura portuária compreende nove berços operacionais com profundidades variando entre 12 e 19 metros, o que viabiliza a atracação de embarcações de grande porte. Entre os terminais especializados, destacam-se o da Vale, apto a receber navios do tipo Valemax com capacidade de até 400 mil toneladas, e o Terminal de Granéis do Maranhão (Tegram), dotado de capacidade estática de armazenagem de 500 mil toneladas.

O porto dispõe de conectividade multimodal integrada às ferrovias Norte-Sul, Carajás e Transnordestina, o que o consolida como hub nacional de distribuição de combustíveis e principal exportador de grãos entre os portos públicos da região. No âmbito das operações terrestres, a infraestrutura conta com veículos de transporte interno e retroescavadeiras, cuja frota movida a diesel constitui o objeto central deste estudo de viabilidade de substituição por HVO, em consonância com as diretrizes de descarbonização portuária estabelecidas pela ANTAQ. O Porto do Itaqui foi selecionado como estudo de caso em razão da disponibilidade de inventário oficial de emissões e por representar um porto de porte médio com expressiva inserção nas cadeias logísticas de grãos e combustíveis (EMAP, 2022).

5.1 DADOS EMPÍRICOS E PARÂMETROS

Para fins de modelagem, adota-se como referência o consumo registrado no ano de 2021, no qual a frota terrestre do porto, composta por veículos de transporte interno e retroescavadeiras, totalizou um consumo de 17.158,30 litros de diesel. O fator de emissão médio adotado foi de 3,20 kgCO₂/litro, valor obtido a partir do referido inventário e de cálculos estequiométricos para determinação da média representativa (CETESB, 2023). A seleção desse conjunto de equipamentos justifica-se pela sua representatividade no conjunto das emissões diretas associadas às operações terrestres do porto. Assim, os parâmetros adotados para o desenvolvimento do estudo estão elencados na tabela 1.



Tabela 1. Parâmetros adotados para os cenários

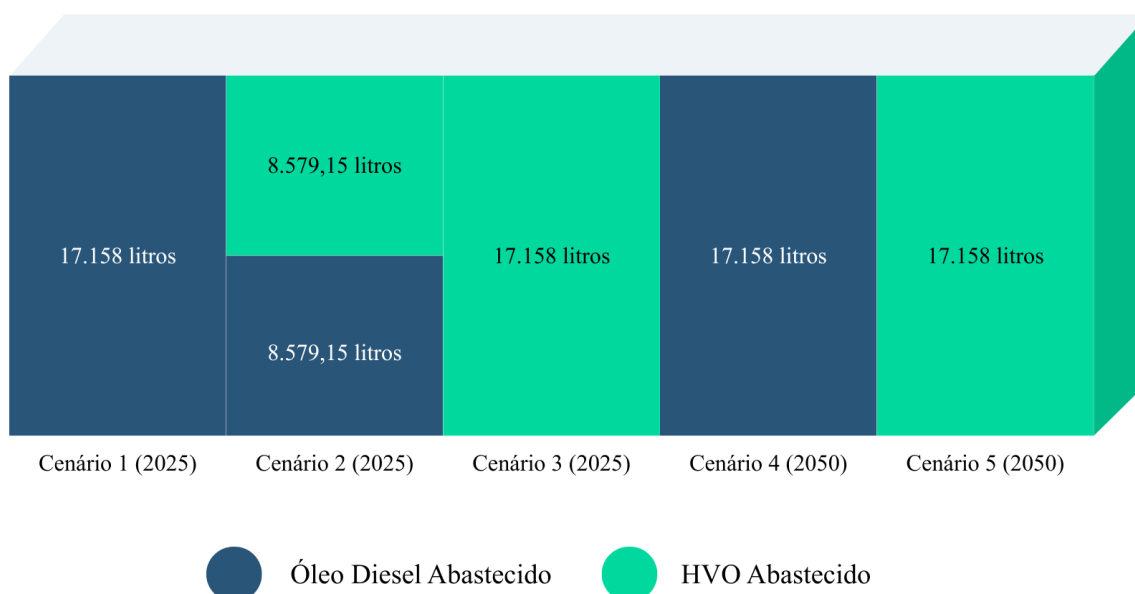
Variáveis	2025	2050
Custo do Diesel (USD/l)	0,5	0,5
Custo do HVO (USD/l)	1,75	≈ 1
Valor do crédito de carbono (USD/ton)	70,65	250 (Lee et al., 2024)
Redução nas emissões de CO ₂ do HVO em relação ao Diesel fóssil	85%	95%

Fonte: adaptado dos autores

5.2 CENÁRIOS ANALISADOS

A fim de responder às perguntas norteadoras do estudo, foram definidos cinco cenários para comparação entre o diesel fóssil e o HVO, com vistas a identificar as condições sob as quais o HVO se torna econômica e ambientalmente competitivo. Os cenários contemplam tanto a substituição total do diesel por HVO com base nos preços praticados em 2025 e em estimativas projetadas para 2050, quanto um cenário de mistura com proporção de 50% de HVO, considerando os preços de 2025. Cabe destacar que os anos indicados correspondem às referências de preços adotadas nos cálculos. Os cenários analisados são os seguintes: (i) Cenário 1: uso integral de diesel, com preços de 2025; (ii) Cenário 2: substituição parcial, com proporção de 50% de diesel e 50% de HVO, com preços de 2025; (iii) Cenário 3: substituição total do diesel por HVO, com preços de 2025; (iv) Cenário 4: uso integral de diesel, com preços projetados para 2050; (v) Cenário 5: substituição total do diesel por HVO, com preços projetados para 2050. Os cenários de abastecimento estão representados graficamente na Figura 1.

Figura 1. Cenários de abastecimento



Fonte: adaptado dos autores



5.3 RESULTADOS QUANTITATIVOS

Os parâmetros descritos anteriormente foram inseridos na ferramenta computacional desenvolvida, cujos resultados obtidos encontram-se sistematizados na Tabela 2. Com base nos preços de 2025, a substituição total do diesel por HVO (Cenário 3) proporciona uma redução de 85% nas emissões de CO₂, todavia implica elevação de 158% nos custos líquidos em relação ao uso integral de diesel (Cenário 1). Em contrapartida, as projeções para 2050 indicam uma inversão dessa relação: o HVO passa a apresentar custo líquido 20% inferior ao do diesel, mantendo simultaneamente uma redução de 95% nas emissões, o que evidencia o potencial de convergência econômica e ambiental do combustível renovável em horizontes temporais de longo prazo.

Tabela 2 – Resultados dos cenários

Cenário	Diesel (L)	HVO (L)	Custo Direto (US\$)	Emissões CO ₂ (t)	Custo Líquido (US\$)
1 (Diesel 2025)	17.158	0	8.579	45,96	11.826
2 (50% 2025)	8.579	8.579	19.303	26,43	21.170
3 (HVO 2025)	0	17.158	30.027	6,89	30.514
4 (Diesel 2050)	17.158	0	8.579	45,96	22.366
5 (HVO 2050)	0	17.158	17.158	2,29	17.986

Fonte: Autores.

Os resultados confirmam que a precificação de carbono atua como variável determinante na viabilidade econômica do HVO em operações portuárias. No horizonte de 2025, com preço de US\$ 70,65/tCO₂, os custos líquidos do HVO permanecem 158% superiores aos do diesel, quando se analisa a substituição total, reflexo do preço superior do HVO em relação ao preço do diesel fóssil. Contudo, a projeção para 2050, com precificação de US\$ 250/tCO₂, inverte completamente essa hierarquia: o HVO atinge custo líquido 20% inferior ao do diesel, resultado impulsionado pela convergência de três fatores: (i) redução do preço do HVO, decorrente de ganhos de escala produtiva; (ii) aumento da eficiência ambiental, com mitigação de 95% das emissões frente aos 85% projetados para 2025; e (iii) valorização do carbono, que monetiza as 43,67 toneladas de CO₂ evitadas em US\$ 10.917 de receitas provenientes de créditos de carbono (Lee et al., 2024; Pereda et al., 2025).

Essa dinâmica se alinha às trajetórias regulatórias nacionais e internacionais em curso. No plano doméstico, o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV), instituído pela Lei 14.993/2024, e o RenovaBio estabelecem metas compulsórias de descarbonização favoráveis ao diesel verde, ao passo que a ANTAQ prioriza combustíveis do tipo drop-in, como o HVO, em suas diretrizes para o setor portuário (ANTAQ, 2024). No plano internacional, a Organização Marítima Internacional (IMO) projeta preços globais de carbono entre US\$ 150 e US\$ 350/tCO₂ até 2050 para o cumprimento da meta de emissões líquidas zero (IMO, 2023).

Para o Porto do Itaquí, recomenda-se a adoção de uma estratégia de substituição gradual por meio do Cenário 2, com proporção de 50% de HVO, configurando uma opção de baixo arrependimento. Essa abordagem apresenta quatro vantagens complementares: (i) permite testar a



compatibilidade do combustível com a frota existente sem comprometer a continuidade operacional;

(ii) gera dados empíricos sobre emissões evitadas, passíveis de certificação como CBIOS; (iii) contribui para a construção de demanda enquanto a infraestrutura nacional de abastecimento de HVO avança, a exemplo das iniciativas pioneiras nos portos de Açu e Santos; e (iv) posiciona o porto como pioneiro, antecipando potenciais incentivos regulatórios e ganhos reputacionais no âmbito das agendas ESG.

A sensibilidade dos resultados ao preço do carbono reforça o papel central das políticas públicas de precificação na aceleração da transição energética, com potencial de transformar o HVO de uma alternativa de nicho ambiental em solução economicamente dominante em horizontes de médio prazo (Solakivi, Paimander e Ojala, 2022).

7 CONCLUSÕES

A descarbonização das operações portuárias brasileiras não constitui mais uma agenda prospectiva, mas uma exigência imediata de competitividade e conformidade regulatória, consolidada pelo Programa Nacional de Descarbonização de Portos. Nesse cenário, o HVO emerge como a principal solução de transição no curto e médio prazo, combinando elevada redução de emissões, podendo ser de 85% a 95% ao longo do ciclo de vida, com viabilidade operacional imediata, decorrente de sua natureza drop-in. À medida que os mecanismos de precificação de carbono avançam, sua adoção tende a deixar de configurar uma escolha de natureza ambiental para se tornar uma decisão economicamente racional e, progressivamente, inevitável.

O modelo desenvolvido demonstra, de forma objetiva, que essa transição já possui fundamento econômico mensurável, ao identificar um ponto de equilíbrio em torno de US\$ 120/tCO₂. Mais do que uma ferramenta analítica, o modelo estrutura um caminho claro de implementação. Para o Porto do Itaquí e instalações com características similares, a adoção deve ocorrer de forma progressiva e orientada por evidências empíricas: iniciando pelo monitoramento sistemático de emissões nos Escopos 1 a 3, avançando para testes operacionais com proporção de 50% de HVO, capazes de gerar reduções imediatas e certificáveis e culminando na substituição total do diesel até 2035, sustentada por articulação institucional e pelo desenvolvimento da infraestrutura de abastecimento.

Diante desse conjunto de evidências, conclui-se que a adoção do HVO não apenas reduz emissões, mas redefine o posicionamento estratégico dos portos brasileiros no comércio internacional, ampliando sua atratividade logística e mitigando riscos regulatórios futuros em um ambiente de crescente rigor climático. Assim, a implementação coordenada dessa agenda não é apenas recomendável, mas decisiva para assegurar a competitividade do setor portuário brasileiro na economia de baixo carbono. Como desdobramento natural deste estudo, a ampliação do modelo para outros setores, aliada à incorporação de análises probabilísticas e à integração com mercados de carbono,



tende a fortalecer sua aplicabilidade como instrumento de apoio à formulação de políticas públicas e à tomada de decisão estratégica.

AGRADECIMENTO

Os pesquisadores agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.



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. 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. 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. 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. 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. Acesso em: 22 mai. 2025.



EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano decenal de expansão de energia 2032: 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.