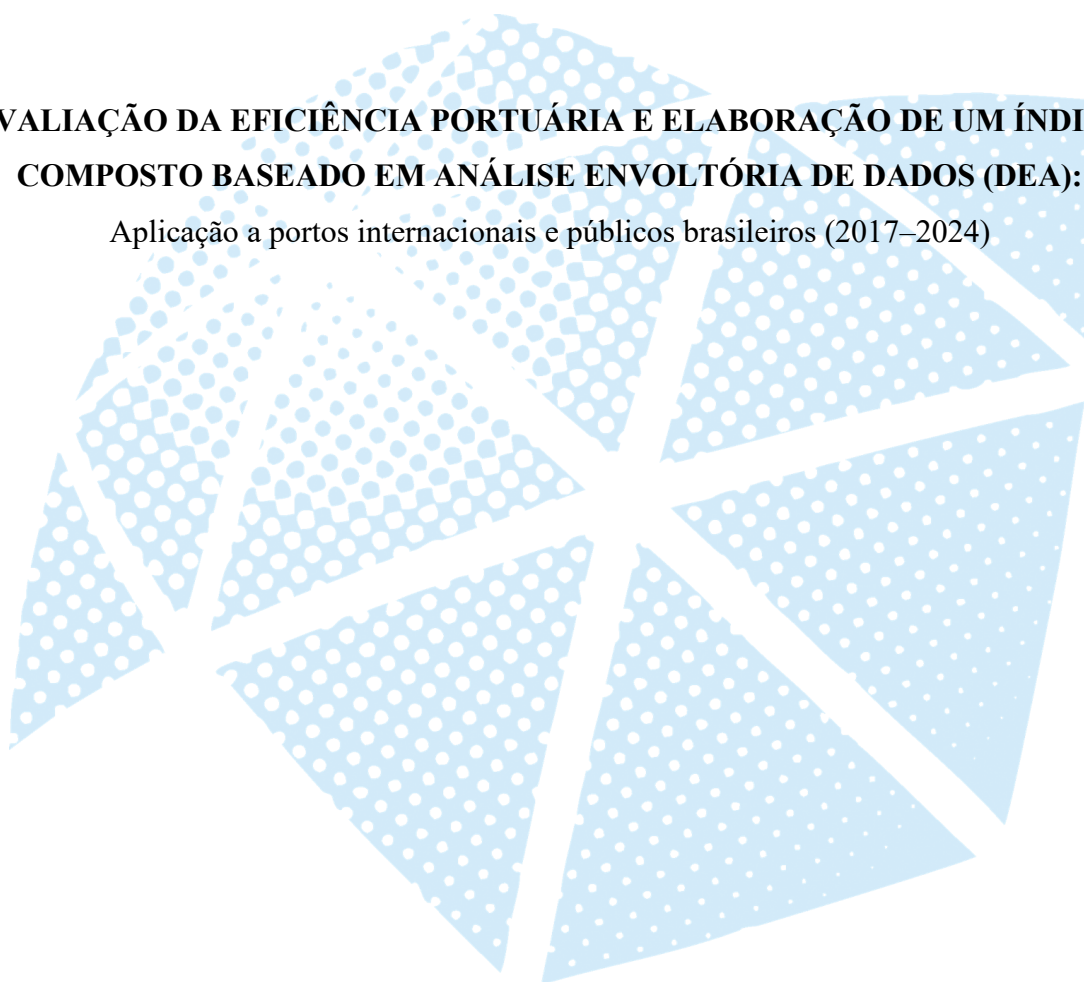


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Ciências e Letras – FCLAR - Campus Araraquara-SP

MÁRCIO ALEXANDRE RIDÃO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PORTUÁRIA E ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE
COMPOSTO BASEADO EM ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA):**
Aplicação a portos internacionais e públicos brasileiros (2017–2024)



Araraquara-SP

2026

MÁRCIO ALEXANDRE RIDÃO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PORTUÁRIA E ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE
COMPOSTO BASEADO EM ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA):**

Aplicação a portos internacionais e públicos brasileiros (2017–2024)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, para obtenção do Título de Doutor em Economia

Área de Concentração: Teoria Econômica e Métodos Quantitativos

Orientadora: Profa. Dra. Ana Elisa Périco

Araraquara-SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

R542a

Ridão, Márcio Alexandre

Avaliação da eficiência portuária e elaboração de um índice composto baseado em análise envoltória de dados (DEA) : aplicação a portos internacionais e públicos brasileiros (2017–2024) / Márcio Alexandre Ridão. -- Araraquara, 2026

202 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Araraquara

Orientador: Ana Elisa Périco

1. Economia. 2. Sustentabilidade. 3. Indicadores. 4. Análise de envoltória de dados. 5. Eficiência. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa apresenta potencial contribuição científica, técnica e social ao propor uma abordagem integrada para avaliação da sustentabilidade portuária, considerando simultaneamente aspectos econômicos, ambientais e sociais por meio da combinação da Análise Envoltória de Dados (DEA) e da metodologia Benefit-of-the-Doubt (BoD). Os resultados obtidos podem auxiliar gestores portuários e formuladores de políticas públicas na identificação de oportunidades de melhoria, no acompanhamento do desempenho das unidades portuárias e na definição de estratégias voltadas ao desenvolvimento sustentável do setor. Além disso, a comparação entre portos internacionais e públicos brasileiros possibilita a identificação de referências e práticas que podem contribuir para o aprimoramento da gestão portuária nacional. Do ponto de vista científico, o estudo amplia as discussões sobre avaliação da sustentabilidade em portos e oferece uma metodologia passível de aplicação em diferentes contextos organizacionais. Dessa forma, espera-se que os resultados contribuam para o avanço do conhecimento na área e para o desenvolvimento de instrumentos capazes de apoiar decisões mais alinhadas aos desafios econômicos, ambientais e sociais contemporâneos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research presents potential scientific, technical, and social contributions by proposing an integrated approach to port sustainability assessment that simultaneously considers economic, environmental, and social dimensions through the combination of Data Envelopment Analysis (DEA) and the Benefit-of-the-Doubt (BoD) methodology. The results obtained may assist port managers and public policymakers in identifying opportunities for improvement, monitoring the performance of port units, and defining strategies aimed at the sustainable development of the sector. Furthermore, the comparison between international ports and Brazilian public ports makes it possible to identify references and practices that may contribute to the improvement of national port management. From a scientific perspective, this study broadens the discussion on sustainability assessment in ports and offers a methodology that can be applied in different organizational contexts. Therefore, the findings are expected to contribute to the advancement of knowledge in this field and to the development of instruments capable of supporting decision-making processes that are better aligned with contemporary economic, environmental, and social challenges.

MÁRCIO ALEXANDRE RIDÃO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA PORTUÁRIA E ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE
COMPOSTO BASEADO EM ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA):**

Aplicação a portos internacionais e públicos brasileiros (2017–2024)

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras
Programa de pós-graduação em Economia, Campus Araraquara-SP, para obtenção do título de
Doutor em Economia

Área de Concentração: Teoria Econômica e Métodos Quantitativos

Data da defesa: 15/05/2026

Banca Examinadora:

Profa. Dra. ANA ELISA PÉRICO - Orientadora

UNESP - Faculdade de Ciências e Letras - Campus Araraquara-SP

Profa. Dra. ÉRIKA CAPELATO

UNESP - Faculdade de Ciências e Letras - Campus Araraquara-SP

Profa. Dra. FERNANDA MELLO SANT'ANNA

UNESP - Faculdade de Ciências Humanas e Sociais - Campus de Franca-SP

Profa. Dra. NAJA BRANDÃO SANTANA

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba - SP

Dedico este trabalho a Deus,
à minha esposa e aos meus filhos,
por serem a base e o sentido desta jornada.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, ao Deus Eterno, por conceder-me luz, sabedoria e força ao longo de toda a trajetória de desenvolvimento deste trabalho, sustentando-me nos momentos de dificuldade e conduzindo-me até a sua conclusão.

À professora Dra. Ana Elisa Périco, minha orientadora, expresso minha profunda gratidão pelas incontáveis contribuições, pelo apoio constante, pela dedicação e pela sabedoria compartilhada em todas as etapas desta pesquisa. Sua orientação foi fundamental para o amadurecimento acadêmico e para a concretização deste estudo.

À minha esposa, Taiane, e aos meus filhos, Jordana e Otávio, agradeço pelo amor incondicional, pela paciência e pela compreensão nos momentos de ausência, sendo fonte permanente de incentivo, equilíbrio e inspiração.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Levantai, ó portas, as vossas cabeças;
levantai-vos, ó portais eternos,
para que entre o Rei da Glória.”
(Salmos 24:7)

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho relativo de portos internacionais e públicos brasileiros sob a ótica da sustentabilidade, por meio da aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), considerando variáveis associadas às dimensões econômica, ambiental e social no período de 2017 a 2024. Adicionalmente, propõe-se a construção de um indicador composto baseado na abordagem Benefit-of-the-Doubt (BoD), capaz de integrar essas variáveis em uma métrica sintética de avaliação. Parte-se do entendimento de que a análise do desempenho portuário ainda apresenta limitações relevantes na literatura, especialmente no que se refere à integração dessas dimensões, frequentemente tratadas de forma dissociada e com diferentes níveis de mensuração e disponibilidade de dados. Nesse contexto, propõe-se uma abordagem capaz de avaliá-las de forma conjunta, considerando as especificidades operacionais das unidades analisadas. Do ponto de vista metodológico, utiliza-se o DEA com retornos variáveis de escala para mensuração da eficiência técnica, permitindo a análise simultânea de múltiplos insumos e produtos, combinado à abordagem BoD para a construção do indicador composto, o que possibilita a definição endógena dos pesos e a integração de diferentes indicadores em uma mesma estrutura analítica. De modo complementar, são empregadas janelas temporais para captar o comportamento dos portos ao longo do período analisado, bem como a aplicação de metafronteira, permitindo a obtenção de um ranking global. Os resultados indicam diferenças relevantes entre os portos analisados e evidenciam a existência de uma dissociação entre eficiência técnica e desempenho no indicador composto de sustentabilidade portuária, construído com base na abordagem DEA–Benefit-of-the-Doubt (BoD). Observa-se que portos com elevada eficiência técnica não necessariamente ocupam as primeiras posições nesse indicador, enquanto unidades com desempenho mais equilibrado tendem a apresentar melhor posicionamento. Esse resultado indica que desempenhos concentrados em uma única dimensão não garantem melhor desempenho em uma avaliação integrada. Além disso, verifica-se relativa estabilidade ao longo do período analisado. Dessa maneira, a utilização conjunta de DEA e BoD configura-se como uma alternativa consistente para a avaliação da sustentabilidade portuária, ao permitir uma análise multidimensional do desempenho das unidades. Nesse sentido, reforça-se a importância de abordagens integradas na análise do setor portuário, uma vez que diferentes dimensões do desempenho não evoluem, necessariamente, de forma convergente.

Palavras-chave: sustentabilidade portuária; análise envoltória de dados (dea); indicador composto de sustentabilidade; eficiência técnica; benefit-of-the-doubt (bod).

ABSTRACT

This study evaluates the relative performance of international and Brazilian public ports from a sustainability perspective through the application of Data Envelopment Analysis (DEA), considering variables associated with economic, environmental, and social dimensions over the period from 2017 to 2024. Additionally, a composite sustainability indicator based on the Benefit-of-the-Doubt (BoD) approach is proposed to integrate these variables into a synthetic metric for comparative assessment. Port performance analysis still presents relevant limitations in the literature, particularly regarding the integration of economic, environmental, and social dimensions, which are often examined separately and with different levels of measurement and data availability. In this context, an integrated approach is proposed to evaluate these dimensions jointly while considering the operational specificities of the analyzed ports. From a methodological perspective, DEA with variable returns to scale is employed to measure technical efficiency, allowing for the simultaneous analysis of multiple inputs and outputs. This approach is combined with the BoD methodology for the construction of the composite indicator, enabling endogenous weight determination and the integration of different indicators within a unified analytical framework. In addition, window analysis is applied to capture the temporal behavior of port performance over the study period, while a meta-frontier approach is employed to obtain a global ranking of the analyzed ports. The findings reveal significant differences among the ports and indicate the existence of a divergence between technical efficiency and performance in the composite sustainability indicator. Ports exhibiting high technical efficiency do not necessarily occupy the highest positions in the sustainability ranking, whereas units with more balanced performance across the economic, environmental, and social dimensions tend to achieve better results. These findings suggest that superior performance in a single dimension does not guarantee better outcomes in an integrated sustainability assessment. Furthermore, the results indicate a relatively stable pattern of performance throughout the period analyzed. Overall, the combined use of DEA and BoD constitutes a consistent approach for evaluating port sustainability by enabling a multidimensional assessment of port performance. The findings also highlight the importance of integrated approaches to port analysis, as different dimensions of performance do not necessarily evolve in a convergent manner.

Keywords: port sustainability; data envelopment analysis (dea); composite sustainability indicator; technical efficiency; benefit-of-the-doubt (bod).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Investimento público em infraestrutura rodoviária 2010/2022 (bilhões R\$).....	24
Figura 2. Investimento privado em infraestrutura rodoviária 2010/2021 (bilhões R\$).....	24
Figura 3. Movimentação ferroviária de contêineres em TU 2010/2021 (bilhões R\$).....	26
Figura 4. Investimento público em infraestrutura ferroviária 2010/2022 (bilhões R\$)	27
Figura 5. Movimentação de carga paga/correios nos aeroportos brasileiros 2011/2022	28
Figura 6. Investimento público em infraestrutura aeroviária – 2010/2022 (bilhões R\$)	29
Figura 7. Comparativo entre as capacidades de carregamento dos modais	31
Figura 8. Dinâmica do investimento público no setor aquaviário no Brasil – 2010/2024	33
Figura 9. Destino das exportações brasileiras - cinco primeiros países (2020 a 2024).....	37
Figura 10. Origem das importações brasileiras - cinco primeiros países (2020 a 2024).....	38
Figura 11. Composição das vendas de óleo diesel em 2023 - até agosto (em %).....	43
Figura 12. Localização geográfica dos 11 portos analisados – 2017 a 2024.	109
Figura 13. Modelo BCC	124
Figura 14. Janelas e suas amplitudes.....	165
Figura 18. Subindicadores dos portos com maiores valores para o Indicador Composto.....	175
Figura 16. Subindicadores dos portos com menores valores para o Indicador	178

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Produtos mais exportados pelo Brasil – 2019 a 2024	39
Quadro 2. Anexos da MARPOL 73/78 para a preservação do meio ambiente marinho/portuário	57
Quadro 3. Convenções para a preservação do meio ambiente marinho/portuário.....	58
Quadro 4. Vinte maiores portos do mundo em 2022	58
Quadro 5. Resumo da abordagem de estrutura de propriedade	98
Quadro 6. Resumo da abordagem operacional.....	99
Quadro 7. Resumo da abordagem econômica.....	99
Quadro 8. Resumo das abordagens ambiental e social	100
Quadro 9. Resumo dos indicadores de sustentabilidade em portos	101
Quadro 10. Resumo dos indicadores de sustentabilidade em portos – continuação	102
Quadro 11. Trabalhos analisados nas primeiras seções do Capítulo 3	106
Quadro 12. Trabalhos analisados nas seções finais do Capítulo 3.....	107
Quadro 13. Variáveis trabalhadas na revisão bibliográfica e seus autores	114
Quadro 14. Relatórios dos portos internacionais consultados	115
Quadro 15. Relatórios dos portos públicos nacionais consultados	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Total de movimentação portuária no Brasil de 2010 a 2023	32
Tabela 2. Participação das principais vias nas exportações entre 2010 e 2024 - (FOB – US\$)	34
Tabela 3. Participação das principais vias nas importações do Brasil entre 2010 e 2024	36
Tabela 4. Vendas por tipo de diesel no Brasil de 2019 a agosto de 2023	42
Tabela 5. Movimentação por tipo de instalação portuária (2022-2025).....	49
Tabela 6. Perfil de carga movimentada por tipo de instalação portuária (2022 - 2025)	50
Tabela 7. Participação dos dez primeiros portos organizados por volume movimentado em milhões de toneladas – 2022 a 2025	51
Tabela 8. Participação dos dez primeiros terminais autorizados e dos dez primeiros portos organizados por volume movimentado em milhões de toneladas de 2022 a 2025.....	52
Tabela 9. Composição das dez primeiras mercadorias mais movimentadas nos Terminais Autorizados e nos Portos Organizados – 2022 a 2025	54
Tabela 10. Tipos de navegação mais utilizados pelas instalações portuárias em milhões de toneladas – 2022 a 2025	56
Tabela 11. Comunalidades das variáveis.....	128
Tabela 12. Matriz de correlação anti-imagem	131
Tabela 13. KMO e Bartlett	132
Tabela 14. Autovalores.....	133
Tabela 15. Eficiência dos portos – 2017 a 2024.....	134
Tabela 16. Eficiência dos portos – 2017 a 2024 (continuação).....	135
Tabela 17. Eficiência dos portos – 2017 a 2024 (continuação).....	136
Tabela 18. Eficiência média dos 6 portos internacionais analisados – 2017 a 2024.....	138
Tabela 19. Eficiência média dos 5 portos públicos brasileiros analisados – 2017 a 2024	141
Tabela 20. Tamanho dos portos com base na média de movimentação	144
Tabela 21. Média de movimentação de portos considerados pequenos – 2017 a 2024	145
Tabela 22. Média de movimentação de portos considerados médios – 2017 a 2024.....	146
Tabela 23. Média de movimentação de portos considerados grandes – 2017 a 2024.....	148
Tabela 24. Média de movimentação de portos considerados grandes – 2017 a 2024 (continuação)	149
Tabela 25. Relação output/input dos portos e indicadores de eficiência.....	152
Tabela 26. Distribuição percentual dos indicadores por tercil (incluindo eficiência)	157

Tabela 27. Estatística descritiva dos dados brutos	161
Tabela 28. Estatística descritiva dos dados normalizados	163
Tabela 29. Resultado do modelo BoD das janelas	166
Tabela 30. Ranking de sustentabilidade – média do indicador composto ao longo das janelas	167
Tabela 31. Classificação de cada porto em cada janela.....	168
Tabela 32. Ranking do Indicador Composto para Meta fronteira	170
Tabela 33. Subindicadores médios dos 3 primeiros portos no ranking de sustentabilidade..	173

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	19
1.2 Justificativa	20
1.3 Estrutura proposta para o trabalho	20
 2. ESTRUTURA LOGÍSTICA E ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA PORTUÁRIO BRASILEIRO NO CONTEXTO DO COMÉRCIO EXTERIOR.....	 22
2.1 Matriz de transportes e balança comercial brasileira	22
2.2 Setor portuário brasileiro – Breve histórico	45
2.3 Portos pelo mundo.....	56
 3. EFICIÊNCIA PORTUÁRIA E SUSTENTABILIDADE EM PORTOS - ANÁLISE DA LITERATURA	 70
3.1 Eficiência em portos: Estrutura de propriedade	71
3.2 Eficiência em portos: Abordagem operacional	75
3.3 Eficiência em portos: Abordagem econômica	82
3.4 Eficiência dos portos: Abordagens ambiental e social.....	85
3.5 Sustentabilidade e portos.....	88
3.6 Indicadores de sustentabilidade em portos.....	94
 4. MÉTODO DE PESQUISA	 103
4.1 Revisão sistemática de literatura	103
4.2 Análise Envoltória de Dados (DEA): eficiência dos portos investigados.....	108
4.3 Análise Envoltória de Dados (DEA): índice composto (IC) dos portos investigados	118
4.4 Técnica de análise	119
 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	 128
5.1 Validação do modelo: teste PCA-DEA e teste KS	128
5.2 Análise de eficiência portuária	133
5.3 Construção do indicador composto de sustentabilidade portuária	158

CONSIDERAÇÕES FINAIS	182
-----------------------------------	------------

REFERÊNCIAS	186
--------------------------	------------

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos bens consumidos diariamente e uma parcela significativa da matéria-prima utilizada pelo setor industrial circulam por meio de instalações portuárias, o que torna os portos elementos centrais no funcionamento das cadeias globais de suprimentos. Essas infraestruturas logísticas desempenham papel fundamental na articulação entre produção, transporte e comércio internacional, conectando economias nacionais aos fluxos globais de mercadorias.

De acordo com o *Review of Maritime Transport* publicado pela United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD, 2022), mais de 80% do comércio mundial em volume é realizado por via marítima. Esse percentual evidencia a importância estratégica do transporte marítimo para o funcionamento da economia internacional e para o equilíbrio das balanças comerciais de inúmeros países.

No caso brasileiro, essa dependência logística também se manifesta de forma clara. Entre janeiro e dezembro de 2024, as exportações realizadas por via marítima atingiram aproximadamente US\$ 298,1 bilhões (FOB), correspondendo a cerca de 88,4% do total exportado pelo país. No mesmo período, as importações realizadas por essa via alcançaram US\$ 194,7 bilhões (FOB), o que representa aproximadamente 74,1% do total importado (BRASIL, 2026). Esses números reforçam a relevância do sistema portuário para o desempenho do comércio exterior brasileiro.

Apesar de sua importância econômica, o transporte marítimo e as atividades portuárias vêm enfrentando desafios significativos nos últimos anos. Além dos impactos provocados pela pandemia de COVID-19, o setor também sofreu efeitos decorrentes de tensões geopolíticas recentes, como o conflito entre Rússia e Ucrânia iniciado em 2022. Segundo a UNCTAD (2023), essas mudanças alteraram padrões logísticos globais, ampliando distâncias percorridas pelas mercadorias e reconfigurando rotas comerciais, especialmente nos segmentos de grãos e transporte de petróleo.

Paralelamente a esses desafios logísticos, cresce a preocupação com os impactos ambientais e sociais associados às atividades portuárias. Embora os portos sejam essenciais para o desenvolvimento econômico e para o comércio internacional, suas operações também geram externalidades relevantes. Tais impactos decorrem tanto do tráfego marítimo quanto das atividades logísticas associadas, incluindo transporte rodoviário e ferroviário, armazenamento de mercadorias, movimentação de cargas e funcionamento da infraestrutura de apoio às operações portuárias.

Nesse contexto, a discussão sobre desempenho portuário tem se ampliado nas últimas décadas. Tradicionalmente, grande parte da literatura concentrou-se na análise da eficiência operacional e econômica dessas instalações. Entretanto, o avanço das agendas ambientais globais e a crescente pressão regulatória têm impulsionado a necessidade de incorporar também aspectos ambientais e sociais à avaliação do desempenho portuário.

Do ponto de vista ambiental, os portos desempenham papel relevante no contexto da transição para uma economia de baixo carbono. As operações marítimas e logísticas estão associadas ao consumo intensivo de combustíveis fósseis, resultando na emissão de gases de efeito estufa e de outros poluentes atmosféricos. Segundo a UNCTAD (2023), as emissões de carbono provenientes do transporte marítimo internacional registraram aumento significativo nas últimas décadas, reforçando a necessidade de estratégias voltadas à descarbonização das atividades portuárias e marítimas.

Além das emissões atmosféricas, as atividades portuárias também podem provocar impactos sobre a qualidade da água, sobre o consumo de recursos naturais e sobre os ecossistemas costeiros. Roberts et al. (2023) destacam que essas operações contribuem para a poluição do ar, da água e do solo, podendo afetar tanto o meio ambiente quanto as comunidades localizadas no entorno das áreas portuárias.

Sob a perspectiva econômica, os portos operam em um ambiente altamente competitivo. A manutenção de sua posição estratégica no comércio internacional depende da capacidade de oferecer infraestrutura eficiente, serviços logísticos integrados e condições operacionais adequadas para atender às demandas do transporte marítimo. Nesse sentido, portos buscam continuamente ampliar sua competitividade por meio da modernização de equipamentos, melhoria da infraestrutura e integração com cadeias logísticas regionais e globais (PALMOWSKI; TARKOWSKI, 2016).

Além disso, as atividades portuárias exercem influência significativa sobre o desenvolvimento econômico regional. A presença de instalações portuárias costuma atrair empresas industriais, operadores logísticos e diversos serviços associados, contribuindo para a geração de emprego e renda nas regiões onde estão localizadas. Nesse sentido, os portos ocupam posição estratégica no funcionamento do comércio internacional e na dinâmica econômica de diversos territórios (NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2005; OLIVIER; SLACK, 2006).

O aspecto social das atividades portuárias também merece atenção crescente. As operações realizadas nesses ambientes envolvem atividades complexas, frequentemente associadas a riscos ocupacionais, exposição a ruídos, poluição e outras condições que podem

afetar a saúde e a segurança dos trabalhadores. Além disso, a intensa movimentação logística pode gerar impactos sobre as comunidades do entorno, como congestionamentos, poluição sonora e pressão sobre a infraestrutura urbana.

Diante desse cenário, o conceito de sustentabilidade tem ganhado espaço crescente na análise das atividades portuárias. Inspirada na abordagem do *Triple Bottom Line*, a sustentabilidade busca integrar aspectos econômicos, ambientais e sociais na avaliação do desempenho de organizações e sistemas produtivos.

Para lidar com essa complexidade, a utilização de indicadores tem se consolidado como uma ferramenta fundamental de avaliação. Indicadores de desempenho permitem transformar fenômenos complexos em métricas comparáveis, auxiliando gestores e formuladores de políticas públicas na tomada de decisão. Em termos gerais, indicadores são instrumentos desenvolvidos para monitorar e avaliar o comportamento de sistemas físicos, econômicos, ambientais ou sociais ao longo do tempo.

No campo ambiental, por exemplo, indicadores são amplamente utilizados para acompanhar alterações na qualidade do ar, da água e dos ecossistemas naturais, fornecendo informações relevantes sobre tendências e condições ambientais associadas às atividades humanas (JAKOBSEN, 2008).

No entanto, quando se trata da avaliação da sustentabilidade portuária, a literatura especializada aponta a existência de um desequilíbrio significativo na utilização desses indicadores. Revisões sistemáticas indicam que grande parte dos estudos se concentra predominantemente em aspectos ambientais específicos, enquanto outros componentes da sustentabilidade recebem menor atenção (ALAMOUSH et al., 2021).

De acordo com Alamoush et al. (2021), aproximadamente 65% dos estudos analisados em sua revisão concentram-se na análise de impactos ambientais, enquanto apenas 14% abordam aspectos econômicos e cerca de 3% exploram indicadores sociais. Esse resultado evidencia uma lacuna importante na literatura, especialmente no que diz respeito à integração equilibrada das diferentes perspectivas associadas à sustentabilidade portuária.

Essa lacuna torna-se ainda mais evidente no caso dos aspectos sociais. De Luca e Valentinuz (2024) destacam que, embora os portos gerem impactos econômicos, ambientais e sociais relevantes, a dimensão social ainda permanece relativamente pouco desenvolvida na literatura acadêmica e nas práticas de avaliação de desempenho portuário. Os autores ressaltam que ambientes portuários envolvem atividades de elevado risco ocupacional e exposição a diversos fatores de estresse físico e psicossocial, o que reforça a necessidade de incorporar indicadores voltados à saúde, segurança e bem-estar dos trabalhadores.

Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de desenvolver instrumentos capazes de avaliar de forma integrada os diferentes aspectos associados à sustentabilidade portuária. No caso específico dos portos, cuja complexidade operacional envolve a interação entre múltiplos fatores econômicos, ambientais e sociais, a avaliação baseada em indicadores isolados mostra-se limitada. Nesse sentido, a utilização de indicadores compostos apresenta-se como uma alternativa promissora, pois permite combinar diversas variáveis em uma única métrica sintética, possibilitando análises comparativas mais consistentes do desempenho relativo de diferentes sistemas portuários.

Desta forma, para além da análise do desempenho de uma amostra de portos, este estudo propõe a construção de um indicador composto de sustentabilidade portuária baseado na metodologia de Análise Envoltória de Dados (DEA), utilizando a abordagem *Benefit of the Doubt* (BoD). O indicador é aplicado a um conjunto de onze portos, sendo seis portos internacionais e cinco portos públicos brasileiros, no período de 2017 a 2024.

A principal contribuição desta pesquisa consiste na proposição de um índice composto capaz de integrar múltiplas variáveis associadas à sustentabilidade portuária, permitindo a construção de um ranking comparativo entre portos nacionais e internacionais a partir de uma abordagem quantitativa baseada em DEA.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa consiste em, a partir da aplicação da metodologia de Análise Envoltória de Dados (DEA), avaliar o desempenho relativo de 11 portos — sendo seis internacionais e cinco nacionais — sob a ótica da sustentabilidade, contemplando variáveis associadas aos aspectos econômico, ambiental e social no período de 2017 a 2024. Adicionalmente, busca-se construir um indicador composto de sustentabilidade portuária, também baseado na abordagem DEA, capaz de integrar essas diferentes variáveis em uma métrica sintética que permita mensurar comparativamente o desempenho desses portos e estabelecer um ranking robusto considerando os múltiplos aspectos da sustentabilidade.

Os objetivos complementares desse estudo são pertinentes aos seguintes aspectos:

- Identificar e analisar, a partir da literatura e das bases de dados disponíveis, variáveis relacionadas aos aspectos econômico, ambiental e social aplicáveis à avaliação da sustentabilidade portuária;
- Aplicar a metodologia de Análise Envoltória de Dados (DEA) para mensurar a eficiência relativa dos portos analisados sob a perspectiva da sustentabilidade;

- Construir um indicador composto de sustentabilidade portuária por meio da abordagem *DEA–Benefit of the Doubt (BoD)*, integrando as variáveis consideradas no modelo;
- Analisar a evolução do desempenho relativo dos portos ao longo do período de 2017 a 2024, por meio da aplicação de janelas temporais;
- Comparar o desempenho relativo dos portos analisados por meio da construção de um *ranking* de sustentabilidade e da aplicação do modelo de metafronteira.

1.2 Justificativa

Além da importância crescente que o tema relacionado às questões ambientais vem ganhando globalmente, a justificativa do presente trabalho se dá considerando as seguintes questões: (I) os portos são agentes muito importantes na movimentação de cargas e desempenham papel de destaque no comércio internacional; (II) os portos são tipicamente analisados/avaliados por meio de metodologias voltadas principalmente para as dimensões operacional e econômica; e (III) a literatura pouco discute sobre instrumentos que possam avaliar os portos do ponto de vista da sustentabilidade.

Assim, é relevante entender como as mudanças de paradigmas por parte dos países e do mercado direcionam os portos a modificarem seu comportamento e suas formas de atuação. Desta maneira, o presente trabalho pretende contribuir para ampliação do entendimento em torno do debate sobre o quão essencial é a adoção de critérios/indicadores de sustentabilidade pelos portos do Brasil e do mundo.

1.3 Estrutura proposta para o trabalho

A seção de Introdução, que corresponde ao primeiro capítulo desta tese, apresenta a contextualização e delimitação da temática investigada, discutindo a relevância das atividades portuárias no comércio internacional e os desafios associados à sustentabilidade dessas infraestruturas. Nessa seção também são apresentados os objetivos que orientam o estudo, a justificativa e a relevância científica da investigação.

O Capítulo 2 aborda as características da matriz de transportes do Brasil e sua relação com a balança comercial do país. São apresentados dados relativos aos investimentos públicos e privados realizados no setor, à evolução da movimentação de cargas e à participação relativa dos diferentes modais de transporte. Também são analisados a origem e o destino das importações e exportações brasileiras, bem como os principais produtos movimentados por via

marítima. Ademais, apresenta-se um panorama histórico do setor portuário nacional e uma breve caracterização dos principais portos do mundo.

O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica sobre eficiência portuária e sustentabilidade em portos, abordando diferentes perspectivas analíticas, incluindo a estrutura de propriedade e as abordagens operacional, econômica e ambiental/social. Também são discutidos estudos que tratam da aplicação de indicadores de sustentabilidade e de sua importância como instrumentos de avaliação do desempenho ambiental de um porto.

O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento desta pesquisa, contemplando os seguintes procedimentos: (i) revisão sistemática da literatura; (ii) aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para a mensuração da eficiência dos portos; e (iii) aplicação da abordagem *DEA–Benefit of the Doubt (BoD)* para a construção do indicador composto de sustentabilidade portuária. O capítulo também apresenta a delimitação espacial e temporal da pesquisa.

O Capítulo 5 reúne e discute os resultados obtidos, contemplando tanto a análise de eficiência quanto a construção e interpretação dos indicadores compostos dos portos investigados. Por fim, o capítulo de Considerações Finais apresenta as principais conclusões alcançadas por esta pesquisa, bem como suas limitações e sugestões para estudos futuros.

2. ESTRUTURA LOGÍSTICA E ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA PORTUÁRIO BRASILEIRO NO CONTEXTO DO COMÉRCIO EXTERIOR

2.1 Matriz de transportes e balança comercial brasileira

A matriz de transportes é um componente fundamental da economia de um país, pois viabiliza o fluxo de bens, insumos de produção e de pessoas. Promove e amplia o acesso de vários setores e agentes econômicos ao mercado, proporcionando a ligação entre estas entidades. Incentivar a sua eficiência, agilidade e alcance ajuda a construir uma base sólida para o crescimento e desenvolvimento econômico, especialmente para uma nação de dimensão continental como o Brasil. Além disso, os investimentos em infraestrutura de transporte geram renda e empregos em uma variedade de outros setores como efeito cascata.

Os modais de transporte diferem em vários aspectos, incluindo a velocidade, volume transportado, a duração da viagem, possibilidade de dano ou acidente, a conexão entre as rotas, os custos financeiros, a regularidade dos embarques e o impacto ambiental. A seguir são apresentados, no contexto brasileiro, os meios de transporte de carga mais populares: rodoviário, ferroviário, aquaviário e o aéreo.

2.1.1 Transporte rodoviário

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022), o modal rodoviário é dominante na malha de transporte brasileira, representando cerca de 64,9% de todas as cargas transportadas no país e mais de 90% do total de passageiros em 2022. A possibilidade de seu domínio surgiu no final da década de 1950, quando os rumos da política econômica favoreceram o uso das rodovias como método de unificação do território nacional, além de atrair grandes montadoras com o objetivo de gerar empregos e aumentar a renda.

Em comparação com outros modais, o modal rodoviário de cargas é o método mais adequado para o transporte de itens de maior valor agregado ou mercadorias perecíveis em distâncias curtas e médias, dada sua maior flexibilidade e capilaridade em termos de embarque, desembarque e pontos de acesso (CNT, 2022). Vale ressaltar que o modal facilita a movimentação de lotes de mercadorias de diversos tamanhos e proporciona maior disponibilidade de prazos, além de boa confiabilidade em termos de entrega e projeções de avarias (CNT, 2022).

Devido ao seu domínio, o transporte rodoviário é o que proporciona a maior receita entre os meios de transporte. De acordo com a Pesquisa Anual de Serviços do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), em 2019, o segmento de transporte

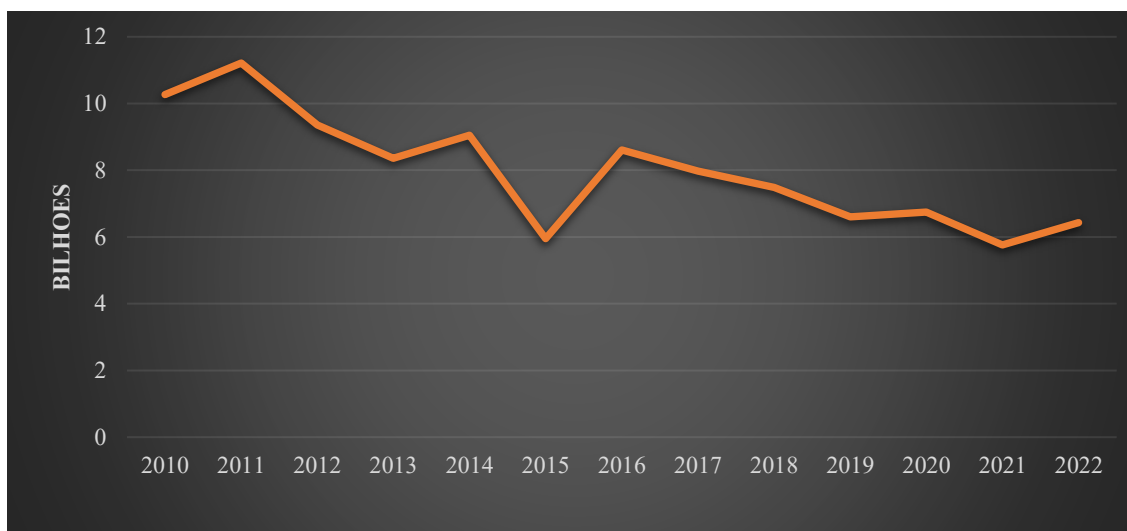
rodoviário de cargas e passageiros respondeu por 51,8% da receita operacional líquida total do setor de transportes, além de 50,9% do valor bruto da produção (VBP). Esses números demonstram a importância do modal para a economia brasileira, sendo o principal responsável por vincular as mercadorias e serviços produzidos aos consumidores (CNT, 2022).

Por outro lado, no Brasil, no que tange às questões ambientais, os modais de transporte dependem fortemente de combustíveis fósseis para funcionar e o resultado desse consumo é a liberação de gases poluentes na atmosfera. De acordo com Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2023), o setor rodoviário, especificamente os caminhões, foi o responsável por 42% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor de transportes no país. As emissões provenientes do uso de óleo diesel não aumentaram devido à presença de biodiesel em sua composição. A proporção de biodiesel misturado ao diesel de petróleo, por outro lado, oscilou ao longo de 2021, começando em 13% e caindo para 10% no final.

De acordo com a CNT (2023), os investimentos públicos federais realizados em infraestrutura de transporte diminuíram consideravelmente durante a última década. O valor caiu de R\$ 10,265 bilhões em 2010 para R\$ 6,434 bilhões reais em 2022. Esta diminuição exprime a política de transferência de ativos para o setor privado como o novo motor de investimento em transportes no Brasil. Diversas rodovias, arrendamentos portuários, aeroportos e contratos ferroviários foram renovados nesse período.

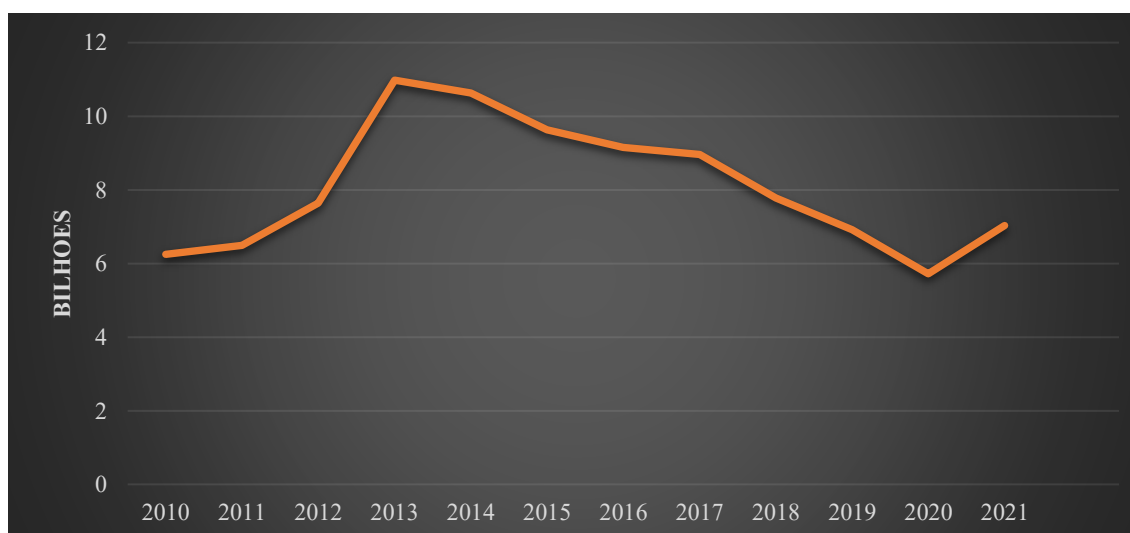
A Figura 1 apresenta evolução do investimento realizado em infraestrutura de transporte incluindo investimentos diretos da união e das estatais de 2010 a 2022. Os números apresentam a tendência de queda no valor dos investimentos, chegando a atingir o menor valor em 2021, de R\$ 5,761 bilhões.

Apesar desse cenário de diminuição de valores, é indispensável a participação do setor público no processo de investimento. O Estado é responsável por uma parte substancial do sistema rodoviário, que nem sempre é suficientemente atrativo para o setor privado. Entretanto, é razoavelmente consensual que o financiamento privado deve ser desenvolvido e ampliado para que a infraestrutura de transportes do país progrida.

Figura 1. Investimento público em infraestrutura rodoviária 2010/2022 (bilhões R\$)

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2023).

Na Figura 2 é apresentada a evolução dos investimentos privados em rodovias entre 2010 e 2021.

Figura 2. Investimento privado em infraestrutura rodoviária 2010/2021 (bilhões R\$)

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2023).

Na Figura 2, verifica-se um salto no volume de investimentos ocorrido entre 2012 e 2013, atingindo cerca de R\$ 11 bilhões. De acordo com a CNT (2023), o resultado está associado ao perfil de distribuição dos investimentos das concessões de segunda e terceira fases que ainda estavam em estágio inicial e tendiam a concentrar um montante maior dos investimentos realizados pelas concessionárias.

Após 2013, os investimentos passam por uma redução progressiva ao longo dos anos. Segundo a CNT (2023), os níveis mais baixos de investimento das concessionárias entre 2014 e 2020 são resultado de termos contratuais e preocupações cíclicas. A economia brasileira registrou taxas de crescimento negativas em 2015 e 2016 (período de recessão econômica), o que frustrou os fluxos de caixa previstos no início das concessões. A situação se agravou, em 2020, com o início da pandemia de Covid-19.

2.1.2 Transporte ferroviário

Segundo Bustamante (1999), o modal ferroviário distingue-se pela sua capacidade de transportar enormes volumes com eficiência de combustível, especialmente em longas distâncias. Em comparação ao sistema rodoviário, o sistema de trânsito ferroviário de cargas é mais seguro, com menores índices de acidentes e roubos de cargas.

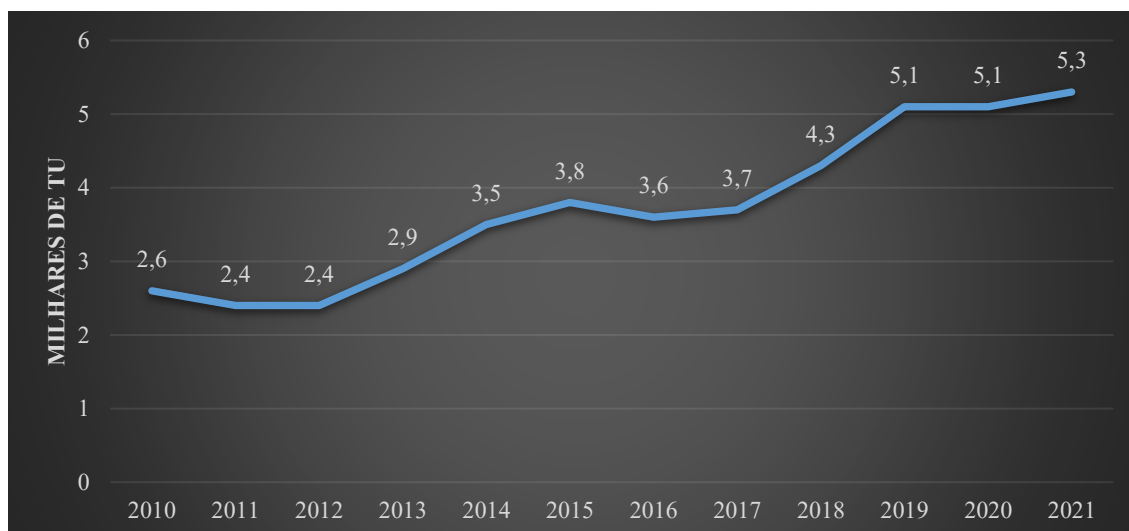
A Empresa de Planejamento e Logística (EPL, 2022), por meio do Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL), realiza o acompanhamento sistemático da evolução dos dados do setor de infraestrutura de transportes e logística no Brasil. Segundo a EPL (2022), o modelo de operação ferroviária no Brasil é baseado em concessões verticais. Neste modelo, as ferrovias são operadas por empresas que administram tanto as ferrovias, quanto o serviço de transporte que utiliza a rota. O modelo vertical tem como característica o fato de a operação e o controle da infraestrutura ferroviária pertencerem a apenas uma empresa. Isto significa que a construção, a instalação, a recuperação e a manutenção desses ativos, bem como a prestação de serviços de transporte, são de responsabilidade das concessionárias.

De acordo com a CNT (2022), em março de 2022, o modal ferroviário representava 14,95% da matriz nacional de transporte de cargas e contava com 30.653 quilômetros de ferrovias.

O Boletim Unificado da CNT (2023), publicado em outubro 2023, demonstra que o volume transportado pelas ferrovias nacionais atingiu 500,8 milhões de toneladas úteis (TU) e 371 bilhões de toneladas por quilômetro útil (TKU). Segundo o ONTL (2021), tonelada útil corresponde ao total de carga movimentada na malha; e tonelada quilômetro-útil (TKU) é determinada pela multiplicação da tonelada útil transportada pela distância percorrida. Essas quantidades refletem uma queda de 1,2% na TU e uma queda de 0,1% no TKU em relação ao ano de 2021.

Vale destacar que o uso de contêineres transportados por ferrovias se intensificou nos últimos anos e uma ampla gama de produtos pode ser transportada por meio da containerização da carga. A evolução desta intensificação é apresentada na Figura 3.

Figura 3. Movimentação ferroviária de contêineres em TU 2010/2021 (bilhões R\$)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados do ONTL e EPL (2022).

Segundo a CNT (2022), a utilização desse tipo de operação aumentou 155% na última década. Em termos de TKU, a quantidade de contêineres movimentados em 2021 foi de 4,18 bilhões, e em 2011 este valor correspondia a 1,64 bilhão (CNT, 2022).

Os contêineres são facilmente padronizáveis, sendo os contêineres de 20 e 40 pés os mais utilizados e comuns no mercado. O contêiner de 20 pés tem um comprimento interno de aproximadamente 5,9 metros, enquanto no de 40 pés chega a 12 metros.

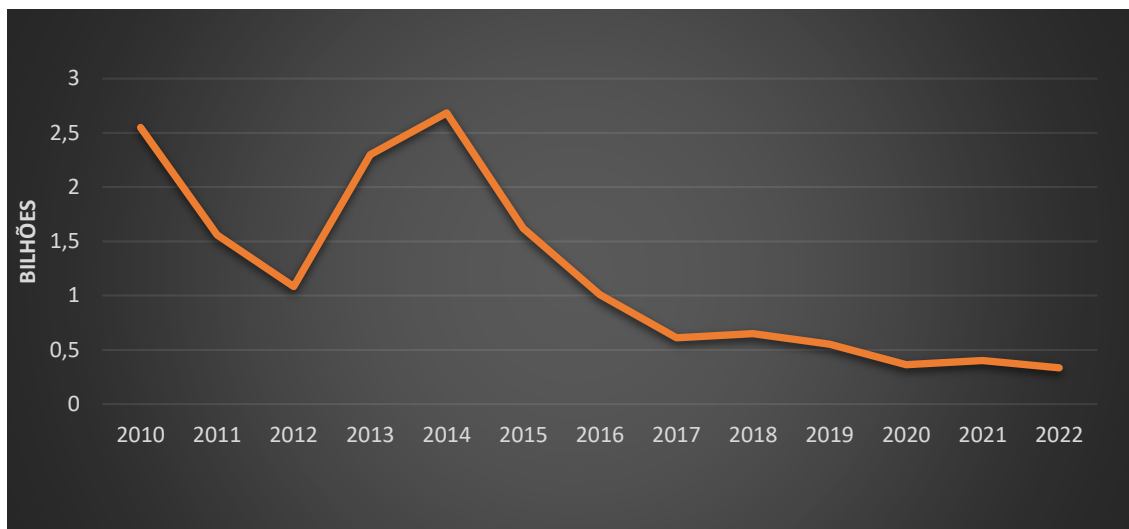
Pode-se verificar que o valor mais do que duplicou na última década, passando de 2,6 milhões de toneladas em 2010 para 5,3 milhões em 2021.

Com relação ao investimento na infraestrutura ferroviária, este é caracterizado por ciclos, o que significa que há elevados aportes financeiros em algumas etapas para a construção de determinados trechos. No modelo vertical, utilizado no Brasil, os investimentos são em grande parte responsabilidade das concessionárias e estão previstos em contratos. O setor público só realiza maiores investimentos quando está construindo uma nova ferrovia (ONTL e EPL, 2022).

A Figura 4 apresenta os investimentos realizados pelo governo entre os anos de 2010 e 2022, em bilhões de reais.

Cabe salientar que se ao final de uma obra não surgirem novas etapas, o volume de investimento é reduzido significativamente. Isto ajuda a explicar os altos e baixos dos gastos públicos em infraestrutura de 2010 a 2021, apresentados na Figura 4.

Figura 4. Investimento público em infraestrutura ferroviária 2010/2022 (bilhões R\$)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2023).

Contudo, ainda que o modelo adotado no Brasil seja o vertical, foi instituído o regime de tráfego mútuo para que outros operadores possam trafegar pelas vias concedidas verticalmente. O tráfego mútuo é definido pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2022), como uma operação em que o requerente utiliza a via permanente, o licenciamento de trem e os recursos operacionais do cedente para trafegar de um local do Subsistema Ferroviário Federal (SFF) para outro, mediante pagamento. Ou seja, que se dá em decorrência de contrato firmado entre concessionárias para permitir o transporte ferroviário que ultrapasse os limites geográficos de uma malha, de maneira a complementar uma prestação de serviço público de transporte ferroviário, compartilhando recursos operacionais (ONTL e EPL, 2022).

2.1.3 Transporte aeroviário

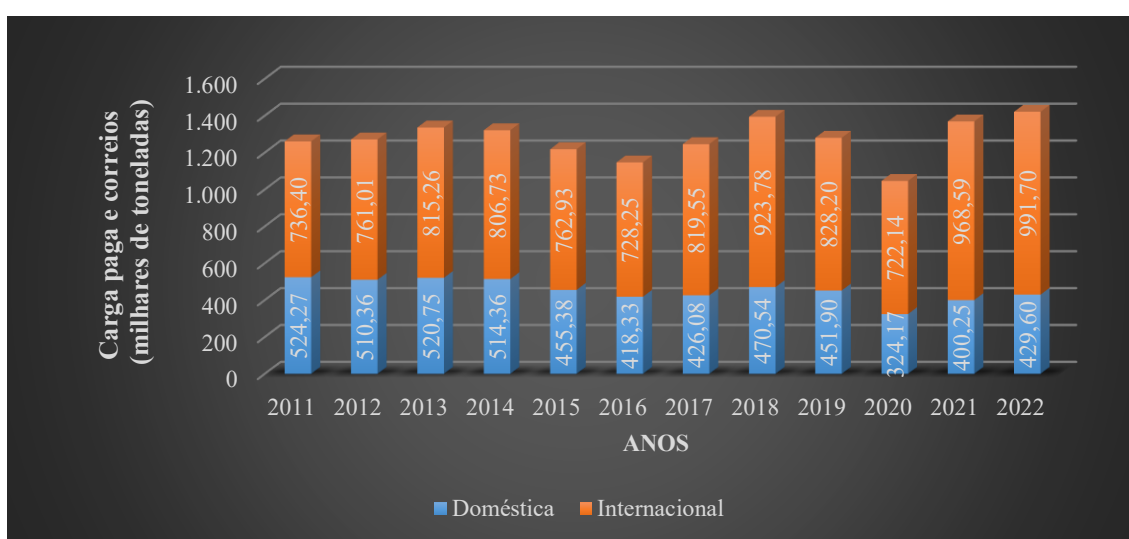
Segundo a CNT (2023), a partir da década de 2000, houve um crescimento da demanda pelo transporte aeroviário devido à modernização e aos investimentos contínuos no segmento, bem como aos benefícios das viagens aéreas.

As vantagens do transporte aéreo de carga incluem velocidade, segurança e menor chance de danos às mercadorias, principalmente em deslocamentos em grandes distâncias. Porém, o alto custo por tonelada e as restrições de peso e tamanho dos itens transportados, por avião, limitam sua utilização. Essas especificações estabelecem os principais perfis de carga que são transportados por essa modalidade, o que por sua vez afeta o *layout* e o mobiliário dos terminais. Como resultado, mercadorias perecíveis, medicamentos, artigos de luxo (incluindo

ouro e obras de arte) e componentes elétricos e industriais são os tipos de carga mais comuns transportados. Nesse contexto, conforme dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (BRASIL, 2026), no período de janeiro a dezembro de 2025, as exportações brasileiras realizadas pelo modal aeroviário corresponderam a 5,8% do valor total exportado. Em contrapartida, no mesmo intervalo, às importações por via aérea representaram 21% do total das importações brasileiras.

A Figura 5 apresenta a movimentação de carga nos aeroportos brasileiros entre 2011 e 2022.

Figura 5. Movimentação de carga paga/correios nos aeroportos brasileiros 2011/2022



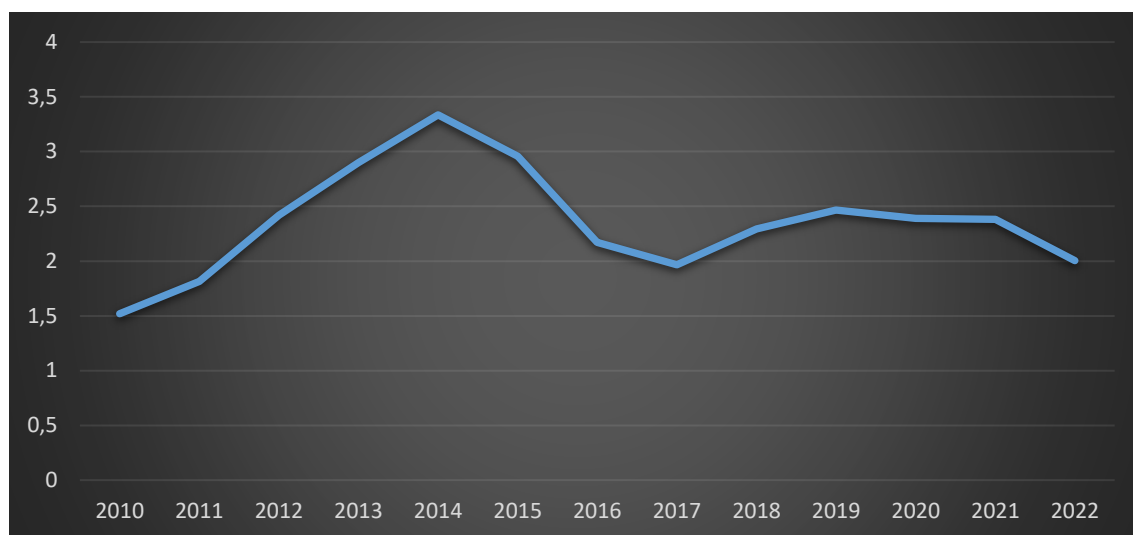
Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2022).

De acordo com a CNT (2022), de 2011 a 2019, a movimentação internacional em todos os aeroportos brasileiros correspondeu a aproximadamente 43% do total transportado por esse modal. No que diz respeito ao valor dos produtos exportados, apenas três categorias de produtos respondem por mais de 50% da carga total: bens utilizados na fabricação de aeronaves e máquinas afins (27,0%); metais preciosos e outros metais não ferrosos (22,9%); e produtos farmacêuticos, químicos medicinais e botânicos (5,6%).

Por outro lado, no âmbito das importações, as três categorias de mercadoria cujo valor representam o maior percentual são: fabricação de produtos farmacêuticos, produtos químicos medicinais e produtos botânicos. Estes concentram 19,3% das mercadorias que chegam ao país; seguida por fabricação de componentes eletrônicos e placas, com 16,0%; e a fabricação de equipamentos de comunicação, com 13,3% (CNT, 2022).

Com relação aos investimentos públicos no setor aeroviário, a Figura 6 demonstra o comportamento dos valores destinados a este setor.

Figura 6. Investimento público em infraestrutura aeroviária – 2010/2022 (bilhões R\$)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2023).

Entre 2011 e 2014, os investimentos públicos no setor aéreo aumentaram. À semelhança de outras nações que receberam grandes eventos esportivos, o Brasil sediou a Copa do Mundo em 2014 e os Jogos Olímpicos em 2016. Os efeitos destes eventos são sentidos antes, durante e após os eventos, deixando um legado de aumento nas taxas de turismo internacional em função da evidência do país. Porém, em 2014, a crise econômica se agravou, resultando na diminuição da procura pelo modal aéreo. Isto teve um efeito prejudicial nas operações da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), contribuindo para explicar o declínio dos investimentos da empresa estatal no setor nos anos seguintes (ONTL e EPL, 2018).

2.1.4 Transporte aquaviário

Segundo a CNT (2022), o transporte aquaviário pode ser realizado de duas formas:

- Navegação interior: refere-se à utilização de hidrovias nacionais navegáveis para escoar produção nacional e transportar passageiros;
- Navegação marítima, que pode ser dividida em duas categorias: navegação de longo curso, que é feita entre países, e navegação de cabotagem, que é feita entre portos

ou pontos navegáveis do território nacional. Combina rotas marítimas e hidrovias navegáveis em seu trajeto.

Em 2025, o Brasil explorava, aproximadamente, 48% da malha hidroviária classificada como economicamente navegável, conforme dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2025). Nesse período, a extensão potencial para navegação alcançava cerca de 41,7 mil quilômetros, dos quais aproximadamente 20,1 mil quilômetros encontravam-se efetivamente utilizados para o transporte de cargas e passageiros. Embora esses números evidenciem a existência de um expressivo potencial hidroviário nacional, a utilização efetiva do modal permanece parcial, indicando espaço significativo para ampliação de sua participação na matriz logística brasileira. Ainda assim, a navegação interior desempenha função estratégica na movimentação de cargas no território nacional, sobretudo no escoamento de grãos agrícolas e minerais, em razão de suas economias de escala e de sua maior eficiência energética em comparação a outros modais terrestres.

Para a CNT (2019), o transporte hidroviário possui diversas vantagens, tais como: maior capacidade de movimentação de carga, reduzido custo por tonelada transportada e menor emissão de poluentes. Essas características contribuem para que o modal hidroviário seja adequado para o transportar grandes volumes de mercadorias com baixo valor agregado (*commodities*) por longas distâncias. Em relação à quantidade de hidrovias economicamente utilizáveis, o Brasil tem à disposição 2,3 km deste modal por 1.000 km². Números menores que Estados Unidos (11,5 Km) e a China (4,2 Km) por 1.000 Km² (CNT, 2019).

Apesar do vasto litoral navegável, com 37 portos estabelecidos e da rede de hidrovias mencionada anteriormente, o modal aquaviário movimenta 15,7% do volume de cargas transportadas dentro Brasil em 2021, sugerindo potencial para o desenvolvimento e expansão da atividade no escoamento da produção e no transporte de passageiros (CNT, 2022).

De acordo com o ONTL e a EPL (2021), entregar o mesmo volume de produtos por cabotagem pode custar até cinco vezes menos, em média, do que custaria caso fosse utilizado o modal rodoviário.

Do ponto de vista energético, consome-se menos combustível, o que resulta na liberação de menos poluentes atmosféricos, diminuindo o impacto ao meio ambiente. Um benefício adicional diz respeito à vida útil prolongada da infraestrutura, dos equipamentos e dos veículos, o que ajuda a evitar interrupções no serviço e perdas para os proprietários das mercadorias. Por último, como o transporte aquaviário é um meio de transporte seguro, eficaz e econômico, ele também apresenta uma taxa reduzida de acidentes e avarias (CNT, 2022).

Nesse sentido, a Figura 7 apresenta uma equivalência ilustrativa de capacidade de transporte entre os modais hidroviário, ferroviário, rodoviário e aéreo, considerando como base um lote padrão de 6.000 toneladas.

Figura 7. Comparativo entre as capacidades de carregamento dos modais



Fonte: Elaboração própria, com base em ANTAQ (2025); SEMIL/SP (2021); AMSTEDMAXION (2017); CONTRAN (2021); BOEING (2024).

Na Figura 7 é possível verificar que quatro embarcações fluviais de fundo plano e de baixo calado, conhecidas como chatas e um empurrador, podem atingir aproximadamente 6.000 toneladas úteis. Tomando esse volume como referência, tal capacidade corresponderia a cerca de 78 vagões ferroviários do tipo *hopper*, com carga útil média em torno de 77,5 t por vagão, ou, ainda, a aproximadamente 175 carretas rodoviárias, considerando carga útil típica entre 30 e 35 t por unidade. No modal aéreo, mesmo uma aeronave cargueira de grande porte como o Boeing 747-8F — com carga útil máxima próxima de 137,8 t — exigiria cerca de 44 voos para movimentar o mesmo lote. Esses valores ilustram que, para cargas volumosas e de menor valor agregado, os modais hidroviário e ferroviário tendem a oferecer maior capacidade por operação, enquanto o modal aéreo é estruturalmente direcionado a cargas urgentes e de alto valor, com capacidade unitária inferior em termos de volume transportado. A comparação, embora ilustrativa, não implica equivalência operacional absoluta, uma vez que fatores como distância, custo por tonelada-quilômetro, eficiência energética e restrições regulatórias influenciam a escolha modal.

Segundo a CNT (2019), todos esses benefícios têm alguns contrapontos, tais como: menor velocidade de deslocamento, menos opções e frequência de viagens e menos capilaridade na entrega dos produtos. A CNT (2019) afirma que estas rotas são limitadas pela geografia regional, sendo necessário o transbordo das mercadorias para outro modal para que cheguem ao destino.

De acordo com a CNT (2022), mesmo em meio a um período difícil para o comércio internacional e ao caos logístico provocado pela epidemia de Covid-19, a movimentação portuária seguiu crescendo. A Tabela 1 traz a evolução da movimentação portuária em toneladas no Brasil de 2010 a 2024.

A navegação de longo curso foi responsável pela maior parte do movimento, com 73,4% do transporte total de cargas entre 2010 e 2020 (CNT, 2022). Em seguida, vieram a cabotagem, a navegação interior e as operações de apoio marítimo/portuário com: 21,6%; 4,5% e 0,5% respectivamente (CNT, 2022).

Em termos do perfil da carga movimentada nos portos nacionais em 2021, o transporte de graneis sólidos é predominante tanto no segmento da navegação interior como no de longo curso (61,4% e 72,1%, respectivamente) (CNT, 2022).

Tabela 1. Total de movimentação portuária no Brasil de 2010 a 2023

Data - Ano	Movimentação em toneladas
2010	840.153.698
2011	887.403.716
2012	904.398.744
2013	929.351.411
2014	968.881.664
2015	1.008.304.646
2016	1.002.807.767
2017	1.087.759.832
2018	1.122.376.877
2019	1.104.806.325
2020	1.154.902.241
2021	1.207.785.351
2022	1.219.388.435
2023	1.303.684.023

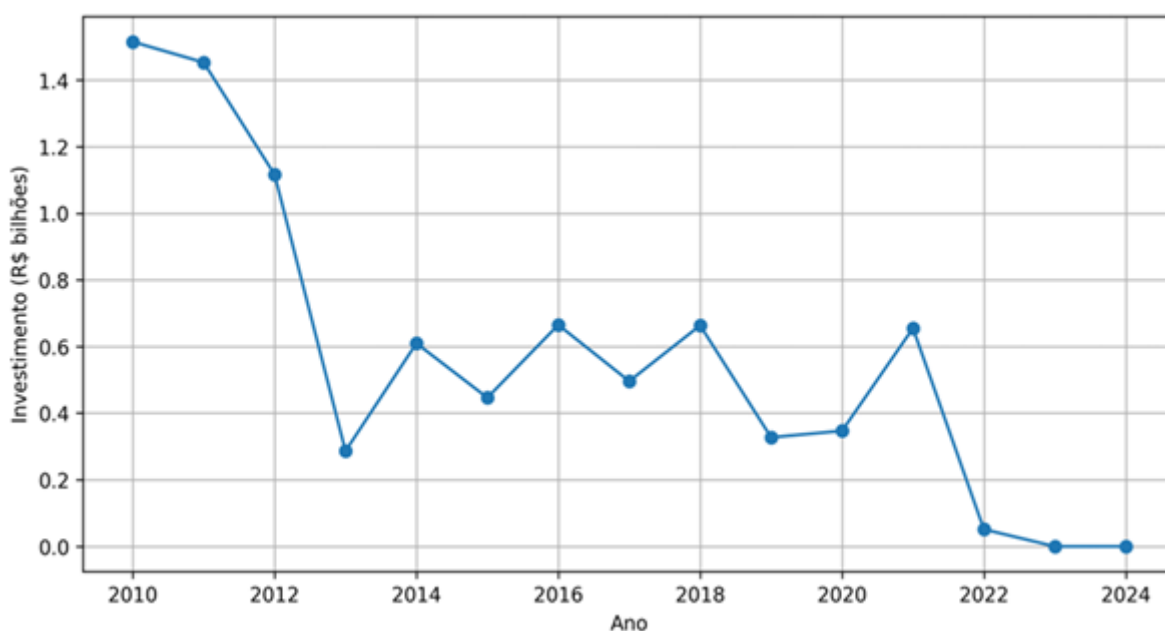
Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2024).

Para a CNT (2022), o aspecto mais notável da cabotagem são os graneis líquidos e gasosos (67,3%) sendo, de maneira geral, produtos menos sofisticados, ou seja, primários. Isso se traduz num maior volume de mercadorias com menor valor agregado.

Para compreender a dinâmica temporal dos investimentos públicos realizados pelo Ministério do Transportes destinados ao setor aquaviário no Brasil, considerou-se os valores de investimentos e inversões financeiras para o período entre 2010 e 2024 (BRASIL, 2025).

A Figura 8 ilustra esses dados e facilita a identificação de tendências e rupturas no padrão de investimento nesse modal.

Figura 8. Dinâmica do investimento público no setor aquaviário no Brasil – 2010/2024



Fonte: BRASIL (2025).

De acordo com a Figura 8, percebe-se que os maiores aportes ocorreram na primeira metade da década (2010–2012), com os valores anuais superiores a R\$ 1 bilhão. A partir de 2013, há uma queda acentuada, refletindo a retração de investimentos em infraestrutura pública naquele período. Entre 2014 e 2018, os valores apresentam variações moderadas, sugerindo fases de ajuste e reorganização orçamentária. A partir de 2019, observam-se diminuições mais pronunciadas, com valores residuais em 2022 e ausentes em 2023 e 2024, o que pode indicar ausência de execução orçamentária ou a priorização de outras áreas de infraestrutura no contexto fiscal recente.

2.1.5 Impactos do transporte marítimo nas exportações e importações

Sem dúvida, um dos principais motores do desenvolvimento socioeconômico do país é o comércio exterior. As operações requeridas são complexas e as chamadas portas de entrada e saída de divisas contribuem para desenvolvimento da nação, além de ajudar na evolução e na

especialização da logística. Os aspectos competitivos e tecnológicos são fundamentais para uma gestão eficaz dos processos envolvidos no comércio internacional. Transportes, portos, rodovias, contêineres, seguros, armazenamento e multimodalidade são exemplos de serviços de apoio à compra e venda de *commodities* estrategicamente importantes para o sucesso do comércio exterior.

A seguir, a Tabela 2 apresenta a participação das principais vias de transporte nas exportações do Brasil entre os anos de 2010 e 2024. Os números de cada via estão em dólares americanos (FOB – US\$).

Tabela 2. Participação das principais vias nas exportações entre 2010 e 2024 - (FOB – US\$)

Período					
Via	2024	2023	2022	2021	2020
Marítima	298.148.235.096	300.407.876.838	294.788.015.189	248.356.122.396	184.269.022.864
Rodoviária	19.263.694.598	20.027.952.001	20.906.300.406	16.330.071.605	10.958.947.955
Aérea	17.136.024.654	15.521.016.444	16.420.330.118	14.773.253.867	12.658.740.167
Fluvial	280.896.828	1.132.459.810	294.985.452	219.077.200	262.134.827
Ferrovária	73.788.029	119.570.035	186.402.909	166.720.918	83.155.674
Período					
Via	2019	2018	2017	2016	2015
Marítima	190.130.662.110	195.726.192.535	181.244.371.198	148.855.950.792	155.931.370.782
Rodoviária	12.142.577.965	14.415.936.604	14.652.229.466	12.354.287.153	13.295.450.602
Aérea	17.058.771.838	15.790.420.670	12.130.377.481	11.062.808.211	10.338.510.721
Fluvial	662.839.957	2.073.061.533	1.526.395.905	1.196.441.639	1.235.955.981
Ferrovária	132.995.994	162.375.080	148.698.015	179.740.403	243.059.154
Período					
Via	2014	2013	2012	2011	2010
Marítima	187.266.948.160	195.715.256.963	202.323.748.684	215.819.265.446	167.778.629.449
Rodoviária	14.489.501.900	16.901.528.476	16.155.318.747	17.439.730.146	14.730.857.275
Aérea	11.111.644.720	11.328.081.508	10.774.828.837	11.162.800.793	9.909.685.946
Fluvial	1.415.464.194	1.557.795.457	1.394.812.316	1.581.346.380	1.221.922.889
Ferrovária	338.201.678	342.173.562	360.607.894	442.539.790	366.742.233

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados do COMEX STAT (2026).

O modal marítimo consolida-se como a principal via de escoamento das exportações brasileiras ao longo de todo o período analisado (2010–2024), apresentando valores amplamente superiores aos demais modais. Em 2024, as exportações por via marítima atingiram US\$ 298,1 bilhões, patamar semelhante ao observado em 2023 (US\$ 300,4 bilhões) e significativamente superior aos níveis registrados em 2016 (US\$ 148,8 bilhões). Apesar das

oscilações ao longo da série, especialmente entre 2013 e 2016, o predomínio estrutural do transporte marítimo permanece evidente.

Os modais rodoviário e aéreo apresentam participação intermediária e relativamente estável ao longo dos anos. O transporte rodoviário variou entre US\$ 10,9 bilhões (2020) e US\$ 20,9 bilhões (2022), enquanto o modal aéreo oscilou entre US\$ 9,9 bilhões (2010) e US\$ 17,1 bilhões (2024). Observa-se retração em 2020, associada ao contexto da pandemia, seguida de recuperação nos anos subsequentes.

Já os modais fluvial e ferroviário registram valores substancialmente inferiores, caracterizando-se como vias complementares no comércio exterior. O modal fluvial experimentou forte redução em sua participação entre 2019 e 2020 (em dólares, saiu de 662,8 milhões para 262,1 milhões, ou em toneladas de 4,4 milhões de toneladas para 2,5 milhões de toneladas). Entretanto, essa queda já havia sido constatada entre 2018 e 2019. Nesse período, uma das causas foi a redução das importações pela Argentina. Segundo a Associação de Terminais Portuários Privados (ATP, 2019), a Argentina apresentou uma queda significativa de 41,60% nas importações do Brasil entre 2018 e 2019, reflexo da crise econômica enfrentada pelo país. Na sequência, em 2020, a maioria dos modais sofreu os impactos provocados pela pandemia de Covid 19. O ferroviário, por sua vez, apresentou trajetória declinante ao longo do período, passando de US\$ 366,7 milhões em 2010 para US\$ 73,8 milhões em 2024.

Na Tabela 3 é apresentada a participação das principais vias de transporte nas importações do Brasil entre os anos de 2010 e 2024. Os números de cada via também estão em dólares americanos (FOB – US\$).

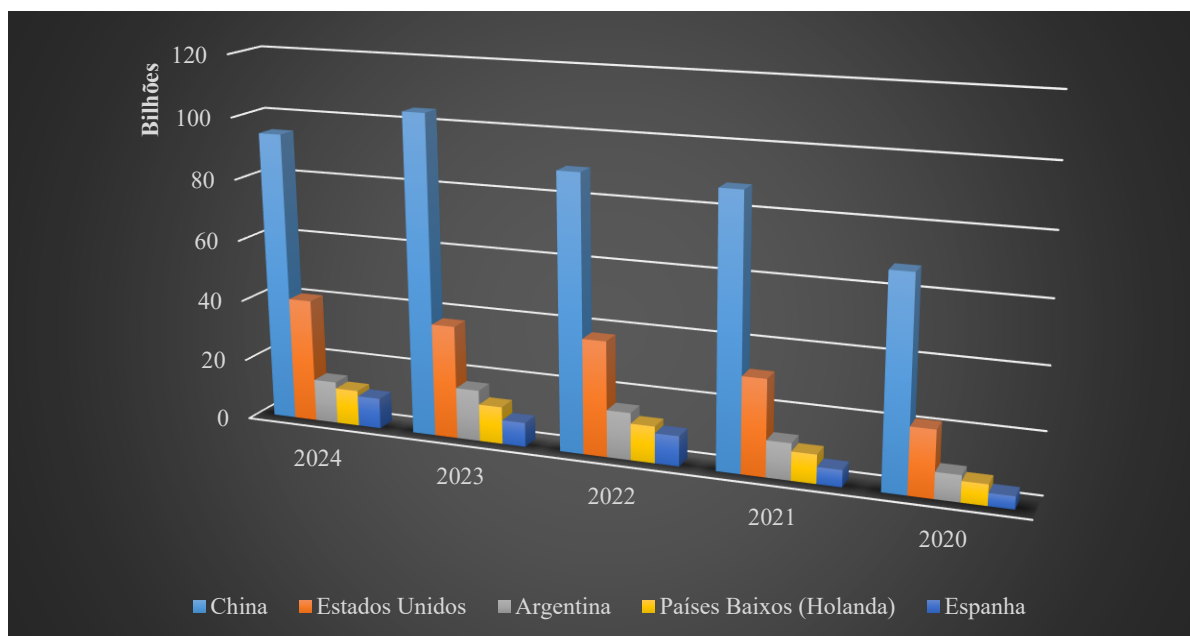
O modal marítimo mantém-se como principal via das importações brasileiras ao longo de todo o período analisado (2010–2024), apresentando valores substancialmente superiores aos demais modais. Em 2024, as importações por via marítima alcançaram aproximadamente US\$ 194,8 bilhões, após pico recente em 2022 (US\$ 210,9 bilhões), refletindo a centralidade do transporte portuário no abastecimento externo do país. O modal aéreo ocupa a segunda posição, com valores significativamente inferiores, variando entre US\$ 29,6 bilhões (2016) e US\$ 52,8 bilhões (2024), evidenciando sua relevância para cargas de maior valor agregado. O transporte rodoviário apresenta participação intermediária, oscilando entre US\$ 6,7 bilhões (2020) e US\$ 11,8 bilhões (2024), enquanto os modais ferroviário e fluvial registram valores residuais ao longo da série. De modo geral, os dados confirmam a elevada concentração das importações brasileiras no modal marítimo, com os demais modais desempenhando papel complementar no fluxo de entrada de mercadorias.

Tabela 3. Participação das principais vias nas importações do Brasil entre 2010 e 2024

Período					
Via	2024	2023	2022	2021	2020
Marítima	194.789.280.193	181.301.586.303	210.858.721.513	160.917.809.227	110.238.663.078
Aérea	52.765.800.086	46.049.870.524	46.971.209.130	43.433.286.952	34.089.609.664
Rodoviária	11.792.773.576	10.329.358.122	10.962.867.474	9.211.294.424	6.757.737.757
Ferroviária	11.046.316	10.937.610	22.875.423	9.213.192	1.165.861
Fluvial	575.138	-	3.082.356	-	614.237
Período					
Via	2019	2018	2017	2016	2015
Marítima	133.100.159.579	134.193.981.882	113.722.501.900	97.900.396.089	125.711.191.957
Aérea	37.303.465.262	36.983.290.589	33.742.349.855	29.658.771.560	33.561.682.270
Rodoviária	8.018.736.643	7.991.378.130	7.954.052.350	7.677.338.685	7.708.361.182
Ferroviária	9.381.731	3.735.156	1.154.941	9.337.071	18.516.758
Fluvial	4.389.112	13.155.576	22.009.103	2.486.238	2.076.809
Período					
Via	2014	2013	2012	2011	2010
Marítima	171.930.751.905	181.390.440.833	168.968.442.234	172.206.124.255	132.864.716.151
Aérea	41.647.284.672	41.360.013.045	39.343.889.833	39.677.489.264	36.015.652.327
Rodoviária	10.382.459.366	11.419.231.783	10.485.570.500	10.141.464.511	9.205.530.917
Ferroviária	41.315.319	101.212.927	115.170.881	120.121.493	149.782.378
Fluvial	15.198.165	25.527.353	17.965.843	23.238.462	16.975.095

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados do COMEX STAT (2026).

Com relação ao comércio exterior, a Figura 9 apresenta os cinco principais países de destino das exportações brasileiras no período de 2020 a 2024, com valores expressos em dólares FOB. A delimitação temporal contempla o período posterior ao choque provocado pela pandemia de *Covid-19*, permitindo observar a dinâmica recente de recuperação e reconfiguração dos fluxos comerciais internacionais. Destaca-se que, conjuntamente, esses cinco mercados foram responsáveis por aproximadamente 51% do total exportado pelo Brasil no período, evidenciando elevada concentração geográfica das vendas externas. Tal concentração assume relevância estratégica no contexto da infraestrutura logística nacional, especialmente no que se refere à capacidade operacional dos portos e à eficiência dos corredores de exportação.

Figura 9. Destino das exportações brasileiras - cinco primeiros países (2020 a 2024)

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados do COMEX STAT (2026).

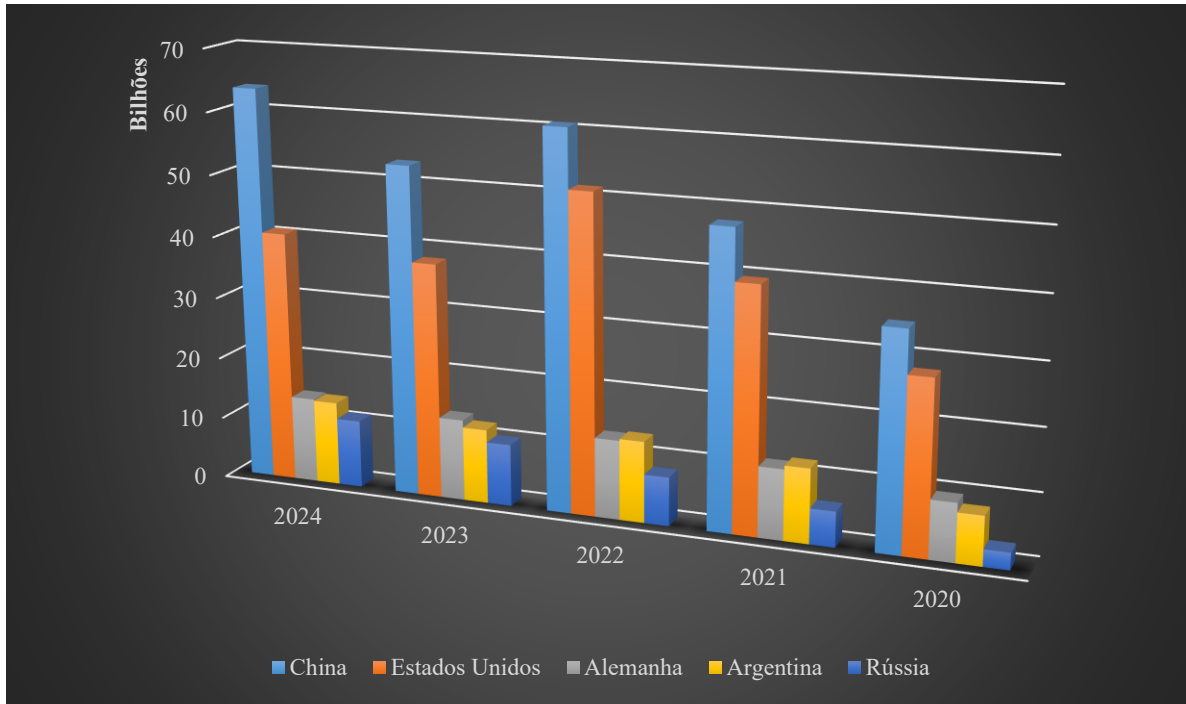
Os dados evidenciam a liderança consistente da China como principal destino das exportações brasileiras no período analisado, alcançando US\$ 104,3 bilhões em 2023 e mantendo patamar elevado em 2024 (US\$ 94,4 bilhões). Os Estados Unidos consolidam-se como segundo maior mercado, com crescimento expressivo entre 2020 e 2024, quando as exportações praticamente dobraram. Argentina, Países Baixos e Espanha completam o grupo dos principais parceiros, ainda que com maior volatilidade nos valores anuais (COMEXSTAT, 2026).

Com relação às importações, a Figura 10 apresenta os cinco principais países de origem das importações brasileiras no período de 2020 a 2024, com valores também expressos em dólares FOB.

Os dados evidenciam que China, Estados Unidos e Argentina assumem posição central no comércio exterior brasileiro, figurando simultaneamente entre os principais destinos das exportações e as principais origens das importações no período de 2020 a 2024. A China consolida-se como principal parceiro comercial do Brasil, liderando tanto as exportações quanto as importações, o que revela elevada interdependência econômica e forte integração às cadeias globais de valor. Os Estados Unidos ocupam posição semelhante, destacando-se como segundo maior parceiro em ambos os fluxos, reforçando a relevância das trocas bilaterais de bens industriais, tecnológicos e energéticos. A Argentina, por sua vez, mantém papel estratégico no âmbito regional, refletindo a integração produtiva no Mercosul. Essa concentração bilateral

amplia a importância da eficiência logística e da infraestrutura portuária nacional, uma vez que grande parte desses fluxos ocorre predominantemente por via marítima, exigindo capacidade operacional compatível com a intensidade das trocas comerciais.

Figura 10. Origem das importações brasileiras - cinco primeiros países (2020 a 2024)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados do COMEX STAT (2026).

A seguir, o Quadro 1 apresenta a ordem dos 10 produtos mais exportados da balança comercial brasileira entre 2019 e 2024. A análise evidencia a predominância de *commodities* primárias, com destaque para soja, óleos brutos de petróleo e minérios de ferro, que concentraram as maiores participações ao longo de todo o período. A soja manteve-se como principal produto exportado na maior parte dos anos, com participações de 13,7% em 2020, 13,9%, em 2022, e atingindo 15,7% em 2023, evidenciando sua elevada relevância na pauta exportadora nacional e sua resiliência mesmo durante o período mais crítico da pandemia de *Covid-19*.

Quadro 1. Produtos mais exportados pelo Brasil – 2019 a 2024

	10 primeiros produtos exportados em 2019	%	10 primeiros produtos exportados em 2020	
1º	Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura	11,8	Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura	13,7
2º	Óleos brutos de petróleo	10,9	Minérios de ferro e seus concentrados, exceto as piratas de ferro ustuladas (cinzas de piratas), não aglomerados	11,6
3º	Minérios de ferro e seus concentrados, exceto as piratas de ferro ustuladas (cinzas de piratas), não aglomerados	9,15	Óleos brutos de petróleo	9,4
4º	Milho em grão, exceto para semeadura	3,26	Outros açúcares de cana	3,5
5º	Pastas químicas de madeira, à soda ou ao sulfato, exceto pastas para dissolução, semibranqueadas ou branqueadas, de não coníferas	3,17	Carnes desossadas de bovino, congeladas	3,2
6º	Carnes desossadas de bovino, congeladas	2,55	Milho em grão, exceto para semeadura	2,8
7º	Pedaços e miudezas, comestíveis de galos/galinhas, congelados	2,19	Pastas químicas de madeira, à soda ou ao sulfato, exceto pastas para dissolução, semibranqueadas ou branqueadas, de não coníferas	2,7
8º	Café não torrado, não descafeinado, em grão	2,07	Café não torrado, não descafeinado, em grão	2,4
9º	Bagaços e outros resíduos sólidos, da extração do óleo de soja	2,03	Bagaços e outros resíduos sólidos, da extração do óleo de soja	2,2
10º	Outros açúcares de cana	2,03	Pedaços e miudezas, comestíveis de galos/galinhas, congelados	2,0
	Total	49,2	Total	53,4
	10 primeiros produtos exportados em 2021	%	10 primeiros produtos exportados em 2022	%
1	Minérios de ferro e seus concentrados, exceto as piratas de ferro ustuladas (cinzas de piratas), não aglomerados	14,5	Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura	13,9
2	Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura	13,8	Óleos brutos de petróleo	12,7
3	Óleos brutos de petróleo	10,9	Minérios de ferro e seus concentrados, exceto as piratas de ferro ustuladas (cinzas de piratas), não aglomerados	7,7
4	Outros açúcares de cana	2,8	Milho em grão, exceto para semeadura	3,6
5	Carnes desossadas de bovino, congeladas	2,5	Carnes desossadas de bovino, congeladas	3,3
6	Pastas químicas de madeira, à soda ou ao sulfato, exceto pastas para dissolução, semibranqueadas ou branqueadas, de não coníferas	2,2	Fuel oil	3,1
7	Bagaços e outros resíduos sólidos, da extração do óleo de soja	2,1	Outros açúcares de cana	2,9
8	Café não torrado, não descafeinado, em grão	2,1	Café não torrado, não descafeinado, em grão	2,5
9	Fuel oil	2,0	Pastas químicas de madeira, à soda ou ao sulfato, exceto pastas para dissolução, semibranqueadas ou branqueadas, de não coníferas	2,3
10	Outros produtos semimanufaturados de ferro ou aço não ligado, de seção transversal retangular, que contenham, em peso, menos de 0,25 % de carbono	1,9	Bagaços e outros resíduos sólidos, da extração do óleo de soja	2,3
	Total	54,7	Total	54,3
	10 primeiros produtos exportados em 2023	%	10 primeiros produtos exportados em 2024	%
1	Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura	15,7	Óleos brutos de petróleo	13,3
2	Óleos brutos de petróleo	12,5	Soja, mesmo triturada, exceto para semeadura	12,7
3	Minérios de ferro e seus concentrados, exceto as piratas de ferro ustuladas (cinzas de piratas), não aglomerados	8,0	Minérios de ferro e seus concentrados, exceto as piratas de ferro ustuladas (cinzas de piratas), não aglomerados	7,9
4	Milho em grão, exceto para semeadura	4,0	Outros açúcares de cana	4,7
5	Outros açúcares de cana	3,9	Café não torrado, não descafeinado, em grão	3,4
6	Bagaços e outros resíduos sólidos, da extração do óleo de soja	2,5	Carnes desossadas de bovino, congeladas	3,0
7	Carnes desossadas de bovino, congeladas	2,5	Pastas químicas de madeira, à soda ou ao sulfato, exceto pastas para dissolução, semibranqueadas ou branqueadas, de não coníferas	2,8
8	Fuel oil	2,2	Milho em grão, exceto para semeadura	2,4
9	Café não torrado, não descafeinado, em grão	2,2	Fuel oil	2,2
10	Pastas químicas de madeira, à soda ou ao sulfato, exceto pastas para dissolução, semibranqueadas ou branqueadas, de não coníferas	2,1	Bagaços e outros resíduos sólidos, da extração do óleo de soja	2,1
	Total	55,6	Total	54,6

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados do COMEX STAT (2026).

Os óleos brutos de petróleo também apresentaram crescimento significativo, passando de 9,4% em 2020 para 12,7% em 2022 e assumindo a liderança em 2024, com participação de 13,3%, refletindo tanto a valorização internacional da *commodity* quanto a expansão da produção nacional. Paralelamente, os minérios de ferro mantiveram presença constante entre os principais produtos, com participações de 11,6% em 2020 e 7,9% em 2024, confirmando a relevância estrutural do setor mineral nas exportações brasileiras (BRASIL, 2026).

Além desses produtos, observa-se a presença recorrente de outros itens do complexo agroexportador, como milho (3,6% em 2022), café (3,4% em 2024), carnes bovinas (3,0% em 2024) e açúcar (4,7% em 2024), reforçando a forte especialização do país na exportação de produtos primários. De forma agregada, os dez principais produtos concentraram mais de metade do valor total exportado em todos os anos analisados, com participação de 53,4% em 2020, 54,3% em 2022, 55,6% em 2023 e 54,6% em 2024. Esse elevado nível de concentração evidencia a importância desse conjunto relativamente restrito de *commodities* para economia brasileira, cuja dinâmica está diretamente associada às oscilações da demanda internacional e aos ciclos globais de preços, mesmo diante das disrupções provocadas pela pandemia e pela posterior recuperação econômica mundial (BRASIL, 2026).

Com relação as importações brasileiras, o Quadro 2 a seguir apresenta a ordem dos 10 produtos mais importados da balança comercial para o mesmo período.

A análise apresenta concentração em insumos estratégicos, com destaque recorrente para fertilizantes e combustíveis derivados de petróleo, que figuraram entre os primeiros colocados ao longo de todo o período. Em vários anos, os fertilizantes representaram individualmente participações superiores a aproximadamente 4% do total importado, refletindo a importância desses insumos para o agronegócio brasileiro. De forma semelhante, os óleos combustíveis e derivados de petróleo apresentaram participações relevantes, variando entre aproximadamente 3% e 6% nos anos mais recentes. Esse padrão tornou-se ainda mais evidente no período pós-pandemia, quando a recuperação da atividade econômica e as tensões geopolíticas internacionais impactaram significativamente a demanda e os preços desses produtos (BRASIL, 2026).

Além desses itens, observa-se a presença consistente de bens de maior intensidade tecnológica, como circuitos integrados e componentes eletrônicos, que apresentaram participações individuais frequentemente superiores a 2% do total importado.

Quadro 2. Produtos mais importados pelo Brasil – 2019 a 2024

	10 primeiros produtos importados em 2019	%	10 primeiros produtos importados em 2020	
1º	Gasóleo (óleo diesel)	3,6	Gasóleo (óleo diesel)	2,5
2º	Óleos brutos de petróleo	2,5	Óleos brutos de petróleo	1,6
3º	Outros cloretos de potássio	1,8	Outros cloretos de potássio	1,6
4º	Partes de turborreatores ou de turbopropulsores	1,78	Partes de turborreatores ou de turbopropulsores	1,5
5º	Naftas para petroquímica	1,57	Outras partes para aparelhos de telefonia/telegrafia	1,4
6º	Hulha betuminosa, não aglomerada	1,46	Plataformas de perfuração ou de exploração, flutuantes ou submersíveis	1,3
7º	Outros veículos automóveis com motor diesel, para carga <= 5 toneladas	1,46	Barcos-faróis/guindastes/docas/diques flutuantes, etc.	1,1
8º	Plataformas de perfuração ou de exploração, flutuantes ou submersíveis	1,35	Ureia, mesmo em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %, em peso, calculado sobre o produto anidro no estado seco	1,1
9º	Outras partes para aparelhos de telefonia/telegrafia	1,21	Outros veículos automóveis com motor diesel, para carga <= 5 toneladas	1,0
10º	Outras gasolinas, exceto para aviação	1,1	Processadores e controladores, mesmo combinados com memórias, conversores, circuitos lógicos, amplificadores, circuitos temporizadores e de sincronização, ou outros circuitos, montados, próprios para montagem em superfície (SMD - Surface Mounted Device)	1,0
	Total	17,8	Total	14,2
	10 primeiros produtos importados em 2021	%	10 primeiros produtos importados em 2022	%
1	Gasóleo (óleo diesel)	3,2	Gasóleo (óleo diesel)	5,1
2	Outros cloretos de potássio	1,9	Óleos brutos de petróleo	3,6
3	Óleos brutos de petróleo	1,8	Outros cloretos de potássio	3,1
4	Gás natural liquefeito	1,6	Hulha betuminosa, não aglomerada	1,8
5	Outras vacinas para medicina humana, em doses	1,6	Ureia, mesmo em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %, em peso, calculado sobre o produto anidro no estado seco	1,6
6	Naftas para petroquímica	1,4	Naftas para petroquímica	1,4
7	Ureia, mesmo em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %, em peso, calculado sobre o produto anidro no estado seco	1,4	Diidrogeno-ortofosfato de amônio (fosfato monoamônico ou monoamoniacal), mesmo misturado com hidrogeno-ortofosfato de diamônio (fosfato diamônico ou diamoniacal)	1,4
8	Diidrogeno-ortofosfato de amônio (fosfato monoamônico ou monoamoniacal), mesmo misturado com hidrogeno-ortofosfato de diamônio (fosfato diamônico ou diamoniacal)	1,3	Células fotovoltaicas montadas em módulos ou em painéis	1,3
9	Energia elétrica	1,3	Gás natural liquefeito	1,3
10	Hulha betuminosa, não aglomerada	1,2	Partes de turborreatores ou de turbopropulsores	1,1
	Total	16,7	Total	21,8
	10 primeiros produtos importados em 2023	%	10 primeiros produtos importados em 2024	
1	Gasóleo (óleo diesel)	4,0	Óleos brutos de petróleo	3,3
2	Óleos brutos de petróleo	3,8	Gasóleo (óleo diesel)	3,2
3	Outros cloretos de potássio	2,0	Partes de turborreatores ou de turbopropulsores	1,8
4	Células fotovoltaicas montadas em módulos ou em painéis	1,6	Outros cloretos de potássio	1,4
5	Hulha betuminosa, não aglomerada	1,5	Turboreatores de empuxo superior a 25 kN	1,3
6	Partes de turborreatores ou de turbopropulsores	1,5	Outros produtos imunológicos, apresentados em doses ou acondicionados para venda a retalho	1,3
7	Turboreatores de empuxo superior a 25 kN	1,2	Outros veículos automóveis com motor diesel, para carga <= 5 toneladas	1,2
8	Diidrogeno-ortofosfato de amônio (fosfato monoamônico ou monoamoniacal), mesmo misturado com hidrogeno-ortofosfato de diamônio (fosfato diamônico ou diamoniacal)	1,1	Hulha betuminosa, não aglomerada	1,1
9	Naftas para petroquímica	1,1	Ureia, mesmo em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %, em peso, calculado sobre o produto anidro no estado seco	1,0
10	Ureia, mesmo em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %, em peso, calculado sobre o produto anidro no estado seco	1,1	Naftas para petroquímica	1,0
	Total	18,9	Total	16,6

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados do COMEX STAT (2026).

A relevância desses produtos evidencia a dependência estrutural do país em relação à importação de insumos industriais e tecnológicos necessários ao funcionamento das cadeias produtivas nacionais. De forma agregada, os dez principais produtos importados concentraram aproximadamente entre 45% e 55% do valor total das importações no período analisado, indicando elevada concentração da pauta importadora em bens intermediários e energéticos. Esse perfil reforça a complementaridade entre uma pauta exportadora baseada em *commodities* primárias e uma estrutura importadora voltada ao suprimento de insumos produtivos e tecnológicos, característica típica de economias com forte inserção no comércio internacional baseada em recursos naturais (BRASIL, 2026).

2.1.6 Transporte e consumo de combustíveis fósseis

Como mencionado anteriormente, o modal marítimo é responsável por grande parte do transporte da balança comercial do Brasil. De acordo com Brasil (2026), em 2025, 86,8% do volume exportado e 71,8% do importado foi por esta via. O principal combustível utilizado é o óleo diesel. A Tabela 4 traz a composição das vendas para o setor rodoviário e marítimo, por tipo de diesel no Brasil, de 2019 a agosto de 2023. Segundo a CNT (2023), a partir de 1º de abril de 2023, o óleo diesel (S-500 e S-10) comercializado no Brasil passou a conter, no mínimo, 12% de biodiesel em sua mistura (em volume), conforme determina a Resolução do Conselho Nacional de Política Energética - CNPE n.º 3, de 20/03/2023.

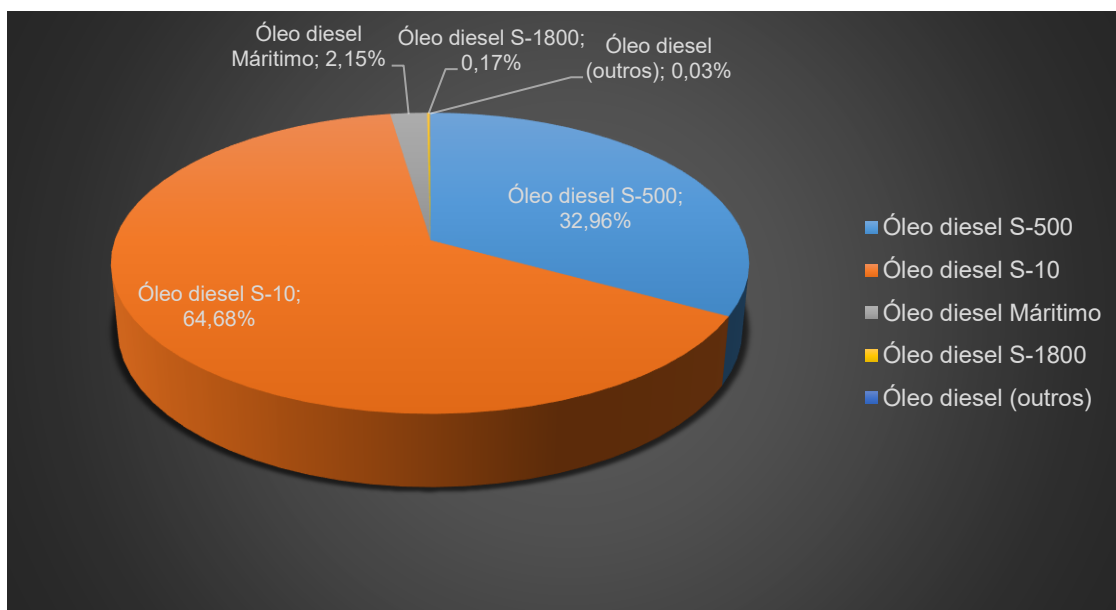
Tabela 4. Vendas por tipo de diesel no Brasil de 2019 a agosto de 2023

Setor	Teor de enxofre	2019	2020	2021	2022	2023 (até agosto)
Rodoviário	S-500	51,40%	45,90%	39,80%	36,20%	32,96%
	S-10	47,10%	52,50%	58,20%	61,60%	64,68%
Marítimo	S	1,30%	1,40%	1,60%	2,00%	2,15%
Diesel S-1800		0,20%	0,20%	0,40%	0,10%	0,17%
Outros		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2023).

Com relação ao diesel marítimo (S), o teor de enxofre é igual a no máximo 0,5% em massa, conforme a Resolução ANP n.º 903, de 18/11/2022. A partir de 2014, o óleo diesel S-1800 deixou de ser utilizado para fim rodoviário, conforme Resolução ANP n.º 42, de 16/12/2009. Atualmente, é empregado em mineração a céu aberto, transporte ferroviário e geração de energia elétrica. A Figura 11 demonstra a composição das vendas de óleo diesel em 2023 - até agosto (em %).

Figura 11. Composição das vendas de óleo diesel em 2023 - até agosto (em %)



Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da CNT (2023).

Verifica-se que o diesel S-10 lidera a comercialização com 64,68%, seguido pelo diesel S-500 com 32,96%. A diferença entre estes tipos de combustíveis está no teor de enxofre presente na composição. Segundo a Petrobras (2023), enquanto o diesel S-10 deve possuir no máximo 10 mg/kg de enxofre total, o diesel S-500 deve possuir no máximo 500 mg/kg de enxofre total. O óleo diesel marítimo representa 2,15% das vendas de diesel no Brasil.

Entretanto, o combustível utilizado nos motores principais de grandes dimensões e nos sistemas de propulsão de navios de grande porte chama-se *Bunker*, também conhecido como *Intermediate Fuel Oil (IFO)* ou Óleo Combustível Marítimo (OCM). Ele possui requisitos de qualidade mais restritivos quando comparados aos óleos combustíveis industriais, não permitindo, por exemplo, que em sua composição contenha elementos orgânicos como os encontrados no biodiesel éster (BRASIL, 2019).

Com a publicação do Decreto Legislativo nº 499/2009 (BRASIL, 2009), o Brasil adotou, em 2010, o Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL), que trata da prevenção da poluição atmosférica produzida por navios. De acordo com o disposto na Regra 14, do Anexo VI, as embarcações que exercem atividades em ambiente marinho, bem como as plataformas fixas e flutuantes, passam a utilizar combustíveis com no máximo 0,5% de teor de enxofre (BRASIL, 2019).

O bunker ganhou destaque em janeiro de 2020, quando a Organização Internacional Marítima (IMO) passou a adotar um limite mais restritivo sobre as emissões de compostos de enxofre (SO_x) para todos os mais de 170 países signatários da MARPOL. O limite de teor de

enxofre desse óleo combustível foi reduzido de um percentual de 3,5% para 0,5% (BOTELHO, 2022).

Segundo a Ship e Bunker (2024), 60% da demanda global do combustível bunker convencional provem das seguintes áreas: Singapura, centro de Amsterdã-Roterdã-Antuérpia, Fujairah (nos Emirados Árabes), Golfo dos EUA, Coréia do Sul, Rússia, Estreito de Gibraltar, Hong Kong, Panamá, Japão, Nova York, África Ocidental, África do Sul, Ilhas Canárias, Los Angeles/Long Beach e Turquia.

Em 2022, a demanda caiu 2,1%, em parte por conta aos efeitos da guerra entre Rússia e Ucrânia e dos esforços para minimizar o consumo de combustível fósseis. Ainda segundo os autores, a demanda por bunker em 2023 foi 0,4% acima de 2022, somando cerca de 138,1 milhões de toneladas e cerca de 61% da demanda global (SHIP E BUNKER, 2024). Já em 2024, a demanda nos principais centros de abastecimento marítimo registrou um aumento anual no quarto trimestre, elevando as vendas em 4% em relação a 2023 (SHIP E BUNKER, 2026).

Segundo Botelho (2022), a Petrobrás é a maior produtora de Bunker VLSFO (*Very low Sulphur Fuel oil* – óleo combustível com teor de enxofre muito baixo, máx. 0,50%) no Brasil, visto que o petróleo do pré-sal possui naturalmente um baixo teor de enxofre. Ainda segundo o autor (BOTELHO, 2022), em 2020, a Petrobrás comercializou cerca de 1,6 milhão de toneladas de VLSFO e exportou cerca de 8,7 milhões de toneladas de óleo combustível com qualidade para formular o bunker de baixo teor de enxofre (0,5% S).

Segundo a Mordor Intelligence (2024), no Brasil o mercado de combustível de bunker alcançou 614 USD por tonelada em dezembro de 2023. O tamanho do mercado de bunker no Brasil deve atingir US \$ 2,25 bilhões em 2024, podendo atingir US \$ 3,17 bilhões em 2029.

Porém, segundo Brasil (2019), utilizar combustíveis com maior teor de enxofre e tratar adequadamente as emissões produzidas é outra forma de cumprir a regulamentação instituída pela Organização Marítima Internacional (IMO, 2020). De acordo com Brasil (2019), o processo de tratamento pode ser efetuado por meio de Sistemas de Limpeza de Gases de Exaustão (EGCS), também conhecidos como *scrubbers*, os quais são montados nas embarcações e podem ser utilizados para este tipo de tratamento. Esses sistemas limpam os gases de escape dos motores dos navios, reduzindo as emissões de SOx e de material particulado.

Portanto, se forem instalados *scrubbers*, a opção de abastecer navios com *bunker* tradicional com maior teor de enxofre ainda estará disponível após 2020 (BRASIL, 2019).

2.2 Setor portuário brasileiro – Breve histórico

Segundo Caldas (2013), em meados do século XVI, logo após a chegada dos portugueses à costa brasileira, boa parte do litoral do Nordeste e do Sudeste já operavam com vários atracadouros rudimentares. A principal virada na história portuária brasileira ocorreu em 1808, quando D. João VI assinou a Carta Régia de Abertura dos Portos. A decisão do rei português fez mais do que apenas fornecer o impulso necessário para a entrada do Brasil no comércio global. Teria outras consequências: estabeleceria as bases para o fim do regime colonial e o início do processo de independência da Coroa portuguesa.

De acordo com Schwarcz e Starling (2015), a primeira medida régia da nova sede do Império lusitano propiciava não apenas que os navios portugueses, ou de nações com as quais tivessem sido estabelecidas parcerias comerciais, pudessem transportar mercadorias que saíssem ou chegassem à colônia. Agora, era possível adquirir suprimentos e produtos diretamente de outros países, e os navios que partiam do Brasil podiam atracar em outros portos. Com exceção da França e da Espanha, que ainda estavam em guerra com Portugal.

À medida que os produtos agrícolas e as matérias-primas extraídas passaram a ter maior aceitação na Europa, houve maior necessidade de atendimento aos centros de processamento, o que aumentou significativamente o número de áreas portuárias espalhadas pelo litoral. Estas áreas recebiam as embarcações que chegavam em grande número ao Brasil, apesar de quase não existirem estradas que permitissem uma interligação terrestre satisfatória (OLIVEIRA; RICUPERO, 2007).

Segundo Caldas (2013), em 1856 foi liberado o trânsito de embarcações nacionais e estrangeiras pelo rio Paraguai. Isso contribuiu para que a região oeste do Brasil saísse do isolamento por meio da navegação, colaborando para o desenvolvimento do porto de Corumbá.

Em 1864, o porto de Porto Alegre ganhou importância estratégica durante o maior conflito da América do Sul, a Guerra do Paraguai, encerrada em 1870. A região portuária recebeu soldados, investimentos em melhorias e novos estaleiros (CALDAS, 2013).

No dia 2 de fevereiro de 1892, o navio *Nasmith* atraca no cais de Santos e o modesto atracadouro torna-se o primeiro porto organizado do Brasil (CALDAS, 2013).

Em 18 de junho de 1908, com a chegada do navio a vapor *Kasato Maru* ao porto de Santos, é iniciada imigração japonesa. No ano seguinte, começaram as obras de modernização do porto do Recife e em 1º de março de 1915, o navio-escola Benjamin Constant, com 6,35 metros de calado, atraca com segurança no cais do Porto Novo do Rio Grande, atestando as obras de modernização (CALDAS, 2013).

Segundo Caldas (2013), os contêineres e seu design inovador para movimentação de cargas impulsionaram uma das maiores revoluções na indústria portuária, afetando as operações dos terminais brasileiros.

Em 1965, ainda que de forma incipiente, o porto de Santos foi o primeiro do país a receber cargas conteirizadas. Mas, o Brasil só começou a participar do novo modelo econômico marítimo em 1981, quando o porto de Santos construiu um terminal dedicado a movimentação de contêineres (CALDAS, 2013).

De acordo com Caldas (2013), outros portos, incluindo Rio Grande, Suape e Itaguaí, construíram gradativamente a infraestrutura necessária para movimentar cargas e receber contêineres. Vinte deles, incluindo alguns em hidrovias como o de Vila do Conde, no Pará, e Manaus, conseguiram operar com equipamentos de aço de até 12 metros de comprimento nos primeiros anos da década de 2000.

A modernização de dispositivos e ferramentas nunca feita antes no país foi necessária para cumprir as regulamentações que passaram a reger o comércio exterior. Além disso, outras necessidades emergiam para atender às novas demandas operacionais, tais como: a obtenção de guindastes maiores, fundamentais para movimentar contêineres; a modernização dos portos para receber navios porta-contêineres; e a construção de pátios maiores para abrigá-los (CALDAS, 2013).

Em 1975, houve a formação da Empresa Portos do Brasil S/A, a Portobrás, resultado do avanço das seguintes medidas: a política de estatização de Getúlio Vargas a partir da década de 1930; a entrada do governo militar no início da década de 1960; e o movimento em direção ao centralismo estatal que culminou no controle dos portos pela administração federal. Entretanto, a Portobrás era fortemente criticada pela demora na modernização dos terminais e foi extinta em 1990 (CALDAS, 2013).

Em 1982, o porto de Suape, em Pernambuco, entrou em operação e se estabeleceu como um dos maiores e mais importantes portos do Nordeste. Também é inaugurado o porto de Itaguaí, no Rio de Janeiro (CALDAS, 2013).

Em meados da década de 1980, a indústria naval começou a construir navios mais modernos, conhecidos como graneleiros, para transportar minério, grãos, produtos químicos e petróleo. Foram introduzidos navios super graneleiros, capazes de transportar 500 mil toneladas. Portos como os de Paranaguá, no Paraná; Santos, em São Paulo; e o gaúcho Rio Grande foram dotados de infraestrutura especializada para gerenciar principalmente os embarques de soja (CALDAS, 2013).

Em 1993, com a aprovação da Lei 8.630, de 25 de fevereiro, conhecida como Lei de Modernização dos Portos, houve o regresso da iniciativa privada ao setor, e isso contribuiu para que a atividade portuária aumentasse significativamente. De modo comparativo, em 1990 os portos movimentavam cerca de 360 milhões de toneladas de mercadorias e em meados da primeira década do século XXI, este número havia duplicado (CALDAS, 2013).

Em 05 de junho de 2013 é publicada a Lei 12.815/13 (conhecida como nova Lei dos Portos), regulamentada pelo Decreto 8.033/13. A legislação tornou flexível a instalação de Terminais de Uso Privado (TUPs) e unificou, em Brasília, o planejamento e as licitações de arrendamentos portuários (BRASIL, 2013).

2.2.1 Portos brasileiros

No caso do Brasil, de acordo com Bueno (2023) e Neme (2020), há 175 instalações portuárias, que são responsáveis por 95% de tudo que entra e sai do país, sendo o porto de Santos o principal e de maior movimentação.

Segundo o Ministério de Portos e Aeroportos (BRASIL, 2023), o Brasil possui 36 portos públicos organizados, que constituem a base do sistema portuário nacional sob gestão direta ou delegada pelo poder público. Esses portos podem ser administrados diretamente pela União, por meio das Companhias Docas — como a Companhia Docas do Pará, responsável pelos portos de Belém, Vila do Conde e Santarém — ou ter sua gestão delegada a estados, municípios ou consórcios públicos, conforme previsto na legislação portuária brasileira. Exemplos desse modelo incluem o Porto de Suape, administrado pelo Governo do Estado de Pernambuco, e o Porto de São Sebastião, cuja gestão é exercida pelo governo do estado de São Paulo, (BRASIL, 2023).

Além desses, destacam-se outros portos públicos estratégicos sob administração federal, como o Porto de Rio Grande, administrado pela Portos RS, o Porto de Paranaguá, gerido pela Portos do Paraná, e o Porto de Itaqui, administrado pela Empresa Maranhense de Administração Portuária. Esses portos desempenham papel fundamental no escoamento da produção nacional, especialmente de grãos sólidos e líquidos, (BRASIL, 2023).

De acordo com a Lei 12.815 de 5 de junho de 2013 (BRASIL, 2013), porto organizado é um bem público criado e equipado para atender às demandas de navegação, transporte de passageiros ou movimentação e armazenamento de cargas, cujo tráfego e operações pertinentes são regidos por uma autoridade portuária.

A região desses portos é definida por ato do Poder Executivo nos termos do artigo 2º da Lei nº 12.815, de 5 de junho de 2013, que diz: “área do porto organizado: área delimitada por

ato do Poder Executivo que compreende as instalações portuárias e a infraestrutura de proteção e de acesso ao porto organizado” (BRASIL, 2013, p.1).

É fundamental observar que a Secretaria Nacional de Portos e Transportes Aquaviários (SNPTA) classifica os portos marítimos e fluviais com base no tipo de transporte de longa distância ou terrestre e não na localização física. Por exemplo, o Porto de Manaus é geograficamente fluvial/rio, mas é classificado como marítimo no SNPTA por receber navios de linhas oceânicas (BRASIL, 2023).

Além disso, a Lei nº 12.815/2013 (BRASIL, 2013, p.1) define outros tipos de instalações portuárias, tais como:

- Instalação portuária: instalação destinada ao transporte ou armazenamento de produtos com destino ou origem no transporte marítimo, bem como à organização e circulação de pessoas podendo estar dentro ou fora da zona portuária;
- Terminal autorizado: instalação autorizada a operar, situada fora da área portuária designada, utilizada para o transporte de pessoas e/ou armazenamento de cargas com destino ou provenientes de transporte aquaviário, incluindo as seguintes modalidades:
 - a) Terminal de uso privado (TUP): instalação portuária situada fora da área portuária designada e operada mediante autorização;
 - b) Estação de transbordo de cargas: instalação portuária autorizada, situada fora de uma região portuária designada e utilizada apenas para o transbordo de carga em vias navegáveis interiores ou navios de cabotagem;
 - c) Instalação portuária pública de pequeno porte: instalação portuária destinada ao transporte de pessoas ou cargas em embarcações de navegação interior, situada fora do porto organizado e que atua através de autorização; e Instalação portuária de turismo: instalação portuária utilizada para embarque, desembarque e trânsito de passageiros, tripulantes e bagagens bem como para provimento e abastecimento de insumos para embarcações turísticas, sendo operado por arrendamento ou autorização.

Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2026), em 2025 o Brasil movimentou 1.403.132.358 de toneladas, incluindo terminais autorizados e portos organizados. A Tabela 5 apresenta a movimentação entre 2022 e 2025.

Tabela 5. Movimentação por tipo de instalação portuária (2022-2025)

2022			
Tipo de Instalação	Peso Carga Bruta	Em TEUs	Dist. % (peso carga bruta)
Terminal Autorizado	798.408.726	7.570.938	65,4%
Porto Organizado	422.210.541	4.127.375	34,6%
Total	1.220.619.267	11.698.313	100,0%
2023			
Tipo de Instalação	Peso Carga Bruta	Em TEUs	Dist. % (peso carga bruta)
Terminal Autorizado	853.881.311	7.122.313	65,4%
Porto Organizado	451.224.266	4.505.442	34,6%
Total	1.305.105.577	11.627.755	100,0%
2024			
Tipo de Instalação	Peso Carga Bruta	Em TEUs	Dist. % (peso carga bruta)
Terminal Autorizado	846.921.885	8.989.726	64,0%
Porto Organizado	475.564.461	4.918.145	36,0%
Total	1.322.486.346	13.907.871	100,0%
2025			
Tipo de Instalação	Peso Carga Bruta	Em TEUs	Dist. % (peso carga bruta)
Terminal Autorizado	906.142.442	9.959.619	64,6%
Porto Organizado	496.989.916	5.360.346	35,4%
Total	1.403.132.358	15.319.965	100,0%

Fonte: Elaboração própria, com dados da ANTAQ (2026).

A análise da movimentação portuária brasileira entre 2022 e 2025 evidencia crescimento consistente do volume total transportado no país, que passou de aproximadamente 1,22 bilhão de toneladas em 2022 para 1,40 bilhão de toneladas em 2025, representando expansão acumulada superior a 15% no período. Observa-se a predominância dos terminais autorizados, que responderam por cerca de 65% da carga bruta movimentada em todos os anos analisados, alcançando 906,1 milhões de toneladas em 2025. Os portos organizados, por sua vez, ampliaram gradualmente sua movimentação em termos absolutos, passando de 422,2 milhões de toneladas em 2022 para 497 milhões em 2025, mantendo participação próxima de 35% do total movimentado. No que se refere à movimentação containerizada, medida em TEUs, observa-se crescimento relevante ao longo do período, especialmente entre 2024 e 2025, quando o volume total passou de 13,9 milhões para 15,3 milhões de TEUs.

A Tabela 6 apresenta o perfil de carga movimentada por tipo de instalação portuária de 2022 a 2025. Vale distinguir terminais autorizados (privados), de portos públicos, pois estão sujeitos a regimes jurídicos diferentes. O porto organizado (porto público) tem concessão de uso por via licitatória no arrendamento. Já os terminais autorizados são concedidos por outorga de autorização (ESTANISLAU, 2012).

Tabela 6. Perfil de carga movimentada por tipo de instalação portuária (2022 - 2025)

Portos organizados						
2022				2023		
Perfil da Carga	Peso bruto	%	Variação em relação a 2021	Peso bruto	%	Variação em relação a 2022
Granel Sólido	250.201.536	59,30%	▲ 4,7%	288.135.538	63,9%	▲ 15,2%
Carga Containerizada	82.986.275	19,70%	▼ -6,5%	77.669.217	17,2%	▼ -6,4%
Granel Líquido e Gasoso	63.665.214	15,10%	▲ 6,2%	62.297.754	13,8%	▼ -2,1%
Carga Geral	25.357.516	6,00%	▲ 15,8%	23.121.757	5,1%	▼ -8,8%
Total	422.210.541	100%		451.224.266	100%	
2024				2025		
Perfil da Carga	Peso bruto	%	Variação em relação a 2023	Peso bruto	%	Variação em relação a 2024
Granel Sólido	287.802.202	60,5%	▼ -0,1%	301.536.746	60,70%	▲ 4,8%
Carga Containerizada	99.871.165	21,0%	▲ 28,6%	107.694.120	21,70%	▲ 7,8%
Granel Líquido e Gasoso	61.984.246	13,0%	▼ -0,5%	61.336.649	12,30%	▼ -1,0%
Carga Geral	25.906.847	5,4%	▲ 12,0%	26.422.400	5,30%	▲ 2,0%
Total	475.564.461	100%		496.989.915	100%	
Terminais autorizados (TUP)						
Perfil da Carga	Peso bruto	%	Variação em relação a 2021	Peso bruto	%	Variação em relação a 2022
2022				2023		
Granel Sólido	465.235.847	58,3%	▼ -0,6%	502.349.927	58,8%	▲ 8,0%
Granel Líquido e Gasoso	249.886.757	31,3%	▲ 0,5%	263.201.312	30,8%	▲ 5,3%
Carga Containerizada	45.399.488	5,7%	▲ 2,6%	50.107.136	5,9%	▲ 10,4%
Carga Geral	37.886.634	4,7%	▼ -2,7%	38.222.937	4,5%	▲ 0,9%
Total	796.293.145	100%		853.881.311	100,0%	
Perfil da Carga	Peso bruto	%	Variação em relação a 2023	Peso bruto	%	Variação em relação a 2024
2024				2025		
Granel Sólido	502.021.670	59,3%	▼ -0,1%	538.129.908	59,4%	▲ 7,2%
Granel Líquido e Gasoso	251.862.532	29,7%	▼ -4,3%	271.688.909	30,0%	▲ 7,9%
Carga Containerizada	53.661.426	6,3%	▲ 7,1%	56.931.532	6,3%	▲ 6,1%
Carga Geral	39.376.257	4,6%	▲ 3,0%	39.392.093	4,3%	▲ 0,0%

Fonte: Elaboração própria, com dados da ANTAQ (2026).

A análise da movimentação evidencia a predominância estrutural das cargas de granel sólido, que representam a maior parcela da movimentação em ambos os tipos de instalações. Nos portos organizados, essa categoria respondeu por cerca de 59,3% da movimentação em 2022, ampliando sua participação para 63,9% em 2023 e mantendo-se próxima de 60% nos anos seguintes, atingindo 301,5 milhões de toneladas em 2025. Destaca-se, também, o crescimento da carga containerizada, que passou de 82,9 milhões de toneladas em 2022 para 107,7 milhões em 2025, elevando sua participação de 19,7% para 21,7%, indicando expansão gradual da containerização nas operações portuárias organizadas.

Nos terminais autorizados, observa-se padrão semelhante de concentração em grânéis sólidos, que representaram cerca de 58% a 59% da movimentação total ao longo do período, alcançando 538,1 milhões de toneladas em 2025. Paralelamente, os grânéis líquidos e gasosos mantiveram participação relevante, próxima de 30% nos terminais autorizados, refletindo a forte presença de terminais privados especializados em combustíveis e derivados de petróleo. De forma geral, os dados indicam a manutenção de um perfil portuário fortemente orientado para cargas a granel, associado à estrutura exportadora baseada em commodities e ao papel estratégico dos terminais privados na movimentação de grandes volumes no sistema portuário brasileiro (ANTAQ, 2026).

Na sequência, a Tabela 7 demonstra a participação dos dez primeiros ports organizados por volume movimentado em milhões de toneladas de 2022 a 2025.

Tabela 7. Participação dos dez primeiros ports organizados por volume movimentado em milhões de toneladas – 2022 a 2025

Porto Organizado							
2022				2023			
Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total	Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total
Santos	SP	126.216.637	29,9	Santos	SP	135.901.717	30,1
Paranaguá	PR	52.015.004	12,3	Paranaguá	PR	58.318.875	12,9
Itaguaí	RJ	50.619.463	12,0	Itaguaí	RJ	55.778.923	12,4
Itaqui	MA	33.569.710	8,0	Itaqui	MA	36.329.965	8,1
Suape	PE	24.726.350	5,9	Rio Grande	RS	25.888.360	5,7
Rio Grande	RS	24.175.428	5,7	Suape	PE	24.015.152	5,3
Vila do Conde	PA	17.893.545	4,2	São Francisco do Sul	SC	16.833.775	3,7
Santarém	PA	13.234.914	3,1	Vila do Conde	PA	16.788.472	3,7
São Francisco do Sul	SC	12.650.992	3,0	Santarém	PA	15.944.968	3,5
Rio de Janeiro	RJ	11.286.266	2,7	Rio de Janeiro	RJ	11.062.331	2,5
2024				2025			
Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total	Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total
Santos	SP	138.692.349	29,2	Santos	SP	142.819.073	28,7
Itaguaí	RJ	60.678.241	12,8	Paranaguá	PR	66.408.475	13,4
Paranaguá	PR	59.280.249	12,5	Itaguaí	RJ	62.835.315	12,6
Itaqui	MA	33.884.494	7,1	Itaqui	MA	36.771.880	7,4
Rio Grande	RS	29.318.642	6,2	Rio Grande	RS	31.634.709	6,4
Suape	PE	24.841.581	5,2	Suape	PE	24.253.346	4,9
Vila do Conde	PA	20.162.500	4,2	Vila do Conde	PA	21.313.049	4,3
São Francisco do Sul	SC	16.960.975	3,6	Santarém	PA	18.547.010	3,7
Santarém	PA	16.378.267	3,4	São Francisco do Sul	SC	17.540.881	3,5
Rio de Janeiro	RJ	15.585.734	3,3	Rio de Janeiro	RJ	16.905.773	3,4

Fonte: Elaboração própria, com dados da ANTAQ (2026).

Verifica-se que entre 2022 e 2025 a elevada concentração da movimentação de cargas em um número reduzido de instalações portuárias, com destaque consistente para o Porto de

Santos. Ao longo de todo o período, Santos manteve ampla liderança, respondendo por cerca de 29,9% da movimentação total em 2022, 30,1% em 2023, 29,2% em 2024 e 28,7% em 2025, com volume que evoluiu de 126,2 milhões para 142,8 milhões de toneladas. Na sequência, os portos de Paranaguá e Itaguaí consolidaram-se como os principais polos logísticos após Santos, mantendo participações próximas de 12% a 13% do total movimentado, com Paranaguá alcançando 13,4% em 2025 e Itaguaí 12,6% no mesmo ano. Também se destacam portos estratégicos como Itaquí e Rio Grande, que registraram participações entre 6% e 8%, reforçando sua relevância nos corredores logísticos de graneis minerais e agrícolas. Observa-se, ainda, a presença constante dos portos da região Norte, como Vila do Conde e Santarém, com participações entre 3% e 4%, refletindo a crescente importância do chamado Arco Norte para o escoamento das exportações brasileiras. De modo geral, os dados indicam relativa estabilidade na composição do *ranking* portuário nacional, com pequenas variações de posição entre alguns portos, mas mantendo-se elevada concentração da movimentação nos principais complexos portuários do país (ANTAQ, 2026).

A Tabela 8 apresenta a participação dos dez primeiros terminais autorizados por volume movimentado em milhões de toneladas - 2022 a 2025.

Tabela 8. Participação dos dez primeiros terminais autorizados e dos dez primeiros portos organizados por volume movimentado em milhões de toneladas de 2022 a 2025

Terminal Autorizado							
2022				2023			
Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total	Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total
Term. Marít. de P. da Madeira	MA	167.995.183	21,0	Term. Marít. de P. da Madeira	MA	166.334.878	19,5
Term. de Tubarão	ES	67.977.082	8,5	Term. de Tubarão	ES	75.996.732	8,9
Term. Aquav.. de Ang. dos Reis	RJ	59.786.965	7,5	Term. Aquav.. de Ang. dos Reis	RJ	63.666.665	7,5
Term Aq. de São Seb. (Alm. Barr.)	SP	58.896.004	7,4	Term Aq. de São Seb. (Alm. Barr.)	SP	57.520.759	6,7
Term. de Petr. TPET/TOIL - Açú	RJ	43.361.701	5,4	Term. de Petr. TPET/TOIL - Açú	RJ	57.378.296	6,7
Term. da Ilha Guaíba - TIG	RJ	27.659.232	3,5	Term. da Ilha Guaíba - TIG	RJ	29.523.094	3,5
Porto do Açú - Term. de Minério	RJ	21.419.893	2,7	Porto Sudeste do Brasil S/A	RJ	27.397.709	3,2
Term. Aq. de Madre de Deus	BA	19.928.675	2,5	Porto do Açú - Term. de Minério	RJ	24.043.285	2,8
Porto Sudeste do Brasil S/A	RJ	18.526.944	2,3	Term. Aquav. de Madre de Deus	BA	20.937.232	2,5
Term. Aquaviário da Ilha D'Água	RJ	17.157.550	2,1	Terminal Portuário do Pecém	CE	17.062.051	2,0
2024				2025			
Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total	Instalação Portuária	UF	ton. Bruta	%/total
Term. Marít. de P. da Madeira	MA	175.777.453	20,8	Term. Marít. de P. da Madeira	MA	172.389.190	19,0
Term. de Tubarão	ES	77.421.175	9,1	Term. de Tubarão	ES	87.407.355	9,6
Term. Aquav.. de Ang. dos Reis	RJ	62.721.203	7,4	Term. Aquav.. de Ang. dos Reis	RJ	70.423.240	7,8
Term Aq. de São Seb. (Alm. Barr.)	SP	53.307.535	6,3	Term. de Petr. TPET/TOIL - Açú	RJ	60.439.367	6,7
Term. de Petr. TPET/TOIL - Açú	RJ	50.237.444	5,9	Term Aq. de São Seb. (Alm. Barr.)	SP	54.053.615	6,0
Term. da Ilha Guaíba - TIG	RJ	32.133.788	3,8	Term. da Ilha Guaíba - TIG	RJ	31.460.695	3,5
Porto do Açú - Term. de Minério	RJ	25.014.985	3,0	Porto Sudeste do Brasil S/A	RJ	30.594.398	3,4
Porto Sudeste do Brasil S/A	RJ	24.719.164	2,9	Porto do Açú - Term. de Minério	RJ	24.240.712	2,7
Term. Aq. de Madre de Deus	BA	20.806.846	2,5	Term. Portuário do Pecém	CE	20.515.856	2,3
Term. Portuário do Pecém	CE	19.042.334	2,2	Term. Aq. de Madre de Deus	BA	20.159.705	2,2

Fonte: Elaboração própria, com dados da ANTAQ (2023).

Como nos portos organizados, observa-se elevada concentração da movimentação em poucos complexos portuários especializados. O Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, no Maranhão, manteve-se como o principal terminal privado do país, com participação entre 19% e 21% do total movimentado ao longo do período e volumes superiores a 165 milhões de toneladas anuais. Na sequência, destaca-se o Terminal de Tubarão, no Espírito Santo, cuja participação variou entre 8,5% e 9,6%, alcançando 87,4 milhões de toneladas em 2025. Também apresentam relevância os Terminais Aquaviário de Angra dos Reis e de São Sebastião (Almirante Barroso), com participações entre 6% e 8%, associados principalmente à movimentação de grãos líquidos e derivados de petróleo.

Observa-se, ainda, a forte presença de terminais localizados no estado do Rio de Janeiro, como os terminais TPET/TOIL do Porto do Açu, Ilha Guaíba (TIG) e Porto Sudeste, que figuram de forma recorrente entre os principais TUPs do país, refletindo a importância do estado nos fluxos logísticos de commodities minerais e energéticas. De modo geral, os dados indicam elevada especialização desses terminais na movimentação de grãos, especialmente minério de ferro e combustíveis, reforçando o papel central dos terminais privados na movimentação de grandes volumes no sistema portuário brasileiro (ANTAQ, 2026).

A Tabela 9 apresenta outra característica dessas instalações: a composição das dez mercadorias mais movimentadas tanto nos terminais autorizados quanto nos portos organizados. Considerando o período de 2022 a 2025, as dez principais mercadorias representam, em média, 84% do total movimentado nos portos organizados e 93,2% nos terminais autorizados, evidenciando elevado grau de concentração da movimentação portuária brasileira.

Nos portos organizados, observa-se maior diversidade de cargas movimentadas. As mercadorias containerizadas apresentam a maior participação ao longo do período, com média de aproximadamente 19,9% da movimentação total, seguidas pela soja, com cerca de 14,9%, e pelo minério de ferro, com 11,3%. Também se destacam milho (8,3%), fertilizantes (7,8%) e açúcar (5,5%), refletindo a forte presença de produtos do complexo agroindustrial e mineral na pauta de movimentação dessas instalações.

Tabela 9. Composição das dez primeiras mercadorias mais movimentadas nos Terminais Autorizados e nos Portos Organizados – 2022 a 2025

Portos Organizados			
Nomenclatura Simplificada		Nomenclatura Simplificada	
2022	%	2023	%
Contêineres	19,7%	Contêineres	17,2%
Soja	13,0%	Soja	15,9%
Minério de Ferro	10,8%	Minério de Ferro	11,3%
Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	9,6%	Milho	10,4%
Milho	8,6%	Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	8,9%
Adubos (fertilizantes)	7,4%	Adubos (fertilizantes)	7,4%
Açúcar	5,1%	Açúcar	5,3%
Resíduos da Extração do Óleo de Soja	3,5%	Resíduos da Extração do Óleo de Soja	3,7%
Pasta de Celulose	2,5%	Pasta de Celulose	2,0%
Ferro e Aço	2,1%	Ferro e Aço	1,9%
2024		2025	
Contêineres	21,0%	Contêineres	21,7%
Soja	14,9%	Soja	15,8%
Minério de Ferro	11,4%	Minério de Ferro	11,7%
Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	8,3%	Adubos (fertilizantes)	8,2%
Adubos (fertilizantes)	8,0%	Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	8,0%
Milho	7,0%	Milho	7,3%
Açúcar	6,1%	Açúcar	5,3%
Resíduos da Extração do Óleo de Soja	3,5%	Resíduos da Extração do Óleo de Soja	3,4%
Pasta de Celulose	2,1%	Pasta de Celulose	2,0%
Ferro e Aço	1,9%	Ferro e Aço	2,0%
Terminal Autorizado			
2022		2023	
Minério de Ferro	39,5%	Minério de Ferro	39,5%
Petróleo e Derivados (Óleo Bruto)	24,2%	Petróleo e Derivados (Óleo Bruto)	24,7%
Contêineres	5,7%	Soja	6,7%
Soja	5,6%	Contêineres	5,9%
Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	5,4%	Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	4,8%
Bauxita	3,6%	Milho	3,2%
Milho	3,3%	Bauxita	3,2%
Carvão Mineral	2,0%	Ferro e Aço	2,0%
Ferro e Aço	2,0%	Carvão Mineral	1,8%
Pasta de Celulose	1,7%	Pasta de Celulose	1,5%
2024		2025	
Minério de Ferro	40,7%	Minério de Ferro	40,6%
Petróleo e Derivados (Óleo Bruto)	23,3%	Petróleo e Derivados (Óleo Bruto)	23,8%
Contêineres	6,3%	Soja	6,7%
Soja	6,1%	Contêineres	6,3%
Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	5,0%	Petróleo e Derivados (Sem Óleo Bruto)	4,9%
Bauxita	3,4%	Bauxita	3,3%
Milho	2,7%	Milho	2,8%
Carvão Mineral	2,0%	Ferro e Aço	1,8%
Ferro e Aço	1,9%	Carvão Mineral	1,8%
Pasta de Celulose	1,6%	Pasta de Celulose	1,7%

Fonte: Elaboração própria com dados da ANTAQ (2026).

Nos terminais autorizados, por sua vez, observa-se estrutura ainda mais concentrada e especializada. O minério de ferro domina amplamente a movimentação, com participação média de cerca de 40,1%, seguido por petróleo e derivados (óleo bruto), com aproximadamente 24% do total movimentado. As demais mercadorias apresentam participações significativamente menores, destacando-se contêineres (6,0%), soja (6,3%), petróleo e derivados sem óleo bruto (5,0%) e bauxita (3,4%). De forma geral, os dados evidenciam diferenças estruturais entre os dois tipos de instalações: enquanto os portos organizados apresentam perfil mais diversificado de cargas, incluindo maior participação de mercadorias containerizadas e produtos do agronegócio, os terminais autorizados apresentam forte especialização na movimentação de *commodities* minerais e energéticas.

A Tabela 10 apresenta os tipos de navegação mais utilizados pelas instalações portuárias brasileiras entre 2022 e 2025. Nos portos organizados, observa-se clara predominância da navegação de longo curso, responsável por cerca de 80% da movimentação total ao longo de todo o período, variando entre 80,1% e 81,3%. Esse padrão evidencia a forte orientação dessas instalações para o comércio exterior. A cabotagem aparece como a segunda modalidade mais relevante, com participação próxima de 15% da movimentação, enquanto a navegação interior apresenta participação mais reduzida, variando entre 3,5% e 3,9%. No que se refere ao sentido do longo curso, observa-se predominância das exportações, que representam cerca de 70% a 74% da movimentação entre 2022 e 2024, atingindo 81,1% em 2025, o que reflete o papel dos portos organizados no escoamento da produção nacional destinada ao mercado externo.

Nos terminais autorizados, também se verifica predominância da navegação de longo curso, embora com participação relativamente menor do que nos portos organizados, variando entre 64,6% e 67,1% da movimentação total. Em contrapartida, a cabotagem apresenta participação significativamente mais elevada, situando-se entre 25% e 27,5%, indicando maior utilização desses terminais para fluxos logísticos internos ao território nacional. A navegação interior mantém participação entre 6,8% e 7,9%, superior à observada nos portos organizados. Quanto ao sentido da navegação de longo curso, observa-se predominância ainda mais acentuada das exportações, que representam aproximadamente 87% a 88% do total movimentado, enquanto as importações permanecem próximas de 12%, evidenciando a forte especialização desses terminais na movimentação de *commodities* destinadas ao mercado internacional. De forma geral, os dados indicam que tanto os portos organizados quanto os terminais autorizados são fortemente orientados para o comércio exterior, embora os terminais privados apresentem participação relativamente maior de cabotagem e navegação interior.

Tabela 10. Tipos de navegação mais utilizados pelas instalações portuárias em milhões de toneladas – 2022 a 2025

Porto Organizado					
2022			2023		
Tipo de navegação	Peso bruto	Percentual	Tipo de navegação	Peso bruto	Percentual
Longo Curso	339.712.592	80,5%	Longo Curso	367.053.163	81,3%
Cabotagem	65.632.995	15,5%	Cabotagem	65.379.084	14,5%
Interior	14.694.410	3,5%	Interior	16.641.740	3,7%
Sentido do longo curso			Sentido do longo curso		
Exportação	Importação	-	Exportação	Importação	-
70,6%	29,4%	-	73,8%	26,2%	-
2024			2025		
Longo Curso	381.067.084	80,1%	Longo Curso	401.425.852	80,8%
Cabotagem	74.423.478	15,6%	Cabotagem	75.567.770	15,2%
Interior	18.349.318	3,9%	Interior	19.333.140	3,9%
Exportação	Importação	-	Exportação	Importação	-
70,8%	29,2%	-	81,1%	18,9%	-
Terminal Autorizado					
2022			2023		
Longo Curso	515.454.111	64,6%	Longo Curso	559.843.026	65,6%
Cabotagem	219.854.512	27,5%	Cabotagem	225.618.592	26,4%
Interior	62.014.328	7,8%	Interior	67.375.052	7,9%
Sentido do longo curso			Sentido do longo curso		
Exportação	Importação	-	Exportação	Importação	-
87,90%	12,10%	-	88,10%	11,90%	-
2024			2025		
Longo Curso	568.571.890	67,1%	Longo Curso	604.962.604	66,8%
Cabotagem	219.460.983	25,9%	Cabotagem	228.152.685	25,2%
Interior	57.909.077	6,8%	Interior	71.980.396	7,9%
Sentido do longo curso			Sentido do longo curso		
Exportação	Importação	-	Exportação	Importação	-
87,20%	12,80%	-	87,80%	12,20%	-

Fonte: Elaboração própria, com dados da ANTAQ (2026).

2.3 Portos pelo mundo

Como mencionado anteriormente, mais de 80% do comércio mundial é feito por via marítima. Isso é de suma importância para o desenvolvimento do comércio internacional e, consequentemente, para a balança comercial de inúmeros países. Outro aspecto muito importante é regulamentação ambiental da indústria de transporte marítimo. A seguir, é apresentado um breve histórico dessa regulamentação.

A regulamentação internacional das atividades marítimas é, em geral, estabelecida por meio de convenções internacionais, que constituem os principais instrumentos normativos do setor. Nesse contexto, a Organização Marítima Internacional (OMI – *International Maritime Organization*) desempenha papel central na elaboração e atualização dessas convenções. Entre os principais instrumentos destacam-se a Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS – *Safety of Life at Sea*), cuja origem remonta a 1914, e a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição do Mar por Óleo (OILPOL – *International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil*), adotada em 1954 (IMO, s.d.; STOPFORD, 2009).

A fim de reduzir substancialmente a poluição intencional do ambiente marinho por óleo e outras substâncias nocivas, bem como minimizar o despejo acidental desses poluentes, a Conferência Internacional sobre Poluição Marinha desenvolveu, em 1973, a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios, destinada a substituir a OILPOL de 1954. Posteriormente, essa convenção foi modificada pelo Protocolo de 1978, sendo ambos os instrumentos tratados como um único acordo, conhecido como MARPOL 73/78. Seus artigos e protocolos estabelecem a estrutura geral, enquanto os anexos contêm regulamentações detalhadas e rigorosas voltadas à prevenção da poluição marinha (IMO, s.d.; STOPFORD, 2009).

Atualmente, a MARPOL 73/78 é composta por seis anexos que estabelecem regulamentações voltadas à prevenção, controle e redução da poluição do ambiente marinho causada por navios. Esses anexos abrangem diferentes tipos de poluentes e constituem o principal instrumento internacional de proteção ambiental no transporte marítimo (IMO, s.d.). O Quadro 2 apresenta um resumo dessas regulamentações:

Quadro 2. Anexos da MARPOL 73/78 para a preservação do meio ambiente marinho/portuário

Anexo I da MARPOL – Regulamento para a prevenção da poluição por óleo
Anexo II da MARPOL – Regulamento para o controle da poluição por substâncias líquidas nocivas
Anexo III da MARPOL – Regulamento para a prevenção da poluição por substâncias nocivas transportadas por mar em forma embalada
Anexo IV da MARPOL – Regulamento para a prevenção da poluição por esgotos de navios
Anexo V da MARPOL – Regulamento para a prevenção da poluição por lixo proveniente de navios
Anexo VI da MARPOL – Regulamento para a prevenção da poluição atmosférica por navios

Fonte: Elaboração própria, com base na IMO (s.d.)

Além da MARPOL, existem outras convenções internacionais relevantes voltadas à proteção do meio ambiente marinho, abordando diferentes tipos de impactos e responsabilidades no transporte marítimo (IMO, s.d.). O Quadro 3 apresenta uma síntese dessas convenções.

Quadro 3. Convenções para a preservação do meio ambiente marinho/portuário

Convenção sobre a prevenção da poluição marinha por despejo de resíduos e outros materiais - conhecida como Convenção de Londres (1972)
Convenção internacional sobre o controle de substâncias anti-incrustantes nocivas em navios, 2001
Convenção internacional sobre responsabilidade civil por danos causados pela poluição por óleo de banca, 2001
Convenção internacional para o controle e gestão de água de lastro e sedimentos de navios, 2004

Fonte: Elaboração própria, com base na IMO (s.d.)

A globalização e a revolução nos transportes, especialmente a containerização, influenciaram substantivamente o comércio mundial, tornando-se uma questão central para quase todos os segmentos da indústria, impactando diretamente os portos mundo a fora. Ao analisar os principais portos em operação no mundo, o presente trabalho optou por realizar uma breve descrição dos vinte maiores portos em volume de movimentação na atualidade. O Quadro 4 apresenta a relação dos vinte maiores portos do mundo em 2022.

Quadro 4. Vinte maiores portos do mundo em 2022

Portos	Países
Shanghai	China
Singapura	Singapura
Ningbo-Zhoushan	China
Shenzhen	
Guangzhou	
Busan	Coréia do Sul
Qingdao	China
Hong Kong	Região adm. especial da China
Tianjin	China
Roterdã	Holanda
Jebel Ali:	Emirados Árabes Unidos
Klang Klang	Malásia
Xiamen	China
Antuérpia	Bélgica
Kaohsiung	Taiwan
Porto de <i>Los Angeles</i>	EUA
Porto de Hamburgo	Alemanha
Tanjung Pelepas	Malásia
Laem Chabang	Tailândia
Liaoning (Dalian)	China

Fonte: Elaboração própria, com dados da WORLD SHIPPING COUNCIL (2024).

2.3.1 Porto de Shanghai – China

Segundo a Global Issues (2017), o Porto de Shanghai está situado em uma das cidades mais desenvolvidas economicamente da China. Shanghai está localizada mais ao centro da costa chinesa que possui 18 mil quilômetros de extensão e abriga o porto no Delta do Rio *Yangtze*. A região econômica do *Yangtze* contribui com mais de 40% do PIB da China, sendo responsável por 25% do total das cargas de importação e exportação do país (GLOBAL ISSUES, 2017).

Em 2022, pelo décimo terceiro ano consecutivo, o porto de Shanghai se manteve como o porto de contêineres mais movimentado do mundo, transportando um total de 47,3 milhões de TEUs (THE MARITIME EXECUTIVE, 2023).

Em 2022, o porto de Shanghai movimentou 513,7 milhões de toneladas. Entre janeiro e julho de 2023, o porto movimentou 323 milhões de toneladas de carga, um aumento de 11% em relação ao ano anterior (PORTNEWS, 2023).

2.3.2 Porto de Singapura: Singapura

Segundo Brasil (2023), Singapura está localizada no cruzamento das principais linhas marítimas da Ásia, o que lhe dá a reputação de centro de alcance global. O porto de Singapura é um dos principais centros de distribuição de mercadorias no continente e isso tem sido um fator chave para o crescimento da economia de Singapura.

O Porto de Singapura movimentou cerca de 37,5 milhões de contêineres (TEUs) em 2021, tornando-se o segundo maior terminal de contêineres do mundo, ficando atrás apenas do porto de Shanghai, na China (BRASIL, 2023).

A posição de destaque regional e mundial é atribuída às características sofisticadas e modernas do porto. A *PSA Corporation* é a principal operadora dos terminais de contêineres, os quais estão presentes em 4 regiões: Tanjong Pagar, Keppel, Brani, Pasir Panjang. Entretanto, esses quatro terminais têm sido gradualmente desativados e transferidos para um quinto terminal, chamado Tuas (BRASIL, 2023).

De acordo com Brasil (2023), o terminal de Tuas tem capacidade para movimentar cerca de 44 milhões de TEUs anualmente, transformando-se em um megaporto de movimentação de contêineres na fronteira ocidental de Singapura. As operações da primeira fase do novo porto do Tuas tiveram início em setembro de 2022, e o porto continuará em obras até 2040, quando terá capacidade para movimentar até 65 milhões de TEUs (BRASIL, 2023).

Segundo a *PSA Singapore* (2023), além do Terminal de Tuas, o Terminal de Automóveis Pasir Panjang (PPAT) é o centro de transbordo de veículos da PSA e o primeiro terminal automotivo dedicado de Cingapura.

2.3.3 Porto de Ningbo-Zhoushan: China

O porto de Ningbo Zhoushan é o terceiro maior porto do mundo, fazendo conexão entre as rotas comerciais mais movimentadas do Oceano Pacífico com a região econômica do Delta do Rio Yangtze. Em 2019, a movimentação de contêineres no porto atingiu 27, 5 milhões de TEUs, e 1,12 bilhão de toneladas total (ZHE JIANG SEA PORT, 2023).

De acordo com Wright (2023), o porto de Ningbo Zhoushan é o porto marítimo mais antigo da China. Normalmente, as cargas movimentadas por ele são destinadas, principalmente, à Oceania e Américas do Norte e do Sul. São produtos manufaturados e de carga bruta como: carvão, petróleo bruto, produtos petrolíferos, produtos químicos líquidos, máquinas e cereais. O porto tem conexões com mais de 590 portos adicionais em todos os seis continentes e em quase 100 nações.

O porto de Ningbo Zhoushan movimenta cerca de 90% dos produtos petrolíferos e cerca de 45% do minério de ferro do Cinturão Económico do Rio Yangtze (CGTN, 2023).

2.3.4 Porto de Shenzhen: China

O porto de Shenzhen é composto por vários portos distribuídos ao longo da costa de Shenzhen, província de Guangdong, sul da China. Situado no Delta do rio das Pérolas, o Porto de Shenzhen acomoda 39 empresas marítimas que operam 131 rotas internacionais que passam pelo porto. Em 2022, o porto chinês movimentou mais de 30 milhões de TEUs. Também em 2022, foi introduzida uma rota marítima internacional que liga Shenzhen a Hong Kong, movimentando mais de 1,44 milhão de TEUs de contêineres e mais de 6,89 milhões de toneladas de mercadorias (GUELCOS, 2023).

Embora mais de 300 rotas marítimas liguem este porto a mais de 100 países, tornando-o um centro de renome para serviços de transbordo, as suas principais rotas comerciais e serviços de ferry têm origem em cidades próximas do Delta do rio das Pérolas, nomeadamente Hong Kong, Zhuhai e Macau. Além disso, a região de Shenzhen é conhecida como uma espécie de Vale do Silício pois abriga gigantes da tecnologia como Tencent, Huawei e SenseTime (WRIGHT, 2023).

Segundo a Guelcos (2021), o porto de Shenzhen movimenta de 90% dos produtos eletrônicos vendidos para o mundo, contribuindo para que a China se mantenha como maior exportadora desse tipo de produto.

2.3.5 Porto de Guangzhou: China

O Porto de Guangzhou é adjacente ao Mar da China Meridional e está localizado no centro geométrico do Delta do rio das Pérolas. A área portuária está conectada à rede de transporte tridimensional de ferrovias, trilhos de alta velocidade, rodovias, aviação e rios interiores do país. O terminal tem funções que abrangem indústrias especializadas em contêineres, carvão, minério, grãos, petroquímica e navios Ro-Ro¹. É o maior porto central de energia, grãos, automóveis e cargas a granel do sul da China. Em 2022, o porto movimentou 559 milhões de toneladas de carga total e 23,3 milhões de TEUs em contêineres. Possui um total de 199 rotas de transporte de contêineres, incluindo 154 de comércio exterior (GUANGZHOU PORT GROUP, 2022).

Assim como o porto de Shenzhen, o porto de Guangzhou integra vários portos menores em sua infraestrutura. Existem três portos principais: Huangpu, Xinsha e Nansha. Mais de 70% do tráfego marítimo que passa pela região portuária é movimentado por Nansha, principal zona portuária de Guangzhou. Para atender os maiores navios porta-contêineres do mundo, seu cais é equipado com guindastes de última geração que podem atingir até 65 metros. Os terminais do porto são utilizados para embarque e desembarque, incluindo armazenagem alfandegada e serviços de carga em contêineres. Estes terminais processam produtos industriais, agrícolas, minério, aço, carvão, petróleo, automóveis, fertilizantes químicos e cereais (WRIGHT, 2023).

2.3.6 Porto de Busan: Coreia do Sul

De acordo com Wright (2023), o porto de Busan é o maior porto da Ásia Oriental, localizado a 320 quilômetros ao sul de Seul, na Coreia do Sul. Também chamado de Busan Harbor, é composto quatro portos menores: o porto Sul, o porto Norte, o porto Dadaepo e o porto Gamcheon e por mais dois terminais (terminal internacional de passageiros e o terminal de contêineres *Gamman*). Os principais parceiros comerciais do Porto de Busan são: Japão, Estados Unidos, China, Vietnã, Alemanha e Hong Kong. Carros, peças de veículos, navios, fertilizantes, carvão, minério de ferro, petróleo bruto, sucata, couro, madeira bruta, gorduras e óleos, carnes, açúcar, areia natural são algumas mercadorias movimentadas pelo porto.

De acordo com a Autoridade Portuária de Busan (2023), o porto de Busan é o segundo porto de transbordo² mais movimentado do mundo, movimentando um volume de carga de

¹ Segundo Bueno (2023): “Ro-Ro” é a sigla utilizada para definir os navios cargueiros *Roll on-Roll off*. É um segmento específico dentro do universo da navegação. Numa tradução livre, *Roll on-Roll off* significa Rolar para dentro-Rolar para fora”.

² Permite a transferência de cargas para diferentes navios, otimizando o uso das linhas marítimas (SONS, 2024).

transbordo de 11,7 milhões de TEUs por ano, com base em uma rede de aproximadamente 500 portos em 150 países ao redor do mundo.

Em 2022, o volume de contêineres movimentado foi de 22,7 milhões de TEUs, ocupando a sétima posição mundial (AUTORIDADE PORTUÁRIA DE BUSAN, 2023).

Com relação aos portos domésticos, em 2022, o porto de *Busan* foi responsável por 76,6% do volume movimentado de contêineres e de 96,8% de participação do volume de transbordo (AUTORIDADE PORTUÁRIA DE BUSAN, 2023).

2.3.7 Porto de Qingdao: China

O porto de Qingdao iniciou suas operações em 1892. Localiza-se entre a região portuária de Bohai Rim e a região portuária do Delta do rio Yangtze, na China. Ocupando uma posição central entre os portos do Nordeste Asiático, o porto é um dos mais abrangentes do mundo, sendo considerado um importante centro de comércio e transporte internacional no Pacífico Ocidental (QINGDAO PORT INTERNATIONAL, 2014).

Segundo Wright (2023), uma das vantagens deste porto reside no fato de ele ser o principal porto da China para o transporte de minério de ferro e de petróleo bruto, principalmente devido à sua capacidade para movimentar os maiores petroleiros e navios do mundo. Os terminais de Dagang, Qianwan, Dongjiakou e as áreas portuárias de Huangdao englobam seus quatro principais terminais. Quando combinados, eles têm capacidade para movimentar mais de 500 milhões de toneladas. O porto de Qingdao possui 96 berços ativos, e é conhecido por ser suficientemente preparado para guindastes grandes, pesados e parcialmente automatizados. Este porto também armazena e transporta mercadorias convencionais como cereais, petróleo, alumínio, aço e ferro, além de outras mercadorias sólidas e a granel.

Segundo a China Daily (2023), em 2022, a movimentação de contêineres atingiu 26,82 milhões de unidades equivalentes a vinte pés (TEUs). A movimentação de carga geral e granel sólido alcançou 238 milhões de toneladas, representando um aumento de 13,1%, e 13,3% em relação a 2021, respectivamente.

2.3.8 Porto de Hong Kong: região administrativa especial da China

Segundo o Hong Kong Marine Department (2026), o Porto de Hong Kong destaca-se historicamente como um dos principais centros marítimos da Ásia, beneficiando-se de um porto natural abrigado que oferece condições seguras de acesso e operação para embarcações provenientes de diversas regiões do mundo. Sua localização estratégica no Delta do Rio das Pérolas, com acesso direto ao Mar do Sul da China, posiciona o porto no centro das rotas

comerciais do Extremo Oriente e da bacia Ásia-Pacífico, uma das regiões economicamente mais dinâmicas do comércio global (HONG KONG MARINE DEPARTMENT, 2026).

Essa posição geográfica favoreceu o desenvolvimento de Hong Kong como um importante *hub* logístico internacional e porto de transbordo para a China continental, concentrando significativa movimentação de cargas e elevado fluxo de navios. Em 2024, aproximadamente 100,6 mil embarcações de longo curso e fluviais escalaram o porto, evidenciando sua relevância para as cadeias globais de transporte marítimo (HONG KONG MARINE DEPARTMENT, 2026).

A infraestrutura portuária é composta, principalmente, pelos terminais de contêineres de Kwai Tsing, localizados na área noroeste do Porto Vitória, que contam com nove terminais, 24 berços de atracação e cerca de 7.794 metros de frente de cais em águas profundas, distribuídos em uma área aproximada de 279 hectares. Esses terminais possuem capacidade de movimentação superior a 20 milhões de TEUs por ano e, em 2024, o porto registrou cerca de 13,7 milhões de TEUs movimentados, consolidando-se entre os principais portos de contêineres do mundo (HONG KONG MARINE DEPARTMENT, 2026).

2.3.9 Porto de Tianjin: China

O porto de Tianjin está localizado na junção do chamado cinturão urbano Pequim-Tianjin e do círculo econômico da região da orla de Bohai. É um porto abrangente e importante para o comércio exterior no norte da China, servindo 14 províncias, cidades e regiões autônomas e ligando o nordeste da Ásia com o centro-oeste Asiático. Possui terminais de contêineres avançados, terminais especializados no manuseio de coque, carvão, minério, Ro-Ro e um terminal de petróleo bruto de 300.000 toneladas (TIANJIN PORT DEVELOPMENT HOLDINGS LIMITED, 2022).

Em 2022, o porto de Tianjin foi classificado como o oitavo maior porto da China em termos de movimentação total de carga e o sexto maior porto em termos de movimentação total de contêineres. Também neste ano, alcançou a movimentação carga total de 443 milhões de toneladas. A carga não containerizada somou 241 milhões de toneladas e a movimentação total de contêineres foi 19,83 milhões de TEUs (TIANJIN PORT DEVELOPMENT HOLDINGS LIMITED, 2022).

2.3.10 Porto de Roterdã: Holanda

Roterdã é o maior, mais movimentado e mais importante porto da Europa. É conhecido pelo seu setor petroquímico, capacidade de transbordo e dedicação em cumprir as

regulamentações ambientais e minimizar a pegada de carbono das suas operações. Além disso, o porto de Roterdã está ligado a uma rede rodoviária e ferroviária que lhe permite fornecer todos os tipos de produtos convencionais ou industriais para a Europa (WRIGHT, 2023).

De acordo com o Relatório Anual da Autoridade Portuária de Roterdã (2022), a guerra entre Rússia e Ucrânia impactou a movimentação de mercadorias no porto. Um exemplo é o aumento de 63,9% na movimentação do gás natural liquefeito (GNL). Existe uma forte procura de GNL na Europa como alternativa ao gás natural que entra na Europa através de gasoduto proveniente da Rússia. Além disso, das 470 milhões de toneladas movimentadas no porto de Roterdã, em 2021, aproximadamente 71 milhões de toneladas estavam ligadas à Rússia.

Ainda segundo o Relatório Anual da Autoridade Portuária de Roterdã (2022), cerca de 33% do petróleo bruto e 30% do carvão estavam ligados à Rússia, tal como 25% do GNL e 21% dos produtos petrolíferos. A Rússia também exportou produtos como aço, cobre, alumínio e níquel através do porto de Roterdã. A movimentação de granéis sólidos e líquidos foi de 80,1 e 212,7 milhões de toneladas, respectivamente. O volume de tráfego de contêineres, em 2022, foi de 14,4 milhões de TEUs.

2.3.11 Porto de Jebel Ali: Dubai (Emirados Árabes Unidos)

O porto de Jebel Ali é o segundo maior porto artificial do mundo, atrás do porto de Shanghai. Além disso, é o maior porto do Oriente Médio. O porto de Jebel Ali desempenha um papel significativo no atendimento ao Golfo, ao subcontinente indiano e aos mercados africanos. A diversidade da região e dos mercados atendidos pelo porto de Jebel Ali refletem na natureza da carga importada e exportada. O porto possui especialização no armazenamento e manuseio de todos os tipos de carga, incluindo carga a granel, fracionada e *RoRo*.

De acordo com Dubai Ports World (DP WORD, 2023), o terminal de carga geral de Jebel Ali cobre uma área total de armazenamento de mais de 1,4 milhão de metros quadrados. A estação de carga de contêineres abrange uma área total de 134.343 m², e inclui uma área de armazenamento coberta de 11.900 m² e uma área de armazenamento descoberta de 122.443 m². Os três terminais possuem a capacidade de movimentação de 19,3 milhões de TEUs (DP WORD, 2023). Segundo Bruno (2023), o porto movimentou 14 milhões de TEUs em 2022, um aumento de 1,7% em relação a 2021.

2.3.12 Porto de Klang: Malásia

O porto de Klang, anteriormente conhecido como porto de Swettenham, recebeu seu nome atual em 1971, após a independência da Malásia do domínio britânico. O porto de Klang

tem um enorme significado econômico para a Malásia devido à sua contribuição substancial para a exportação de calçados, fertilizantes, herbicidas e abacaxi. Possui 53 berços de carga em seus quatro terminais de contêineres. Deles, 24 berços movimentam contêineres, 11 berços movimentam cargas de grande porte, 9 berços movimentam carga líquida e 7 berços movimentam carga seca (WRIGHT, 2023).

Existem mais outros dois terminais no porto de Klang, um para navios de cruzeiro, que atende navios de passageiros e outro para balsas. O pátio de contêineres aberto possui 220 mil metros quadrados e armazena, em média, 13 milhões de TEUs anualmente. O porto Oeste, porto Norte e porto Sul são as três áreas portuárias que compõem o Porto de Klang. O porto Oeste é controlado pelo Estado, mas os dois setores portuários restantes são administrados de forma privada pela Autoridade Portuária de Klang (WRIGHT, 2023).

De acordo com o relatório Autoridade Portuária de Klang (PORT KLANG AUTHORITY, 2025), em 2024, o manuseio de contêiner no porto de Klang atingiu 14,06 milhões de TEUs, seguidos de 12,03 milhões de toneladas de granel seco; 9,55 milhões de toneladas de granel líquido e 10,81 milhões de toneladas de carga em geral.

2.3.13 Porto de Xiamen: China

O porto de Xiamen é o porto mais próximo do porto de Taiwan, e se beneficia desta proximidade, principalmente, em relação às importações e às exportações diretas realizadas pelo porto de Taiwan. Após a fusão com o porto de Zhangzhou, em 2010, o porto de Xiamen tornou-se o maior porto marítimo de águas profundas do sudeste da China. São doze zonas que compõem a área portuária, que se estende pelas margens do rio Jiulongjiang e pela ilha de Xiamen. Algumas dessas áreas são: Heping, Shihushan, Dongdu, Gaoqi, Haitian e Liuwudian (WRIGHT, 2023).

De acordo com a Xiamen Port Development Co. (2022), a movimentação total de carga do porto de Xiamen, em 2022, foi 219 milhões de toneladas. Também em 2022, a movimentação total de contêineres atingiu 12,4 milhões de TEUs (XIAMEN PORT DEVELOPMENT CO., 2022).

2.3.14 Porto de Antuérpia: Bélgica

O Porto de Antuérpia-Bruges, localizado na Bélgica, representa um dos principais complexos portuários da Europa e ocupa posição estratégica no eixo logístico conhecido como Hamburgo-Le Havre Range, região que concentra alguns dos mais importantes portos do continente europeu. O complexo portuário resulta da integração operacional entre os portos de

Antuérpia e Zeebrugge, funcionando como um importante *hub* de transporte marítimo e logística internacional (PORT OF ANTWERP-BRUGES, 2025).

Segundo a *Port Technology International* (2026), em 2024, o Porto de Antuérpia-Bruges registrou movimentação total de aproximadamente 278 milhões de toneladas, representando crescimento de 2,3% em relação a 2023, mesmo em um contexto marcado por desafios econômicos e tensões geopolíticas no comércio internacional. O desempenho positivo foi impulsionado, principalmente, pelo segmento de contêineres, que apresentou expansão de 8,9% em tonelagem e 8,1% em TEUs, além de crescimento de 9,2% no volume de contêineres refrigerados (reefer).

Como resultado, o porto ampliou sua participação no eixo portuário europeu conhecido como Hamburg-Le Havre Range, alcançando 30,6% de participação de mercado nos primeiros nove meses de 2024, o que reforça sua relevância como um dos principais hubs logísticos do continente europeu (PORT TECHNOLOGY INTERNATIONAL, 2026).

2.3.15 Porto de Kaohsiung: Taiwan

De acordo com o site do porto de Kaohsiung (2023), este está localizado no sudoeste de Taiwan. Constitui um importante ponto de trânsito para o transporte marítimo entre Ásia, Europa e América. Tem mais de 300 rotas espalhadas por 5 continentes. É um porto natural, sendo responsável por grande parte do volume de carga de importação/exportação de Taiwan, possuindo capacidade para movimentar um montante superior a 10 milhões de TEUs anuais. O porto de Kaohsiung também possui zonas de serviço de energia, indústria pesada, construção naval, matéria-prima petroquímica e fabricação de iates.

Segundo a *Taiwan International Ports Corporation* (2023), o porto movimentou 42,37% do volume total da carga movimentada nos portos comerciais internacionais de Taiwan em 2022, alcançando 114,06 milhões de toneladas. As principais categorias de carga geral transportada incluem carvão e coque, concentrado de minério, petróleo, peças de máquinas, materiais ferrosos, produtos liquefeitos, areia/ cascalho e cimento. Com relação a movimentação de contêiner, o porto alcançou 9,49 milhões de TEUs em 2022 (TAIWAN INTERNATIONAL PORTS CORPORATION, 2023).

2.3.16 Porto de Los Angeles: EUA

É o porto marítimo mais movimentado do hemisfério ocidental, sendo a principal porta de entrada do país para o comércio exterior. Localizado na Baía de San Pedro, a 40 quilômetros ao sul do centro de Los Angeles, o porto abrange 7.500 acres de terra/água ao longo de 70

quilômetros de orla marítima. Movimentando diversas *commodities*, de abacate a zinco, o porto de Los Angeles possui terminais de passageiros e de carga, incluindo cruzeiros, contêineres, automóveis, carga fracionada, graneis sólidos e líquidos e instalações de armazenamento. Desde 2000, o porto de Los Angeles tem sido classificado como o principal porto de contêineres dos Estados Unidos, tornando-se um dos portos marítimos mais movimentados do mundo e o principal ponto de entrada para o comércio internacional da América do Norte (LOS ANGELES PORT, 2024).

O porto movimentou 9,9 milhões contêineres de vinte pés (TEUs) em 2022, mantendo a sua posição no topo entre os portos dos EUA. O porto possui um terminal automotivo que movimenta automóveis das fabricantes *Infiniti*, *Mazda*, *Nissan* e *Nissan Diesel*. Em 2022, movimentou 112 mil unidades de automóveis. O porto de Los Angeles movimenta produtos siderúrgicos do Brasil, Coréia e Japão. Em 2022, as exportações de metal reciclado atingiram 899 mil toneladas, a importação de frutas a granel 96,3 mil toneladas e de aço a granel 1,2 milhões de toneladas. A movimentação anual de produtos líquidos a granel (gasolina, combustível naval e de aviação, produtos petrolíferos e petróleo bruto) alcançou 64 milhões de barris em 2022 (LOS ANGELES PORT, 2024).

2.3.17 Porto de Hamburgo: Alemanha

O porto de Hamburgo é o principal centro de comércio exterior da Alemanha, devido à sua posição geográfica estratégica entre o Mar do Norte e o Mar Báltico. É o maior porto multifuncional do país e vital para os mercados interiores do continente europeu. Devido à sua localização, os custos de transporte são reduzidos, conectando de forma vantajosa os mercados da Alemanha, da Europa Central, Oriental e do Norte. Dada à sua proximidade com o canal de Kiel, a via navegável artificial mais movimentada do mundo, o porto de Hamburgo é a melhor conexão entre os Estados Bálticos e à Escandinávia. Cerca de 2.000 conexões ferroviárias de contêineres são oferecidas semanalmente de Hamburgo para o interior europeu e vice-versa (PORT OF HAMBURG, 2024).

A região portuária possui mais de 75 terminais no total. A carga geral convencional que não cabe em contêineres (tais como: componentes de máquinas, turbinas, itens *Ro-Ro*, caminhões ou madeira) é um pilar crucial para o porto. Cargas líquidas, de sucção e de captura, como carvão, grãos ou óleos, são movimentadas por terminais a granel (PORT OF HAMBURG, 2024).

As crises internacionais, em 2022, afetaram a movimentação de mercadorias marítimas no porto de Hamburgo. Ao longo do ano, a pandemia de Covid 19, o conflito na Ucrânia e as

sanções impostas à Rússia afetaram as cadeias de abastecimento globais e o tráfego no porto de Hamburgo. Em 2022, 119,9 milhões de toneladas de mercadorias transportadas por via marítima foram carregadas ou descarregadas no porto (PORT OF HAMBURG, 2024). Cargas a granel como minério, carvão, materiais de construção, grãos, fertilizantes ou derivados de óleo mineral, atingiram um volume total de 36,2 milhões de toneladas. Em relação a movimentação de contêiner, 8,3 milhões de TEUs passaram pelos cais do porto de Hamburgo, em 2022, representando cerca de 70% da movimentação total (PORT OF HAMBURG, 2024).

2.3.18 Porto de Tanjung Pelepas: Malásia

Pelabuhan Tanjung Pelepas Sdn Bhd (PTP) é o principal porto de transbordo da Malásia. O PTP é uma *joint venture* entre a MMC Corporation Berhad (70%), que constitui um grupo de serviços públicos e infraestrutura e a APM Terminals (30%). O porto está localizado em Gelang Patah, Iskandar Puteri, distrito de Johor Bahru, na Malásia. A integração da Zona Franca de Pelepas com o terminal portuário permite a movimentação fluida de cargas, constituindo uma das vantagens agregadas do porto (PTP, 2024).

Segundo o Ministério dos Transportes da Malásia (2022), em 2021, o porto de Tanjung Pelepas conseguiu, pela primeira vez, ultrapassar a marca de 10 milhões de TEUs na movimentação de contêineres, atingindo 11,2 milhões de TEUs.

Em 2022, movimentou 10,5 milhões de TEUs, uma queda de 6% em relação ao ano anterior. A carga total movimentada pelo porto foi de 151,58 milhões de toneladas de frete peso³ – em inglês *Freight Weight Tonnes* (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DA MALÁSIA, 2022).

2.3.19 Porto de Laem Chabang: Tailândia

Desde a sua criação, em 1991, o porto de Laem Chabang é o principal porto marítimo de águas profundas da Tailândia. As instalações desenvolvidas no porto estão convenientemente localizadas nas portas de entradas das zonas industriais de Rayong e Laem Chabang, que abrigam alguns dos maiores produtores e fabricantes do país. Nos últimos anos, sua relevância econômica cresceu e, desde então, exerce um papel importante como referência

³ Segundo Romano (2018), o frete peso é um tipo de tarifa que considera o peso e o volume de determinada mercadoria como base para seu cálculo. Para encontrar o valor, realiza-se uma comparação entre o peso bruto e o peso cubado e o maior entre os dois é utilizado no cálculo do frete peso.

para as indústrias, estimulando o desenvolvimento regional (HUTCHISON PORTS THAILAND, 2022).

No total, são onze terminais portuários, sendo sete terminais de contêineres, um terminal multiuso, um terminal Ro-Ro, um terminal de carga em geral e um terminal que corresponde a um estaleiro naval. Em 2007, foi implementado um sistema ferroviário de última geração conectando o porto de Laem Chabang às principais cidades do país. Com relação à movimentação de contêineres, mais de 8 milhões de TEUs passam anualmente pelo porto, que tem capacidade para cerca de 80 milhões de toneladas de carga por ano (WRIGHT, 2023).

Em 2022, o porto de Laem Chabang teve uma movimentação de contêineres de 8.7 milhões de TEUs (E-PORTS CO.,LTD, 2023).

2.3.20 Porto de Liaoning: China

O porto de Liaoning era conhecido como porto Dalian até fevereiro de 2021, quando absorveu a Yingkou Port Co., Ltd. O objetivo desta aquisição foi promover a integração dos portos do nordeste da China. A partir desta data, seu nome mudou para Liaoning Port Group (LIAONING PORT CO., LTD., 2021).

O Liaoning Port Group está localizado na parte central do cinturão econômico do nordeste asiático, apoiado pelas três províncias do Nordeste e pelo interior da Mongólia Oriental. Seus portos estão distribuídos em cinco regiões: Dalian, Yingkou, Dandong, Panjin e Suizhong. Possui 217 berços de atracação, incluindo 174 berços de 10.000 toneladas, um terminal de petróleo bruto de 450.000 toneladas, um terminal de minério de 400.000 toneladas e um terminal de contêineres de 200.000 toneladas. Além disso, é o único terminal *Ro-Ro* na costa do país que possui uma linha ferroviária dedicada a veículos comerciais, atendendo às principais marcas automobilísticas (LIAONING PORT CO., 2022).

Em 2022, o Liaoning Port Group movimentou um total de 52,9 milhões de toneladas de petróleo e produtos químicos liquefeitos. Em termos de movimentação de contêineres, o grupo movimentou um total de 9,39 milhões de TEUs. A movimentação realizada no segmento de granéis e carga geral do grupo foi de 170,05 milhões de toneladas em 2022 (LIAONING PORT CO., 2022).

3. EFICIÊNCIA PORTUÁRIA E SUSTENTABILIDADE EM PORTOS - ANÁLISE DA LITERATURA

Os portos, assim como as empresas, buscam aumentar sua eficiência e competitividade melhorando sua produtividade, a qualidade da prestação de seus serviços e reduzindo os seus custos. Além disso, atualmente, os portos são direcionados a operar de uma forma menos agressiva ao meio ambiente. Esse direcionamento origina-se em legislações que visam reduzir a emissão de gases poluentes, a proteção do bioma marinho, o uso racional de energia e vários outros parâmetros ligados à crescente preocupação decorrentes das alterações climáticas e do aquecimento global. Esse cenário induz a um crescimento na quantidade de portos que estão investindo em instalações pró ambientais objetivando responder às necessidades e preocupações de governos, sociedade e partes interessadas.

De acordo com a UNCTAD (2009), o conceito de sustentabilidade portuária possui três perspectivas principais:

- 1) a perspectiva econômica: que considera o retorno do investimento, a eficácia do uso da área portuária e a disponibilidade de infraestrutura para as empresas maximizarem seu desempenho;
- 2) a perspectiva social: que considera a contribuição na geração de empregos diretos pelas empresas portuárias e pelas atividades ligadas ao porto e pelos empregos indiretos oriundos da interação entre o porto e a cidade. Além disso, leva em conta a contribuição para o desenvolvimento socioeconômico da área circundante ao porto;
- 3) o desempenho e a gestão ambiental: isso inclui a poluição sonora, a qualidade do ar e as operações de dragagem e descarte dos sedimentos provenientes desta operação tais como, terra, areia, rochas, lixo etc.

Pinder e Slack (2004) e Robinson (2002) afirmam que os portos podem, mesmo dentro dos limites impostos pelas regulamentações ambientais, alcançar maior estabilidade econômica e aumentar o desempenho operacional de forma consonante com a sustentabilidade.

Dicken (2003) e Elkington (1994) citam como exemplo os relatórios anuais de sustentabilidade publicados em sites portuários. Estes relatórios fornecem diretrizes e recomendações estratégicas com o objetivo de enfrentar os desafios relativos às operações e ao desenvolvimento de portos sustentáveis, levando em consideração fatores econômicos, sociais e ambientais.

Desta maneira, embora as contribuições dos portos para o desenvolvimento econômico sejam frequentemente percebidas e amplificadas positivamente, as preocupações sobre impactos ambientais e sociais adversos associados em e ao redor dos portos, ecossistemas marinhos e comunidades locais onde os portos estão localizados têm sido crescentes.

Na próxima seção são apresentados os tópicos que relacionam a eficiência portuária sob diferentes enfoques: estrutura de propriedade; abordagem operacional; abordagem econômica; abordagem ambiental e social; sustentabilidade; e indicadores de sustentabilidade portuária.

3.1 Eficiência em portos: Estrutura de propriedade

A análise da eficiência portuária tem sido amplamente discutida na literatura especializada, especialmente no que se refere à influência da estrutura de propriedade e dos modelos de governança sobre o desempenho das operações portuárias. A partir das reformas institucionais observadas no setor portuário nas últimas décadas, diferentes arranjos de gestão — públicos, privados e mistos — passaram a coexistir em diversos países, estimulando o debate acerca de seus efeitos sobre a produtividade, a eficiência operacional e a competitividade dos portos. Nesse contexto, diversos estudos empíricos têm buscado avaliar como essas diferentes estruturas organizacionais impactam o desempenho portuário, frequentemente utilizando métodos quantitativos, como a DEA e modelos de fronteira estocástica, para mensurar a eficiência relativa entre portos. A seguir, são apresentados alguns dos principais trabalhos que investigam a relação entre eficiência portuária e estrutura de propriedade.

Valentine e Gray (2001) investigaram a eficiência dos portos de contêineres, comparando portos que possuíam as três formas de estrutura de propriedade possíveis: privada, pública e mista. Tendo como base, dados referentes a 1998, os autores utilizaram uma amostra de 31 portos de contêineres de diversos países e aplicaram a DEA para avaliar a eficiência relativa dos portos e realizaram a análise de *cluster* para examinar suas estruturas de propriedade e suas estruturas organizacionais. O modelo considerou como variáveis de entrada indicadores de infraestrutura portuária, especificamente, o comprimento total do cais e o comprimento do cais destinado à operação de contêineres. Como variáveis de saída foram utilizados o volume de contêineres movimentados e o volume total de carga movimentada pelo porto, indicadores que representam o nível de atividade e desempenho operacional das instalações portuárias.

Os resultados permitiram identificar os três portos que foram considerados 100% eficientes: porto de Hong Kong, porto de Santos e o porto de Singapura. A presença do porto

de Santos entre os três principais destaca sua eficiência em relação ao seu porte (VALENTINE; GRAY, 2001).

Com base no artigo Valentine e Gray (2001), as possibilidades de estrutura organizacional aplicáveis aos portos foram derivadas da tipologia proposta por Mintzberg (1979). Embora Mintzberg identifique cinco formas gerais de organização, os autores concluem que apenas três estruturas são compatíveis com a realidade da administração portuária: estrutura simples (*simple structure*), burocracia mecanizada (*machine bureaucracy*) e estrutura divisional (*divisional structure*). A estrutura simples caracteriza-se por poucos níveis hierárquicos e comunicação direta entre departamentos e o principal tomador de decisão, o que proporciona maior flexibilidade e rapidez nas decisões. A burocracia mecanizada apresenta uma cadeia hierárquica mais extensa, com diversos departamentos e forte formalização administrativa, sendo típica de organizações públicas ou altamente regulamentadas. Já a estrutura divisional ocorre em organizações maiores ou com múltiplas unidades operacionais, nas quais diferentes divisões relativamente autônomas reportam-se a níveis gerenciais intermediários antes de chegar à alta administração.

No que se refere aos resultados empíricos do estudo, os autores identificaram que os três portos considerados 100% eficientes na análise envoltória de dados — Hong Kong, Santos e Singapura — estavam associados à estrutura organizacional simples. Essa configuração organizacional mostrou-se a mais eficiente entre as analisadas, principalmente pela maior agilidade na tomada de decisões e pela menor complexidade administrativa. Em contrapartida, estruturas mais complexas, como a burocracia mecanizada e a divisional, tendem a apresentar maior número de unidades organizacionais, divisões e níveis hierárquicos, o que pode reduzir a flexibilidade administrativa e afetar o desempenho operacional (VALENTINE; GRAY, 2001).

Barros (2003) analisou a eficiência das autoridades portuárias portuguesas, no período de 1990 a 2000, por meio da DEA, combinada com o índice de produtividade de *Malmquist*. O modelo considera duas variáveis de entrada, representando os principais fatores de produção das atividades portuárias: trabalho, mensurado pelo número de trabalhadores; e capital, representado pelo valor contábil dos ativos das autoridades portuárias. Como variáveis de saída, o autor utiliza sete indicadores de produção portuária, incluindo número de navios atendidos, movimentação total de carga, tonelagem bruta, carga geral fracionada, carga containerizada, carga a granel sólida e carga a granel líquida. A estrutura de propriedade das autoridades portuárias é na maioria estatal, tendo em alguns casos, administração privada.

Segundo Barros (2003), a gestão privada mesmo predominante em poucos portos da amostra, causou efeitos positivos na pontuação de eficiência portuária. Por outro lado, a gestão pública teve impacto negativo. Para o autor, as pontuações de eficiência também estão positivamente relacionadas com o volume de movimentação de contêineres e com o percentual de participação de mercado. Para Barros (2003), o volume de contêineres movimentados demonstra que, de alguma forma, economias de escala melhoram a eficiência dos portos. A explicação para isso está associada às múltiplas funções que um porto marítimo desempenha. Porém, tanto as estruturas portuárias com administração pública e privada não alcançaram melhorias totais de produtividade no período considerado, com exceção do porto de Algarve.

Os resultados empíricos indicam que os níveis de eficiência observados podem ser explicados por questões institucionais e operacionais específicas do setor portuário. Entre elas destaca-se a variável de tendência associada ao *Single Market Programme* (SMP) da União Europeia, estabelecido em 1992 com o objetivo de facilitar a livre circulação de mercadorias e aprofundar a integração econômica no espaço europeu (BARROS, 2003).

De acordo com Barros (2003), a implementação desse programa intensificou a concorrência entre portos europeus e incentivou melhorias na gestão e nos investimentos em infraestrutura. Além disso, verificou-se que a eficiência portuária está positivamente relacionada ao volume de tráfego containerizado, indicador que captura efeitos de escala nas operações logísticas, bem como à participação de mercado de cada autoridade portuária. Em contrapartida, os resultados sugerem uma relação negativa entre eficiência e gestão predominantemente pública, indicando que estruturas com maior participação de gestão privada tendem a apresentar melhor desempenho operacional (BARROS, 2003).

Barros (2003) ainda concluiu que os portos menores são os mais eficientes. Isso significa dizer que o fato de um porto ser grande não garante necessariamente que este seja eficiente. Porém, a localização é importante, uma vez que os dois portos mais eficientes estão situados na parte sul do país e nas ilhas atlânticas, onde enfrentam menos concorrência dos portos espanhóis.

Já Barros e Athanassiou (2004) compararam a eficiência dos portos marítimos de dois países europeus, Grécia e Portugal, utilizando, também, a análise envoltória de dados, classificando-os de acordo com a sua produtividade total, no período 1998 a 2000. O modelo considera dois fatores de produção — trabalho (número de empregados) e capital fixo — e quatro variáveis de produção portuária: número de navios atendidos, volume total de carga movimentada, carga movimentada e carga containerizada.

Para os autores, os resultados indicam que a maioria dos portos analisados opera próximo à fronteira eficiente, sendo o porto de Thessaloniki a única unidade identificada como tecnicamente ineficiente no período analisado (1998–2000).

Quanto à produtividade, os resultados sugerem que as economias de escala devem ser o principal alvo de ajuste neste setor. Entretanto, no que tange à estrutura de propriedade, Barros e Athanassiou (2004) argumentam que a existência de portos privados possibilita o aumento da eficiência e da produtividade devido à concorrência entre eles e, desta forma, a apresentação de melhores resultados em relação aos portos públicos.

Tongzon e Heng (2005) aplicaram um modelo de fronteira estocástica para investigar a relação entre a estrutura de propriedade portuária e sua eficiência em 25 portos de contêineres selecionados nos seguintes países: Alemanha, Canadá, China, Tailândia, Coreia do Sul, Malásia, Filipinas, Cingapura, Itália e Japão. O modelo proposto considerou três variáveis de entrada associadas à infraestrutura e aos equipamentos do terminal — comprimento do cais, área do terminal e número de guindastes de cais — enquanto a variável de saída é representada pela movimentação total de contêineres, medida em TEUs. Além disso, os autores incorporam variáveis institucionais no modelo de eficiência, como o grau de participação do setor privado na gestão portuária e o tamanho do porto, com o objetivo de avaliar a relação entre estrutura de propriedade e eficiência operacional.

Segundo Tongzon e Heng (2005), os resultados mostram que o envolvimento da iniciativa privada no setor portuário ajuda a aumentar a eficácia das operações. Entretanto, esta relação não é linear, uma vez que um porto totalmente privatizado pode ser infrutífero no aumento da eficiência, ou seja, deve haver uma parceria público/privado para que se obtenha melhores resultados. Para os autores, a privatização parcial do porto é uma estratégia bem sucedida para ajudar as autoridades portuárias a se destacar no mercado.

Entretanto, Tongzon e Heng (2005) sugerem que as autoridades portuárias devem restringir o envolvimento do setor privado às funções de “proprietário da área e de operador portuário” e assumir a responsabilidade pela regulamentação. Em outras palavras, os autores defendem que, em vez de depender predominantemente de recursos públicos, as autoridades portuárias devem promover a participação da iniciativa privada no financiamento, na operação e na gestão das atividades portuárias, permanecendo o Estado responsável pela regulação e supervisão do setor.

Por fim, Tongzon e Heng (2005) argumentam que a adaptabilidade à demanda dos clientes é outro fator importante para definição da competitividade portuária. Para os autores, como os portos marítimos estão em um setor de serviços, é razoável que as autoridades

portuárias e os operadores portuários entendam bem as necessidades de seus clientes e se esforcem para atender e superar suas expectativas.

3.2 Eficiência em portos: Abordagem operacional

Notadamente, com o crescimento do transporte de mercadorias contentorizadas e a ampliação do tamanho dos navios, o transporte marítimo sofreu de fato mudanças significativas nas últimas décadas. Devido a estas alterações, os portos foram obrigados a investirem para acomodar as exigências adicionais provocadas pelo aumento do volume de contêineres transportados pelos navios. Como resultado, muitos portos necessitaram aumentar significativamente a eficiência das suas operações portuárias.

Embora o enfoque ambiental relacionado a atividade portuária venha ganhando cada vez mais espaço em estudos recentes, ainda é predominante as pesquisas que utilizam abordagem operacional para mensurar a eficiência dos portos, tratando de dados referentes à movimentação de cargas e, também, dados sobre a infraestrutura dos portos.

Wanke (2013) realizou uma pesquisa em 27 portos brasileiros para mensurar a eficiência portuária no Brasil utilizando o modelo de eficiência DEA em redes (em inglês *network DEA*) em dois estágios. A adoção deste modelo ocorreu com a finalidade de otimizar os dois estágios apresentados a seguir, simultaneamente.

No primeiro estágio, foram analisados os seguintes ativos: número de berços; área de armazenagem (em m²) e área de pátio (em m²). Esses ativos são vistos como *inputs* para os granéis sólidos e para as frequências de embarque de contêineres. O objetivo foi encontrar uma frequência específica de embarque por ano (chamada de eficiência da infraestrutura física), minimizando a infraestrutura necessária para atingir um determinado nível de frequência de remessas por ano.

No segundo estágio, as movimentações ocorridas no ano são consideradas *inputs* intermediários de produção que permitem o manuseio de granéis sólidos e de cargas containerizadas (chamada de eficiência de consolidação de embarques) (WANKE, 2013). As taxas de transferências de volumes sólidos e de contêineres são os *outputs* finais.

Os resultados indicam que apenas 7 dos 27 portos analisados (25,9%) alcançaram eficiência plena na etapa de infraestrutura física, enquanto apenas 4 portos (14,8%) atingiram eficiência total na etapa de consolidação de embarques. Entre os fatores que influenciam esses resultados, destaca-se o impacto positivo da administração privada sobre a eficiência da infraestrutura, bem como a influência do tamanho do *hinterland* (extensão geográfica da área

de influência econômica de um porto) e da diversidade de cargas sobre a eficiência de consolidação de embarques (WANK, 2013).

Para Wanke (2013), a pesquisa contribuiu ao considerar a quantidade de movimentações como o resultado intermediário fundamental que conecta as visões de longo e curto prazos sobre dois aspectos pertinentes dos processos de produção portuária: infraestrutura física e consolidação de embarques. Além disso, para o autor, os resultados, inicialmente discutidos, à luz de diferentes grupos de portos, indicam que diferentes fatores de eficiência, como tipo de administração, tamanho da influência econômica regional do porto e a diversidade de carga impactam de maneiras distintas a infraestrutura física e os níveis de eficiência de consolidação de embarques. No caso da administração privada, verificou-se um impacto positivo nos níveis de eficiência da infraestrutura física dos portos.

Ainda segundo Wanke (2013), a partir dos anos 1990, diferente de muitos países da Ásia, o Brasil recebeu poucos investimentos em novos portos. Para o autor, isso não se deu apenas devido às restrições financeiras do governo federal, mas, também, devido à possibilidade de ampliar a capacidade já existentes dos portos por meio de melhorias. Isso tem sido feito por meio da privatização de terminais, desregulamentação, entre outras medidas.

Périco e Silva (2020) utilizaram a DEA para analisar 24 dos maiores portos públicos brasileiros, no período de 2010 a 2017, relacionando variáveis relacionadas à infraestrutura e às condições operacionais portuárias, como número de berços, área de armazenagem e tempo médio de espera para atracação. Como variável de saída, foi utilizado o volume total de carga movimentada, indicador que representa o resultado produtivo das operações portuárias.

Os resultados indicaram níveis moderados de eficiência no sistema portuário brasileiro, especialmente entre os portos públicos, cuja eficiência média foi de 53,7% no período analisado, revelando significativo potencial de melhoria na utilização da infraestrutura existente. Entre os portos avaliados, o Porto de Vila do Conde apresentou o melhor desempenho, enquanto outros portos de grande relevância para o comércio exterior brasileiro, como Santos e Paranaguá, demonstraram níveis relativamente inferiores de eficiência. De modo geral, o estudo destaca que fatores como o tempo de espera para atracação, a utilização da infraestrutura portuária e aspectos institucionais relacionados à governança do setor influenciam significativamente o desempenho dos portos brasileiros (PÉRICO; SILVA, 2020).

Segundo Périco e Silva (2020), as hidrovias e ferrovias integram a infraestrutura de suporte ao sistema portuário brasileiro. No entanto, esses modais recebem investimentos relativamente modestos, o que limita sua utilização e capacidade de atendimento às diferentes regiões do país. Como consequência, o transporte rodoviário assume papel predominante no

escoamento de cargas, apesar de muitas rodovias apresentarem condições inadequadas, sobretudo fora das áreas metropolitanas.

Périco e Silva (2020) destacam que muitos dos problemas associados à infraestrutura terrestre dependem de investimentos do setor público, visto que projetos concedidos à iniciativa privada tendem a concentrar-se em empreendimentos mais rentáveis, como rodovias localizadas próximas a grandes centros urbanos, deixando regiões menos atrativas com menor nível de investimento em infraestrutura logística. Mesmo que os portos estejam próximos às capitais, normalmente é necessário trafegar por estradas locais até que a carga chegue em rodovias com melhor estrutura (PERÍCO; SILVA, 2020).

Outras questões em que o setor público tem participação indispensável como gestor, diz respeito a mudança nos parâmetros da lei de concessões. Essas mudanças, estão relacionadas aos operadores portuários e que ajudariam nos seguintes processos: (i) contratos com prazo de duração menores e que exijam melhor desempenho e responsabilidade dos operadores; (ii) estabelecimento de indicadores de produtividade que garanta maior agilidade e competitividade; e (iii) exigências de investimento em estrutura portuária por parte da concessionária (PÉRICO; SILVA, 2020).

Além disso, como as operações portuárias ocorrem praticamente 24 horas por dia, é fundamental que órgãos anuentes, como a Alfândega e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária funcionassem de maneira ininterrupta a fim de agilizar o processo de atracação e desatracação de navios. O setor público teria de trabalhar para agilizar e melhorar a eficiência dos procedimentos executados pelas instituições públicas aquiescentes (PÉRICO; SILVA, 2020).

A falta de investimentos necessários nos modais de apoio aos portos brasileiros gera *gaps* que evidenciam os problemas existentes nestes setores, tais como ferrovias insuficientes, estradas e hidrovias com infraestrutura precária, atraindo desta forma maior atenção de pesquisas relacionadas a este tema. Este cenário pode ser uma das possíveis razões para a hegemonia de trabalhos referentes a abordagem operacional e econômica no Brasil.

Oliveira e Cariou (2015) investigaram 200 portos de contêineres de diversos continentes pelo mundo, entre 2007 e 2010. O objetivo dos autores foi examinar de que maneira o grau de concorrência, medido em diferentes níveis (local, regional e global), impactaria a pontuação de eficiência de um determinado porto. Para tanto, aplicaram a técnica DEA e o Modelo de

Regressão Truncada *Bootstrap*⁴. Os autores consideraram como variáveis de entrada indicadores de infraestrutura portuária — comprimento do cais, área do terminal e número de guindastes de cais — enquanto a variável de saída foi representada pela movimentação total de contêineres, medida em TEUs.

Os resultados indicam que a intensidade da concorrência exerce influência relevante sobre o desempenho portuário, mas de forma não linear. Em particular, verificou-se que a concorrência interportuária tende a reduzir a eficiência quando ocorre em escala regional, definida no estudo como um raio aproximado de 400 a 700 km entre portos. Por outro lado, os efeitos da concorrência não se mostraram estatisticamente significativos quando analisados em níveis locais (menos de 300 km) ou globais (acima de 800 km). Além disso, os autores observam que portos com maior participação de mercado tendem a apresentar maior eficiência, enquanto investimentos recentes em infraestrutura podem reduzir temporariamente os níveis de eficiência devido ao intervalo entre o investimento realizado e sua efetiva utilização operacional (OLIVEIRA E CARIOU, 2015).

Yuen et al. (2013), utilizando a DEA e Modelos de Regressão, calcularam as pontuações de eficiência de terminais de contêineres, entre 2003 e 2007, na China e em países vizinhos.

Para mensurar o desempenho portuário, os autores utilizaram como variáveis de entrada indicadores de infraestrutura portuária, incluindo número de berços, comprimento do cais, área do terminal, número de guindastes de cais e guindastes de pátio; enquanto a movimentação de contêineres em TEUs foi adotada como variável de saída. Os resultados indicam que alguns terminais, como Shanghai Waigaoqiao, Qingdao Qianwan, Busan Shinsundae, Kaohsiung e Hong Kong, apresentaram escores de eficiência próximos ou iguais à fronteira eficiente em determinados anos da amostra. Em contraste, terminais como Busan Hanjin Gamcheon, Shekou e Tianjin CSX Orient exibiram níveis relativamente menores de eficiência operacional.

A partir dos resultados obtidos, os autores destacaram três pontos principais: (i) a participação de capital estrangeiro contribui para aumentar a eficiência portuária, o que vai ao encontro da estratégia do governo chinês de incentivar o investimento externo em infraestrutura de transportes; (ii) a participação local também é importante na operação portuária, de modo que a formação de joint ventures entre investidores estrangeiros e chineses parece constituir uma estrutura de propriedade adequada para a indústria portuária chinesa; e (iii) políticas voltadas ao incentivo da concorrência intra e interportuária provavelmente levariam a uma

⁴ O *bootstrap* é uma metodologia genérica para calcular a variabilidade em estatística. Foi desenvolvido por Bradley Efron (1979) e se refere a um modelo de reamostragem que utiliza simulação para calcular desvios padrões, intervalos de confiança e para realização de testes de significância em uma amostra.

melhoria na eficiência portuária, uma vez que, de modo geral, os resultados apontaram nessa direção.

De acordo com Yuen et al. (2013), na amostra analisada, a maioria dos operadores portuários é de propriedade conjunta de um investidor chinês e de um investidor estrangeiro. Segundo os autores, os principais acionistas chineses — isto é, aqueles que detêm mais de 50% das ações — são, em sua maioria, empresas estatais, contando ainda com alguns investidores privados ou estrangeiros como acionistas minoritários.

De acordo com Yuen et al. (2013), a participação de investidores chineses pode contribuir para a eficiência dos terminais ao proporcionar conhecimento do mercado local e facilitar a articulação institucional com agentes da cadeia logística. Contudo, quando essa participação se torna majoritária e passa a exercer maior controle sobre as decisões operacionais, os resultados indicam uma tendência de menor eficiência.

Outro trabalho que enfatiza a eficiência através da abordagem operacional foi realizado por Wu e Goh (2010). Estes autores também utilizaram a análise envoltória de dados, juntamente com técnicas de “autoavaliação” e “avaliação por pares” para pesquisar a eficiência das operações portuárias marítimas em países emergentes e em países desenvolvidos. Os países em desenvolvimento analisados foram: Brasil, Rússia, Índia, China, Bangladesh, Egito, Indonésia, Irã, Coreia, México, Paquistão, Filipinas, Turquia e Vietnam. Já os países desenvolvidos examinados foram: EUA, França, Itália, Canadá, Alemanha, Japão, Reino Unido.

O modelo de Wu e Goh (2010), considerou como variáveis de entrada indicadores de infraestrutura portuária, incluindo área do terminal, número de guindastes de cais, número de berços para contêineres e comprimento do terminal. Como variável de saída foi utilizada a movimentação de contêineres, medida em TEUs, representando o resultado das operações portuárias.

Segundo Wu e Goh (2010), os portos de Shanghai na China, Chittagong em Bangladesh e Santos no Brasil tiveram níveis de eficiência maiores que portos pertencentes aos países desenvolvidos. Dentre os portos pertencentes aos países mais ricos, o porto de Los Angeles nos EUA foi o porto que obteve maior pontuação.

Para Wu e Goh (2010), nos resultados obtidos, os valores médios da eficiência nos portos de mercados emergentes indicam que eles são mais competitivos do que os portos de países desenvolvidos. Porém, de acordo com Wu e Goh (2010), isto contradiz o resultado do trabalho realizado por Bookbinder e Tan (2003), que compararam os sistemas de logística na Europa e na Ásia. No trabalho de Bookbinder e Tan (2003), os países europeus mais

desenvolvidos foram classificados em um nível superior de eficiência. Entretanto, Reino Unido e França foram a exceção, sendo classificados em nível intermediário. A maioria dos países emergentes estava no nível de eficiência mais baixo.

De acordo com Wu e Goh (2010), uma explicação para essa aparente contradição pode ser o fato de que ao longo do tempo, os portos de países em desenvolvimento evoluíram no investimento em equipamentos e, também, na implantação de processos que possibilitaram a melhoria da eficiência de suas operações portuárias.

Nikolaou e Dimitriou (2021) examinaram a eficiência de 50 portos de contêineres de diversos países em um período de 5 anos, de 2013 a 2017. Para tal propósito, aplicaram a DEA para estimar o nível de eficiência e modelos de regressão *Tobit* para quantificar os efeitos que diferentes fatores têm na eficiência destes portos.

Os resultados do método DEA revelaram os portos de contêineres que possuem o melhor e o pior desempenho. Por 5 anos consecutivos, os portos que apresentaram a melhor performance foram: porto de Dongguan na China; porto de Dubai nos Emirados Árabes Unidos; porto da cidade de Ho Chi Minh no Vietnã; porto de Hong Kong na China; porto de Jawaharlal Nehru na Índia; porto de Shanghai na China; porto de Tanjung Perak na Indonésia; porto de Tianjin na China; e porto de Tóquio no Japão (NIKOLAOU; DIMITRIOU, 2021).

Para Nikolaou e Dimitriou (2021), questões estruturais/operacionais como o espaço de empilhamento de contêineres e a limitação da dimensão do calado dos navios, têm um efeito prejudicial no desempenho dos portos. Em contrapartida, um número suficientemente elevado de guindastes de cais têm um efeito benéfico. Segundo os autores, a fim de melhorar o funcionamento dos terminais portuários, os decisores políticos devem concentrar esforços em realizar investimentos tanto em equipamentos, como nas condições operacionais, citando os guindastes de cais como exemplo.

Segundo Nikolaou e Dimitriou (2021), as informações da classificação de eficiência podem ser utilizadas pelos governos de forma a identificar e abordar os portos com baixo desempenho, seguindo, se possível, as estratégias ou adotando o *layout* de infraestrutura e equipamentos dos terminais portuários com melhor desempenho.

González e Trujillo (2008) analisaram como evoluiu a eficiência técnica das principais autoridades portuárias da Espanha. Os autores pesquisaram a prestação de serviços de infraestrutura relacionadas a movimentação de contêineres e como as reformas portuárias da década de 1990 afetaram a eficiência dos portos de contêineres espanhóis.

O estudo demonstrou, empiricamente, que a reestruturação e as reformas substanciais introduzidas não só alteraram as condições para o desenvolvimento das atividades portuárias,

que estavam sujeitas à regulamentação, mas também conduziram a melhorias significativas na mudança tecnológica. Apesar da eficiência técnica ter melhorado pouco, na média, houve um movimento significativo na eficiência dos portos ao longo do tempo como resultado das melhorias implantadas (GONZÁLEZ; TRUJILLO, 2008).

Os portos de contêineres asiáticos foram verificados por Hung et al. (2010), utilizando a DEA juntamente com o método *bootstrap*. Os autores analisaram a eficiência operacional de 31 portos de contêineres da região Ásia-Pacífico, utilizando dados referentes ao ano de 2003. O modelo considerou quatro variáveis de entrada relacionadas à infraestrutura portuária — área do terminal, número de guindastes de cais, número de berços de contêineres e comprimento do terminal — e uma variável de saída, representada pela movimentação total de contêineres (TEUs). Essas variáveis permitem avaliar como os recursos físicos e operacionais disponíveis nos terminais portuários são convertidos em desempenho operacional na movimentação de cargas containerizadas.

Os resultados mostraram que as ineficiências técnicas globais dos portos são derivadas, principalmente, das ineficiências técnicas puras e não à ineficiências de escala. Esta conclusão sugere que os gestores portuários devem concentrar-se, em primeiro lugar, na melhoria das suas práticas de gestão em função dos requisitos de mercado, em seguida, buscar a melhoraria na eficiência de escala.

Segundo Hung et al. (2010), 71% dos portos operam com rendimentos crescentes de escala (IRS), sugerindo que estes podem pensar em crescer ainda mais. Isto pode ser consequência do crescimento do mercado portuário asiático de contêineres nos últimos anos. Em comparação com outras regiões da Ásia, os portos de contêineres do leste Asiático são, em média, mais eficientes. Além disso, os autores enfatizam que definir metas de análise que sejam eficientes, em termos de escala, pode ajudar os decisores políticos no sentido de aproveitarem os seus recursos e otimizarem a escala econômica.

Nguyen et al. (2021) avaliaram a eficiência dos dez principais terminais de contêineres localizados na região sul do Vietnã, utilizando a técnica *Data Envelopment Analysis* (DEA) para o período de 2017 a 2019. Segundo os autores, os resultados da análise indicam que avanços tanto na recuperação da eficiência operacional quanto na inovação tecnológica contribuíram para que a maioria dos terminais apresentasse crescimento de produtividade no período analisado.

De acordo com Nguyen et al. (2021), os resultados obtidos pela DEA mostram que três terminais — Cai Mep International Terminal, Tan Cang Cat Lai e Tan Cang—Cai Mep International Terminal — atingiram o nível máximo de eficiência, mesmo quando considerados

outputs indesejáveis, como a poluição e as emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, os terminais Phu Huu, SSIT, TCCT e Tan Thuan foram classificados como os menos eficientes entre os avaliados. Os demais terminais analisados (ITC, TCTT e VICT) também apresentaram níveis de ineficiência, porém com pontuações intermediárias.

Ainda segundo Nguyen et al. (2021), os terminais considerados ineficientes podem estar consumindo insumos de forma excessiva e não gerando *outputs* desejáveis na mesma proporção, como melhorias na movimentação de contêineres, na capacidade de atracação e no desempenho econômico. Além disso, tais terminais podem estar associados à geração relativamente elevada de *outputs* indesejáveis, o que contribui para a redução de sua eficiência operacional.

3.3 Eficiência em portos: Abordagem econômica

Wang et al. (2005) realizaram uma discussão sobre a teoria econômica que sustenta a produção portuária de contêineres. Para os autores, não é uma tarefa fácil devido à complexidade dessas atividades. No entanto, conhecer este instrumental é um pré-requisito para a elaboração de políticas econômicas ou planejar melhorias no desempenho de um porto de contêineres.

Segundo Wang et al. (2005), esta complexidade não está apenas relacionada com as operações portuárias de contêineres e a sua gestão, mas também com o ambiente macroeconômico e a estrutura de mercado sob as quais operam os portos. Tal como em muitas outras indústrias, a relação entre a concorrência entre portos e o seu desempenho é debatido. Os defensores da concorrência acreditam que esta pode encorajar a inovação, aumentar o sentido de responsabilidade das pessoas, libertar uma organização das restrições da burocracia e promover uma eficiência mais elevada.

Goss (1990) observa que a suscetibilidade de um porto à concorrência depende de uma série de variáveis, tais como a sua localização geográfica e os tipos de mercadorias que passam por ele. Quando há poucos portos que movimentam uma determinada mercadoria ou quando há poucos portos para competir entre si, a concorrência é correspondentemente limitada. Nesse sentido, Heaven (1995) argumenta que harmonização das políticas internacionais é especialmente crucial para a indústria portuária de contentores, uma vez que subsídios governamentais podem provocar distorções à medida que a região de influência econômica de um porto aumenta e se estenda para além das fronteiras nacionais. Isto tem ramificações gerenciais, uma das quais é o *benchmarking* de desempenho.

Tal atividade permite que os portos concorrentes obtenham informações atualizadas sobre tecnologias e sobre o desempenho dos sistemas nos principais portos de contêineres em todo o mundo, para garantir que não fiquem para trás. Outra implicação gerencial importante é que os portos de contêineres devem planejar e investir em capacidade de uma forma sofisticada, tendo em conta a complexidade da capacidade e a longa vida útil das principais infraestruturas e instalações (WANG et al., 2005).

De acordo com Wang et al. (2005), a privatização dos portos é normalmente acompanhada por um longo contrato entre empresas privadas e autoridades portuárias ou governo. Como tal, poderá desenvolver-se um novo monopólio ou oligopólio dentro do porto. Se a concorrência inter e intraportuária não estiver presente (ou mesmo a ameaça dela), é difícil concluir se a gestão pública irá superar a gestão privada, ou o contrário. Para os autores, a teoria tradicional da organização industrial é aplicada à análise da produção portuária de contêineres. Em particular, os dois paradigmas fundamentais de “concorrência” e “monopólio”, que estão no cerne da teoria organizacional tradicional, são examinados com referência à indústria portuária de contêineres. Segundo Wang et al. (2005), a competição inter e intraportuária desempenha um papel importante na indústria portuária contemporânea de contêineres.

Trujillo e Tovar (2007) analisaram a eficiência econômica das autoridades portuárias europeias por meio de um modelo de fronteira estocástica baseado em uma função distância orientada ao produto. O estudo utilizou dados de 22 portos europeus referentes ao ano de 2002. Como variáveis de saída foram considerados o volume de contêineres movimentados, o volume de outras cargas e o número de passageiros; enquanto os fatores produtivos utilizados foram número de empregados e área total do porto, representando respectivamente os fatores trabalho e capital. Além disso, os autores incluíram a taxa de containerização como variável ambiental, a fim de capturar diferenças estruturais entre os portos relacionadas ao grau de especialização em cargas containerizadas.

De acordo com os autores, apesar das limitações do estudo, foi possível estimar que a eficiência portuária dessa amostra, em 2002, foi de aproximadamente de 60%, com uma performance variando entre 28% e 90%.

Para Trujillo e Tovar (2007), realizando uma análise inicial, é possível conjecturar que em média, os portos poderiam ter movimentado 40% a mais de carga com os recursos disponíveis. Além disso, as metas da União Europeia de substituir parte do transporte rodoviário pelo transporte marítimo de curta distância exigem que este último seja competitivo. Um dos aspectos dessa competitividade é a eficiência do sistema portuário. Portanto, é fundamental para o objetivo geral do transporte na União Europeia garantir que os portos ofereçam mais serviços,

com melhor qualidade e a custos mais baixos para os usuários e contribuintes (TRUJILLO; TOVAR, 2007).

Cullinane e Wang (2006), utilizando a DEA, mediram a eficiência de 69 terminais de contêineres da Europa, distribuídos em 24 países e com rendimento superior a 10 000 TEUs, com dados referentes ao ano de 2002. O modelo adotado considerou como variável de saída o volume total de contêineres movimentados (TEUs), enquanto as variáveis de entrada representaram a infraestrutura e os recursos operacionais dos terminais, incluindo comprimento do cais, área do terminal e número de equipamentos de movimentação de contêineres. Essas variáveis refletem os principais fatores produtivos envolvidos na operação de terminais portuários e permitem avaliar a eficiência relativa na utilização da infraestrutura disponível para a movimentação de cargas containerizadas.

Para esses autores, esses terminais desempenham um papel importante no desenvolvimento econômico da região. Porém, como resultado da sua concentração e localização geográfica, enfrentam uma alta concorrência em comparação ao restante do mundo (CULLINANE; WANG, 2006).

De acordo com Cullinane e Wang (2006), a principal conclusão do estudo é que se constatou uma ineficiência substancial na maioria dos terminais analisados. Isso porque, se forem assumidos retornos constantes de escala, a eficiência média dos terminais seria de 0,42. Caso, se assumam retornos variáveis de escala, a eficiência média alcança 0,48. Para os autores, este último resultado é mais realista e significa que os terminais podem melhorar seus níveis de produtividade em até 2,4 vezes mais do que os níveis atuais, utilizando os mesmos fatores de produção (CULLINANE; WANG, 2006).

Segundo Cullinane e Wang (2006), também foram analisadas as características da escala de produtividade dos terminais. Embora alguns sejam eficientes em termos de escala, a maioria dos terminais sob investigação oferece retornos crescentes de escala. No entanto, de acordo com os autores, a maior parte dos terminais de contêineres que possui uma escala de produção mais elevada têm mais probabilidade de estar associados a níveis de eficiência superiores.

Além disso, verificou-se que a eficiência média dos terminais de contêineres é diferente em várias regiões. Por exemplo, os terminais de contêineres localizados nas Ilhas Britânicas foram mais eficientes em comparação aos terminais equivalentes situados nos países escandinavos e do Leste Europeu (CULLINANE; WANG, 2006).

3.4 Eficiência dos portos: Abordagens ambiental e social

Nunes et al. (2019) estimaram os custos externos das emissões do transporte marítimo em quatro portos de Portugal (Leixões, Setúbal, Sines e Viana do Castelo), durante o ano de 2013. A avaliação da ecoeficiência baseou-se em critérios ambientais, sociais e econômicos.

O estudo considerou as emissões atmosféricas de Óxidos de Nitrogênio (Nox), Dióxido de Enxofre (SO₂), Dióxido de Carbono (CO₂), Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) e Material Particulado Fino (PM_{2.5}) geradas durante as operações portuárias, estimando seus custos externos. Para avaliar o desempenho dos portos, os autores utilizaram dados econômicos e operacionais como número de contêineres movimentados (TEUs), volume de carga geral, número de escalas de navios e receita anual, além de indicadores de ecoeficiência que relacionam emissões e custos externos com essas variáveis operacionais.

Os resultados apontaram que Sines e Setúbal foram os portos com estimativas de custos externos totais mais elevados. Na sequência, vieram Leixões e Viana do Castelo. Com relação aos custos externos por poluente, as estimativas mais altas foram para óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e as partículas inaláveis (PM_{2,5}) (NUNES et al., 2019).

Segundo Nunes et al. (2019), no tocante aos portos que apresentaram a melhor ecoeficiência global, o porto Sines ficou na liderança, seguidos pelo porto de Leixões, porto de Viana do Castelo e porto de Setúbal. É importante destacar que, embora o porto de Setúbal tenha superado o porto de Viana do Castelo em termos econômicos, as conclusões foram opostas quando foram levados em conta aspectos sociais e ambientais. Os autores afirmam que isto realça a importância de se fazer uma investigação mais aprofundada dos indicadores sociais e ambientais, os quais não são considerados frequentemente.

Castellano et al. (2020) avaliaram os sistemas de gestão ambiental de 24 portos italianos em 2016, através da estratégia de múltiplas etapas e do uso da DEA. Na primeira etapa, propuseram dois indicadores compostos para avaliar: (i) a qualidade ambiental relacionada às emissões de gases de efeito estufa devido à atividade portuária (ou seja, a produção indesejável); e (ii) os esforços das autoridades portuárias para seguir um caminho pró-ambiental. Na segunda etapa, por meio do método DEA, avaliaram a eficiência relativa dos portos com o intuito de conhecer como a eficiência econômica persiste após contabilizar os custos ambientais e os compromissos pró-ambientais assumidos.

O modelo considerou como *outputs* desejáveis o volume de carga sólida e líquida movimentada e o número de contêineres (TEU). Para incorporar a dimensão ambiental, os autores utilizaram um indicador de qualidade ambiental denominado *Environmental Quality Index* (EQI), construído a partir das emissões de material particulado inalável (PM₁₀), amônia

(NH₃), dióxido de nitrogênio (NO₂), benzeno (C₆H₆) e dióxido de enxofre (SO₂) associadas às atividades portuárias. Como *inputs* foram considerados investimentos em capital, área do terminal e número de empregados, além de um indicador de esforço ambiental denominado *Green Port Efforts* (GPE), que reflete a adoção de estratégias de gestão ambiental, eco-design e certificações ambientais (CASTELLANO et al., 2020).

Segundo Castellano et al. (2020), a avaliação combinada em múltiplas etapas enfatiza como o estudo da eficiência na indústria do transporte marítimo não pode ser restrito somente à logística e ao fluxo de carga. A adição de variáveis relacionadas à sustentabilidade ambiental resultou numa mudança considerável nas pontuações de eficiência, indicando que a consideração dos espaços verdes é necessária para obter uma compreensão mais abrangente da eficácia das autoridades portuárias.

Castellano et al. (2020) concluíram que as pontuações de eficiência obtidas pela DEA mudaram significativamente quando uma correção ambiental foi adicionada ao processo de avaliação de desempenho. Em particular, as autoridades portuárias com maiores ganhos de desempenho foram aquelas com elevados Índices de Qualidade Ambiental (IQA) e de Esforços Portuários Verdes (EPV).

Song (2014) realizou um estudo no qual calculou o custo social associado às emissões atmosféricas no porto de Yangshan, em Shanghai, bem como elaborou um inventário das emissões dos navios no porto, referentes ao ano de 2009. Para obter as estimativas das emissões dos navios, o autor utilizou dados do sistema de identificação automática de navios (*Automatic Identification System* – AIS), apoiado por informações operacionais de cada embarcação em tempo real.

Os efeitos na saúde pública, no meio ambiente e no clima local da cidade costeira estão todos incluídos no custo social estimado. Em última análise, o estudo buscou analisar a ecoeficiência das operações portuárias ao relacionar as emissões dos navios com aspectos operacionais fundamentais do porto, tais como a movimentação de contêineres, o número de escalas de navios e as receitas portuárias.

De acordo com Song (2014), em 2009 o custo social total das emissões geradas pelos navios na área portuária de Yangshan foi estimado em cerca de US\$ 287 milhões, representando aproximadamente 4,4% da receita total do porto (SONG, 2013). Os três poluentes com maiores custos associados são o NO_x (US\$ 115 milhões), o PM_{2,5} (US\$ 74 milhões) e o SO_x (US\$ 69 milhões), representando, respectivamente, 40,1%, 28,9% e 24,2% do custo social total das emissões. Embora as emissões de CO₂ apresentem a maior quantidade em termos de tonelagem,

o seu custo social é comparativamente menor, sendo estimado em cerca de US\$ 16 milhões, o que representa aproximadamente 5,6% do custo social total das emissões.

Wan et al. (2019) também seguiram por esse caminho ao rastrear uma amostra de 28 navios que entraram e saíram do Porto de Shanghai, em 2017. De acordo com os autores, a maior parte do óleo combustível pesado utilizado em navios oceânicos possui alto teor de enxofre, o que é prejudicial ao meio ambiente e à saúde pública. Para regular a quantidade de enxofre no combustível, foram criadas Áreas de Controle de Emissões (ECA).

O estudo considerou como principais variáveis ambientais os poluentes SO_x, NO_x e PM₁₀, estimados a partir de um modelo que incorpora características técnicas e operacionais das embarcações, como potência do motor principal e auxiliar, fator de carga do motor, tempo de operação e fatores de emissão. Além disso, os autores analisam diferentes condições operacionais dos navios — *cruising*, velocidade reduzida, manobra e *hoteling* — e variáveis institucionais associadas às políticas de controle ambiental, como o teor de enxofre do combustível e os estágios de implementação das regulamentações ECA (WAN et al., 2019)

Na amostra avaliada, estão incluídos sete principais tipos de navios: navios petroleiros/químicos, navios porta-contêineres, graneleiros, navios *roll-on-roll-off*, navios transportadores de gás liquefeito, navios de carga geral e navios de cruzeiro. Segundo Wan et al. (2019) de todos os navios oceânicos que visitaram Shanghai em 2017, 95% enquadram-se nestas categorias. Para cada categoria da amostra, foram escolhidos quatro navios, de acordo com o seu tamanho.

De acordo com Wan et al. (2019), os regulamentos da ECA afetam principalmente as emissões de SO_x e NO_x. Isso porque, a ECA estabeleceu normas apenas sobre o teor de enxofre presentes na composição do combustível. Os navios petroleiros/produtos químicos e os navios porta-contêineres são os dois tipos de navios com as maiores taxas de declínio de emissões. Isso porque, os tipos e tamanhos dos navios afetam a diminuição das emissões. Segundo Wan et al. (2019), as normas especificadas pela ECA são eficazes e outros países costeiros deveriam considerar a implementação de um método semelhante.

No que se refere à dimensão social da sustentabilidade, a segurança e a saúde ocupacional dos trabalhadores marítimos assumem papel relevante na avaliação do desempenho das atividades portuárias e marítimas. Conforme destacado por Neis et al. (2025), as ocupações marítimas, que abrangem atividades como navegação, pesca, aquicultura marinha e trabalho portuário, caracterizam-se por elevados níveis de periculosidade, apresentando taxas expressivas de lesões e acidentes de trabalho. Para os autores, esse quadro decorre de características próprias dessas atividades, tais como a exposição a condições climáticas

adversas, o trabalho em plataformas móveis, a realização de tarefas em espaços confinados, o contato com equipamentos e cargas pesadas, além da irregularidade das jornadas e da distância, muitas vezes significativa, em relação aos serviços de saúde. Nesse contexto, indicadores relacionados à segurança do trabalho, como a taxa de frequência de acidentes, mostram-se pertinentes para a mensuração do desempenho social no ambiente portuário.

Além disso, Neis et al. (2025) observaram que, no setor marítimo, as lesões ocupacionais não apenas ocorrem em níveis elevados, mas também tendem a resultar em períodos mais prolongados de afastamento do trabalho e em dificuldades no retorno às atividades laborais. Os resultados do estudo indicam que a natureza perigosa dessas ocupações, associada à precariedade de determinados vínculos de trabalho, à subnotificação de acidentes e às limitações de acesso à assistência médica e à reabilitação, contribui para agravar os impactos sociais decorrentes dos acidentes laborais. Dessa forma, a utilização de indicadores como a taxa de frequência, ainda que tradicionalmente vinculada à segurança ocupacional, também pode ser compreendida como instrumento relevante para a análise na dimensão social, uma vez que permite avaliar, de maneira objetiva, as condições de trabalho, os riscos a que os trabalhadores estão expostos e a capacidade das organizações de promover ambientes laborais mais seguros.

Laxe et al. (2016) analisaram a sustentabilidade do sistema portuário espanhol por meio da construção de um índice sintético que integra indicadores econômicos e ambientais. No âmbito da dimensão econômica, os autores incluíram variáveis relacionadas à geração de valor e produtividade, entre as quais se destacam indicadores calculados por empregado, como receita por trabalhador e EBITDA por empregado. Esses indicadores permitem avaliar a eficiência com que os recursos humanos contribuem para o desempenho econômico das autoridades portuárias.

Para Laxe et al. (2016), a análise da produtividade associada à força de trabalho contribui para compreender as diferenças de desempenho entre os portos analisados. Para os autores, a eficiência econômica das autoridades portuárias não depende apenas do volume de cargas movimentadas ou da infraestrutura disponível, mas também da capacidade de transformar recursos produtivos, incluindo a força de trabalho, em resultados econômicos. Dessa forma, indicadores associados aos trabalhadores podem ser utilizados para avaliar o desempenho econômico das atividades portuárias

3.5 Sustentabilidade e portos

Além da questão da produtividade e eficiência, dos objetivos econômicos e da competitividade, os portos precisam se atentar à forma como as suas decisões e ações afetam o meio o ambiente, a comunidade a sua volta e, em um contexto mais amplo, o planeta. Isto exige

a adaptação inteligente de suas operações logísticas através da utilização de estruturas e ferramentas que apoiem e permitam a gestão, o controle e a observação contínua das consequências ambientais em todos os seus níveis operacionais.

Neste sentido, Panayides (2006) argumenta que é necessário um esforço simultâneo para implementar medidas de sustentabilidade nos portos. Por um lado, conciliar, em seu bojo de ações, as boas práticas que as empresas devem implementar objetivando demonstrar seu vigor financeiro e seu crescimento sustentável. Por outro, revelar sua atenção e zelo pelo meio ambiente e bem-estar social da comunidade a sua volta.

De acordo com Geerlings e Vellinga (2018), a sustentabilidade ambiental é uma das prioridades nas agendas de muitos portos marítimos devido às questões que envolvem as alterações climáticas, bem como às crescentes exigências colocadas para os setores de logística e transporte. Para os autores, existem várias fontes e tipos de emissões associadas aos portos, incluindo as provenientes da necessidade de utilização de caminhões pesados, máquinas de movimentação de carga e, também, de navios em alto mar. Como consequência deste cenário, os portos têm uma influência negativa substancial ao meio ambiente.

Para Davarzani (2016), do ponto de vista histórico, as emissões provenientes do transporte marítimo e das atividades portuárias tiveram um grande impacto na introdução de ações ecológicas nos negócios e na discussão sobre sustentabilidade ambiental. No entanto, só recentemente é que as emissões provenientes de navios e equipamentos portuários foram consideradas um problema e foram realizadas pesquisas correspondentes.

Segundo Fahimnia et al. (2015a, 2015b), nas operações marítimas e portuárias, não só é importante reduzir as emissões e utilizar estratégias de ações ecológicas reativas, como também existe uma tendência crescente para uma abordagem mais proativa. Para os autores, o tema e as questões relacionadas à ecologização da logística e do transporte da cadeia de abastecimento estão incluídos neste foco proativo.

Segundo Zis et al. (2014), existem aspectos tecnológicos, operacionais e financeiros nas questões relacionadas à sustentabilidade. Os autores citam exemplos do desenvolvimento de Áreas de Controle de Emissões (ECA), que começaram nas costas da América do Norte, no Mar Báltico e no Canal da Mancha. O desenvolvimento dessas regiões de controle é o resultado das preocupações dos intervenientes reguladores sobre os efeitos da queima de combustível com alto teor de enxofre em alto mar e próximas a regiões povoadas.

Os navios que operam nestas regiões foram obrigados a mudar para combustível com baixo teor de enxofre, que está atualmente limitado a 0,1% de enxofre por peso, em oposição a 3,5% fora das ECAs (de acordo com o Regulamento 14 da IMO1). Precauções adicionais

incluem vaporização lenta perto de portos e costas, a utilização de depuradores e uma mudança para combustíveis mais limpos, como gás natural liquefeito ou diesel marítimo (ZIS et al., 2014).

Fobbe et al. (2019) avaliaram a cobertura de 24 relatórios de sustentabilidade de portos marítimos que seguem as diretrizes da Iniciativa Global de Informação (*Global Reporting Initiative – GRI*). Os autores desenvolveram uma estrutura chamada de Avaliação Holística do Desempenho de Sustentabilidade em Portos Marítimos (*Holistic Assessment of Sustainability Performance in Seaports - HASPS*). O HASPS foi desenvolvido pelos autores, com base em uma revisão de literatura e na expansão das diretrizes da GRI, com uso de indicadores específicos por porto e questões interligadas.

Segundo Fobbe et al. (2019), o HASPS permite uma avaliação de sustentabilidade específica do porto ao longo do tempo e possibilita a comparação de cobertura e performance de sustentabilidade com outros portos. O HASPS baseia-se na Norma GRI e na ferramenta de Avaliação Gráfica de Desempenho de Sustentabilidade (*Graphical Assessment of Sustainability Performance - GRASP*).

Para Fobbe et al. (2019), as informações sobre o HASPS englobam questões dimensionais, tais como: econômica, ambiental, social, sistema portuário e de interligação. A interligação diz respeito a como essas questões mencionadas estão conectadas e interagem entre si. Um exemplo deste cenário é a interação entre a dimensão econômica e as demais dimensões: ambiental, social e sistema portuário.

Segundo Fobbe et al. (2019), os portos que utilizam as diretrizes, sistemas de gestão e as certificações da GRI apresentam uma boa abrangência em questões relacionadas a sustentabilidade. Por outro lado, o alcance e a abrangência, é melhor em portos que desenvolveram indicadores adicionais. O estudo destaca a importância de uma avaliação de sustentabilidade portuária harmonizada, que possa ser utilizada por todos os portos, independentemente das suas características específicas (FOBBE et al., 2019).

Ashrafi et al. (2019) pesquisaram a sustentabilidade corporativa nos portos do Canadá e dos EUA de 1º de novembro de 2017 a 30 de abril de 2018. Os autores investigaram a perspectiva dos executivos portuários sobre o tema, examinando as estratégias e práticas relacionadas à sustentabilidade portuária. Além disso, buscaram identificar os principais motivadores e obstáculos que influenciam a adoção e a execução da sustentabilidade corporativa nos portos. Os resultados demonstram que a maioria dos portos investigados adotou uma variedade de práticas e estratégias de sustentabilidade, incluindo programas de formação

e sensibilização para a sustentabilidade, relatórios, iniciativas e normas ambientais (como a certificação ISO 14001 e a *Green Marine*).

De acordo Ashrafi et al. (2019), os dados também demonstram que as implementações de métodos de sustentabilidade corporativa melhoraram as relações do porto com as suas partes interessadas, particularmente com o setor público, gestores políticos, comunidades locais e associações empresariais. No entanto, segundo os autores, embora a sustentabilidade corporativa seja valorizada na maioria dos portos, ela não é totalmente incorporada nas decisões estratégicas.

Para Ashrafi et al. (2019), foram encontrados um conjunto de fatores que influenciaram os portos na adoção de estratégias de sustentabilidade corporativa para serem implementados no futuro. Estes fatores incluem o desenvolvimento da cultura organizacional; o retorno do investimento, a gestão de risco e a cidadania corporativa. Ainda segundo o autor, além das dificuldades na execução, os principais desafios/barreiras à implementação de processos de sustentabilidade corporativa estão ligados aos custos de ações sustentáveis, a falta de competências pertinentes dentro da organização e pouco interesse dos clientes em serviços adicionais relacionados ao tema.

Berechman e Tseng (2012) estimaram os custos ambientais das emissões relacionadas com o porto de *Kaohsiung*, em Taiwan, no ano de 2010. O estudo se concentrou, principalmente, em compostos orgânicos voláteis e outros poluentes. Segundo os autores, os navios-tanque que utilizam o porto são os maiores responsáveis pelas emissões de poluentes, seguidos pelos navios porta-contêineres e pelos navios graneleiros.

De acordo com Berechman e Tseng (2012), os custos ambientais globais de navios e caminhões foram avaliados em cerca de 119,2 milhões e 4,2, milhões de dólares americanos, respectivamente. Embora em volume as emissões de CO₂ tenham sido as maiores de todas as emissões de poluentes de navios e caminhões, os três principais custos ambientais individuais foram os poluentes conhecidos como partículas inaláveis (MP₁₀), partículas inaláveis finas (MP_{2,5}) e os compostos orgânicos voláteis (*Volatile Organic Compounds* - VOC).

Tsolakis et al. (2021) estudaram a introdução da automação robótica na utilização de Veículos Guiados Automaticamente (VGA) em terminais de contêineres. O objetivo foi investigar os ganhos na sustentabilidade ambiental que surgem com a incorporação dessas ferramentas nas operações terrestres em portos de carga. Para tanto, os autores utilizaram o terminal de contêineres de Piraeus, na Grécia, para realizar as simulações de cenários e rotas para quantificar os benefícios ambientais relacionados ao uso de 3 diferentes tipos de VGA (GLP – movido a gás liquefeito; ELE – movido a energia elétrica; e DSL – movido a diesel).

As simulações realizadas consideraram o tempo de carregamento de 4 navios e 2 áreas de empilhamento de contêineres.

Segundo Tsolakis et al. (2021), os resultados da simulação demonstram que a implementação de algoritmos e inteligência artificial nas decisões de rotas de VGA tem um impacto positivo direto na distância total percorrida nas operações de movimentação de carga. Observou-se que a adoção da logística inteligente é denotada por um aumento no número de pontos de tomada de decisão durante a navegação autônoma do veículo robô. Isto permite que VGA percorra uma distância total menor em 5,6 km na movimentação total de 40 contêineres.

No que diz respeito às considerações ambientais, os veículos elétricos (ELE) são o tipo VGA preferido (em termos de desempenho do motor), o que faz sentido, uma vez que tais veículos quase não emitem poluentes. Além disso, os dados mostraram eficiência na relação emissões-energia de, aproximadamente, 18%, proporcionados pelo uso de VGA nas operações portuárias (TSOLAKIS et al., 2021).

De acordo com Tsolakis et al. (2021), os gestores devem considerar os efeitos positivos da sustentabilidade ambiental a longo prazo ao avaliar o retorno do investimento em inteligência artificial e da automação num ambiente de produção, como de um porto.

Acciaro et al. (2014) examinaram as inovações bem-sucedidas que melhoraram a sustentabilidade ambiental dos seguintes portos marítimos: Antuérpia e Zeebrugge (na Bélgica), Génova (na Itália), Hamburgo (na Alemanha), Los Angeles/Long Beach (nos Estados Unidos), Rijeka (na Croácia) e o porto de Singapura (no sudeste asiático). Para cada porto, foram selecionados uma ou duas ações de política ambiental e, dentro de cada uma dessas ações, uma inovação que pudesse ser classificada em termos de sucesso. A estrutura proposta utilizou um sistema de classificação para avaliar o sucesso dos tipos de inovação em relação a um conjunto de objetivos verdes predeterminados.

Os objetivos foram elaborados revisando as principais funções da autoridade portuária e investigando como a sustentabilidade ambiental poderia influenciar ou interferir nas funções da autoridade portuária. Essas funções são: função de proprietário; função reguladora; função de operador e função de gestor da comunidade (ACCIARO et al., 2014).

Segundo Acciaro et al. (2014), embora as ações políticas, da amostra utilizada, se centrassem numa variedade de objetivos verdes, os objetivos ligados à função reguladora e a função proprietário se sobressaíram. No que se refere à função reguladora, as autoridades portuárias visam regular as atividades dentro do porto, incluindo especificamente funções de controle, vigilância e policiamento, além de proteção ambiental.

Com relação à função proprietário, sua característica estratégica principal é o gerenciamento das áreas e das atividades confiadas à autoridade portuária, incluindo a gestão, manutenção e desenvolvimento do património portuário. Dentro deste escopo, está o fornecimento de infraestrutura/instalações portuárias, criação e execução de planos e políticas de desenvolvimento relacionados com a exploração das propriedades (por exemplo, taxas portuárias) (ACCIARO et al., 2014).

De acordo com Acciaro et al. (2014), a análise forneceu duas classificações: uma relacionada ao sucesso da inovação e a outra sobre a relevância da ação política associada a um conjunto de objetivos verdes claramente definidos. Na categoria função proprietário, no *ranking* de sucesso da inovação, o item mais consistente foi o de “compartilhamento de informações com referência à conformidade ambiental”. Na categoria de gestor de comunidade, as classificações de inovação que receberam as pontuações mais altas são os itens relacionados às atividades de marketing e comunicação que apresentam o avanço da sustentabilidade ambiental do porto e o estímulo/ajuda aos usuários do porto na adoção e de práticas verdes.

Na categoria função proprietário, a perspectiva da relevância da ação política foi o que teve maior destaque com os seguintes itens: (i) garantir a sustentabilidade ambiental de atividades econômicas ligadas ao porto (ex: pescas e turismo); (ii) incluir considerações ambientais na seleção e gestão de locatários e na seleção do tráfego de carga ou frota de navios; e (iii) atenção aos métodos de construção sustentáveis. Por fim, na categoria função reguladora, a perspectiva da relevância da ação política foi evidenciada nos itens: (i) regular questões ambientais dentro do porto; e (ii) monitorar a poluição (ACCIARO et al., 2014).

Taljaard et al. (2021) produziram um estudo no sentido de abordar o meio ambiente como um parceiro no desenvolvimento portuário. Os autores se basearam em experiências dos portos sul-africanos, e propuseram uma mudança conceitual na posição do meio ambiente como sendo considerado um “freio de mão verde” para um “parceiro igual” dos portos (TALJAARD et al., 2014, p.08).

Como resultado do trabalho, Taljaard et al. (2021) elaboraram um modelo de infraestrutura portuária, onde camadas de operação, gestão e serviços também se expandem. Desta forma, a gestão ambiental é explicitamente reconhecida como um componente integrante das operações portuárias. Por outro lado, a prestação de serviços já não se refere apenas ao transporte marítimo e às atividades de valor adicionado pertinentes, mas, também, leva em consideração outros serviços ecossistêmicos. Isso é possível graças aos espaços seguros e às águas protegidas criadas pela infraestrutura portuária e que oferecem benefícios como a pesca e berçário para diversas biotas do estuário marinho.

Taljaard et al. (2021) também propuseram um ciclo de desenvolvimento portuário, a fim de incorporar o ambiente natural ao desenvolvimento portuário. Este ciclo conceitualiza os vários processos de desenvolvimento portuário numa ordem lógica e cíclica, começando com a seleção do local, o planejamento diretor, concepção, construção, operações e terminando com monitorização e auditoria.

Segundo Taljaard et al. (2021), o custo da aquisição de dados e informações ambientais, que constitui a base de todas as questões ambientais relativas aos portos, é elevado. Os portos devem, portanto, fazer o investimento institucional necessário para criar planos de monitorização a longo prazo e que sejam coordenados através dos muitos processos de avaliação ambiental e de sistemas de gestão. Isso permitiria a realização de um monitoramento econômico destinado ao uso polivalente. Além disso, é crucial investir na gestão da informação, no arquivo e em dados ambientais facilmente acessíveis, a fim de apoiar o intercâmbio multi-institucional de conhecimentos e informações sobre questões ambientais portuárias.

3.6 Indicadores de sustentabilidade em portos

Os indicadores de desempenho são instrumentos importantes para avaliar o desempenho ambiental de um porto. Nesse sentido, Rodrigues et al. (2021) realizaram um estudo com o objetivo de identificar como esses instrumentos afetam as avaliações de sustentabilidade das organizações portuárias. Para tanto, os autores utilizaram os indicadores de desempenho ambientais, oriundos das diretrizes da Iniciativa Global de Informação – GRI. Na sequência, aplicaram a técnica de *benchmarking* para comparar o desempenho de 8 portos marítimos europeus distintos para os anos de 2008 a 2017.

Segundo Rodrigues et al. (2021), o *benchmarking* permite uma análise completa do desempenho e uma comparação de várias empresas portuárias. Foram investigados 4 portos portugueses: (i) o porto de Aveiro; (ii) o porto da Figueira da Foz; (iii) o porto de Leixões (APDL); e (iv) o porto de Viana do Castelo. Além desses, os portos marítimos espanhóis de Valência e Barcelona também foram selecionados, bem como os portos marítimos alemães de Hamburgo e Bremen-Bremerhaven.

Os indicadores selecionados foram tanto dos *inputs* do processo produtivo (consumo de energia elétrica e consumo de água), como dos *outputs* (emissões atmosféricas) (RODRIGUES et al., 2021).

De acordo com Rodrigues et al. (2021), os portos que obtiveram melhor desempenho ambiental foram: Bremen, no consumo de água; Aveiro, no consumo de energia; e Figueira, no quesito emissões. Entretanto, os autores ressaltam que a amostra de indicadores ambientais

é limitada, sendo, portanto, passiva de falhas. Além disso, dependendo do indicador, as organizações podem apresentar níveis de desempenho distintos. Por exemplo, o porto de Aveiro apresenta um desempenho excelente no que diz respeito ao consumo de energia, mas um desempenho mais fraco em termos de consumo de água e emissões de CO₂.

Puig et al. (2020) apresentaram um estudo ilustrando a evolução, ao longo do tempo, da situação ambiental dos portos europeus para o ano de 2018. As informações foram obtidas a partir das respostas de 90 portos europeus membros do EcoPorts ao Método de Autodiagnóstico (*Self Diagnosis Method* – SDM), geridos pela Organização Europeia dos Portos Marítimos (*European Sea Ports Organisation* – ESPO).

Segundo Puig et al. (2020), os resultados ofereceram informações sobre 54 indicadores ao todo. Importante destacar que o indicador relacionado ao inventário de legislação ambiental é o indicador com a maior taxa de implementação nos portos, com 96,7%. Na sequência, vem o indicador pertinente a implantação de política ambiental, com a taxa de 95,7%.

De acordo com Puig et al. (2020), os portos reconhecem a importância das alterações climáticas e estão fazendo ajustes em suas infraestruturas para mitigar as suas consequências. A gestão de resíduos é um dos aspectos ambiental que mais vem sendo monitorado pelos portos, gerando uma crescente implementação de iniciativas verdes. Para os autores, uma das prioridades é a qualidade do ar que, desde 2013, está entre as 10 primeiras prioridades ambientais. As alterações climáticas subiram para o 7º lugar na lista. Dos portos da amostra, 50% oferecem a opção de taxas diferenciadas para embarcações verdes. Além disso, há um aumento no número de portos que dispõem de abastecimento de GNL. O aumento no número de portos com sistema de gestão ambiental, com qualidade reconhecida, é um aspecto positivo que ajuda a sustentar a política de conformidade da ESPO (PUIG et al., 2021).

Oh et al. (2018) pesquisaram os parâmetros mais importantes para avaliar a sustentabilidade dos portos da Coreia do Sul, aplicando a metodologia de análise importância-desempenho (*importance-performance analysis* – IPA). O trabalho pesquisou 27 principais indicadores para avaliar a sustentabilidade dos portos, abrangendo as três dimensões da sustentabilidade (ambiental, econômica e social). As informações utilizadas derivaram de uma pesquisa aplicada aos gestores portuários para aferir a importância das medidas de avaliação identificadas e a percepção do desempenho.

De acordo com Oh et al. (2018), em uma escala de classificação que vai até 5 pontos, verificou-se que as pontuações médias para a percepção de importância para os 27 indicadores da avaliação são superiores a 3,5 para todos eles. Segundo os autores, isso demonstra que os

gestores portuários na Coreia do Sul atribuem significativa relevância às 27 medidas de avaliação de sustentabilidade ambiental portuária.

Segundo Oh et al. (2018), os resultados sugerem que a percepção dos gestores portuários em relação ao seu próprio nível de desempenho nos critérios de avaliação de sustentabilidade é relativamente alta, pois a classificação nos 27 indicadores de sustentabilidade ficou entre 2,8 e 4,0 na escala de 5 pontos.

Entre os três componentes da avaliação de sustentabilidade, é importante notar que os itens de avaliação relacionados a questões econômicas tiveram a média de importância mais elevada (média de 4,15). Seguiram-se os itens relacionados às questões ambientais (média de 4,14) e às questões sociais (média de 4,09). Entretanto, os resultados indicam que o item do escopo econômico (oferta de oportunidades de emprego) foi considerado a medida mais importante (OH et al., 2018).

Hossain et al. (2021) pesquisaram a relação existente entre a sustentabilidade dos portos marítimos e sua evolução. Para tanto, os autores selecionaram para análise 36 portos marítimos da América do Norte, Europa e Ásia/Pacífico. Além disso, predefiniram 25 indicadores para identificar tendências operacionais ligadas à sustentabilidade, reivindicadas pelos portos marítimos. Os dados foram coletados de janeiro a abril de 2017.

Os resultados indicaram que 92% dos portos estabeleceram políticas ambientais que estão disponíveis para o público em geral. Além disso, respaldaram uma declaração escrita dos executivos portuários que inclui o compromisso de gerir os impactos ambientais e cumprir as leis e regulamentos (HOSSAIN et al., 2021). De acordo com Hossain et al. (2021), os portos da União Europeia tem maior propensão para implantar sistemas de gestão ambiental. Por outro lado, nos portos da Ásia/Pacífico e da América do Norte, menos de metade implementou tais programas.

Com relação aos gases de efeito estufa, 80% dos portos da União Europeia completaram inventários de emissões em comparação com 67% dos portos da América do Norte e 42% dos portos da Ásia/Pacífico. Mais de 70% dos portos implementaram medidas de proteção do habitat da vida selvagem (HOSSAIN et al., 2021).

Segundo com Hossain et al. (2021), 3 portos da América do Norte e 4 portos da União Europeia obtiveram pontuações de sustentabilidade elevadas. Na escala de sustentabilidade moderada, estão inclusos 5 portos da América do Norte, 8 da União Europeia e 10 portos da Ásia/Pacífico. Os portos da União Europeia lideram em sustentabilidade, não tendo nenhum porto com pontuações de sustentabilidade consideradas baixas.

Di Vaio et al. (2018) analisaram como as ferramentas de gestão são utilizadas pelas autoridades portuárias para reduzir e prevenir os efeitos ambientais negativos dos portos. Os autores realizaram uma investigação em relatórios sobre os indicadores de desempenho relacionados a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental no setor portuário da Itália, de 2002 a 2017. Na sequência, aplicaram um método qualitativo em três portos marítimos italianos (Cagliari, Gênova e Nápoles), aplicando o modelo *Balanced Scorecard* para confirmar os principais indicadores de desempenho gerenciais (*key performance indicators* – KPIs).

Segundo Di Vaio et al. (2018), os resultados demonstram que as questões mais relevantes e consideradas prioritárias para a autoridade portuária de Nápoles são: a gestão de resíduos, o consumo de energia, a qualidade do ar e a relação com a comunidade. No que diz respeito ao porto de Cagliari, este adota um programa de monitorização ambiental que verifica a gestão de resíduos e a qualidade do ar. Além disso, o porto adota diversas ações verdes, como por exemplo: energia eólica e descontos para navios que utilizam óleos com baixo teor de enxofre e filtros de partículas que reduzem as emissões de NO_x.

No porto de Gênova, os principais processos de sustentabilidade ambiental e de eficiência energética dizem respeito à gestão de resíduos, qualidade da água, ruído, qualidade do ar, qualidade dos sedimentos, biodiversidade e qualidade do solo. O sistema de gestão ambiental do porto (ISO 14001) está orientado para a redução de CO₂ e para a poupança de energia (DI VAIO et al., 2018).

Para Di Vaio et al. (2018), os relatórios sobre indicadores de desempenho confirmam a utilidade, relevância e viabilidade dos KPIs gerenciais relacionados à sustentabilidade ambiental. Estes permitem à autoridade portuária recolher dados significativos e elaborar informações para a tomada de decisão. Além disso, para os autores, os relatórios auxiliam na alocação de recursos de acordo com os planos ambientais e energéticos anuais, sendo fundamentais para monitorar as melhorias e interpretar os principais determinantes de desempenho.

Narasimha et al. (2022) investigaram as dimensões propostas para o desenvolvimento sustentável em 12 grandes portos da Índia. Os autores aplicaram entrevistas semiestruturadas a 87 profissionais portuários. Na sequência, os autores realizaram o Processo Hierárquico Analítico Fuzzy (*Fuzzy Analytical Hierarchy Process* – FAHP) com base em 23 contribuições de autoridades portuárias indianas. O estudo também adotou 115 indicadores relacionados à sustentabilidade dos portos marítimos utilizados mundialmente.

Segundo Narasimha et al., (2022), os resultados da pesquisa indicaram que a dimensão desempenho econômico foi considerada o aspectos mais importante e com o maior peso

atribuído. Na sequência vieram: dimensão desempenho de sustentabilidade, dimensão desempenho ambiental e dimensão desempenho social.

De acordo com Narasimha et al. (2022), embora as atividades dos programas sociais tenham tido pesos menores, os portos marítimos indianos estão caminhando no sentido da implementação de uma variedade de programas sociais, os quais buscam facilitar o desenvolvimento comunitário nas áreas portuárias. Para os autores, os gestores portuários e os especialistas marítimos indianos confirmaram que a maioria dos indicadores projetados pelo estudo, ou práticas portuárias sustentáveis, deve ser incorporada ao desenvolvimento sustentável dos portos marítimos.

3.7 Síntese do capítulo

Como forma de finalizar e sintetizar o Capítulo 3, são apresentados os Quadros 5, 6, 7, 8, 9 e 10, destacando algumas características dos trabalhos visitados.

Quadro 5. Resumo da abordagem de estrutura de propriedade

Ano	Autores	Metodologia	<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
2001	Valentine; Gray	DEA + análise de cluster	Comprimento total do cais; comprimento do cais destinado à operação de contêineres	Volume de contêineres movimentados; volume total de carga movimentada
2003	Barros	DEA + índice de produtividade de <i>Malmquist</i>	Trabalho (número de trabalhadores); capital (valor contábil dos ativos)	Número de navios atendidos; movimentação total de carga; tonelagem bruta; carga geral fracionada; carga containerizada; carga a granel sólida; carga a granel líquida
2004	Barros; Athanasios	DEA	Trabalho (número de empregados); capital fixo	Número de navios atendidos; volume total de carga movimentada; carga movimentada; carga containerizada
2005	Tongzon; Heng	Fronteira estocástica (SFA)	Comprimento do cais; área do terminal; número de guindastes de cais	Movimentação total de contêineres (TEU)

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 6. Resumo da abordagem operacional

Ano	Autores	Metodologia	Inputs	Outputs
2013	Wanke	Network DEA em dois estágios	1º estágio: número de berços; área de armazenagem; área de pátio. 2º estágio: movimentações/frequências como inputs intermediários	1º estágio: frequências de embarques de granéis sólidos e contêineres. 2º estágio: throughput de granéis sólidos e de contêineres
2020	Périco; Silva	DEA	Número de berços; área de armazenagem; tempo médio de espera para atracação	Volume total de carga movimentada
2015	Oliveira; Cariou	DEA + regressão truncada <i>bootstrap</i>	Comprimento do cais; área do terminal; número de guindastes de cais	Movimentação total de contêineres (TEU)
2013	Yuen et al.	DEA + modelos de regressão	Número de berços; comprimento do cais; área do terminal; número de guindastes de cais; número de guindastes de pátio	Movimentação de contêineres (TEU)
2010	Wu; Goh	DEA + autoavaliação e avaliação por pares	Área do terminal; número de guindastes de cais; número de berços para contêineres; comprimento do terminal	Movimentação de contêineres (TEU)
2021	Nikolaou; Dimitriou	DEA + regressão Tobit	Número de guindastes de cais; área de empilhamento; calado máximo	Desempenho dos terminais em serviço de TEUs
2008	González; Trujillo	Função distância / análise de eficiência técnica	Infraestrutura e serviços portuários relacionados à movimentação de contêineres	Eficiência técnica e mudança tecnológica nas operações portuárias
2010	Hung et al.	DEA + bootstrap	Área do terminal; número de guindastes de cais; número de berços de contêineres; comprimento do terminal	Movimentação total de contêineres (TEU)
2021	Nguyen et al.	DEA SBM + DEA <i>Malmquist</i> + DEA com <i>undesirable output</i>	Variáveis operacionais dos terminais de contêineres; inputs físicos e operacionais	Movimentação de contêineres; produtividade; outputs indesejáveis ambientais

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 7. Resumo da abordagem econômica

Ano	Autores	Metodologia	Inputs	Outputs
2005	Wang et al.	Discussão teórica da produção portuária / economia industrial aplicada aos portos	Trabalho; capital; infraestrutura; equipamentos portuários	Movimentação de contêineres (TEU); volume de carga
2007	Trujillo; Tovar	Fronteira estocástica com função distância orientada ao produto	Número de empregados; área total do porto	Volume de contêineres movimentados; volume de outras cargas; número de passageiros
2006	Cullinane; Wang	DEA	Comprimento do cais; área do terminal; equipamentos de movimentação de contêineres	Volume total de contêineres movimentados (TEU)

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 8. Resumo das abordagens ambiental e social

Ano	Autores	Metodologia	Inputs	Outputs
2019	Nunes et al.	Avaliação de ecoeficiência / custos externos	Indicadores econômicos e operacionais: número de contêineres movimentados, volume de carga geral, número de escalas de navios, receita anual; emissões atmosféricas	Custos externos das emissões; ecoeficiência portuária
2020	Castellano et al.	Estratégia em múltiplas etapas + DEA	Investimentos em capital; área do terminal; número de empregados; <i>Green Port Efforts</i> (GPE)	<i>Outputs</i> desejáveis: carga sólida movimentada; carga líquida movimentada; contêineres (TEU); indicador ambiental EQI
2013	Song	Inventário de emissões + avaliação de ecoeficiência	Variáveis operacionais dos navios e do porto: potência do motor, velocidade, distância percorrida, duração das operações, capacidade das embarcações, número de escalas	Emissões atmosféricas; custo social das emissões; indicadores de ecoeficiência
2019	Wan et al.	Modelo de emissões / avaliação dos efeitos de ECA	Potência do motor principal e auxiliar; fator de carga; tempo de operação; teor de enxofre do combustível; condições operacionais dos navios	Emissões de SO _x , NO _x e PM ₁₀

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 9. Resumo dos indicadores de sustentabilidade em portos

Referência / Indicadores utilizados	Método	Resumo dos Resultados
Rodrigues et al. (2021) Indicadores: Consumo de água dentro das áreas portuárias e por tonelada de carga movimentada; Consumo de energia por estação de trabalho e Emissões atmosféricas dentro das áreas portuárias e por tonelada de carga movimentada.	Técnica de <i>benchmarking</i>	Os portos que obtiveram melhor desempenho ambiental foram: Bremen, no consumo de água; Aveiro, no consumo de energia; e Figueira, no quesito emissões.
Puig et al. (2020) Indicadores: Política ambiental; Organização e gestão de pessoas; Conscientização e treinamento ambiental; Comunicação; Gestão operacional; Planejamento de emergência; Questões ambientais e monitoramento; Revisão e auditoria e Serviços verdes.	Método de Autodiagnóstico (SDM)	A gestão de resíduos é um dos aspectos ambientais que mais vem sendo monitorado pelos portos, gerando uma crescente implementação de iniciativas verdes. Dos portos da amostra, 50% oferecem a opção de taxas diferenciadas para embarcações verdes.
Oh <i>et al.</i> (2018) Indicadores: Ambiental: 1 Evitar o uso de terras não poluídas na área portuária; 2 Melhorar a paisagem; 3 Evitar a destruição ambiental durante a dragagem; 4 Considerar a proteção ambiental ao manusear cargas; 5 Usar materiais recicláveis ou ecológicos na construção de portos; 6 Proteger o ambiente ecológico na área portuária; 7 Reduzir a poluição sonora; 8 Mitigar a influência da luz sobre os moradores vizinhos; 9 Prevenir o descarte de efluentes e manter a qualidade da água; 10 Manter a qualidade do ar; 11 Reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Econômico: 12 Facilitar o crescimento econômico; 13 Investir em infraestrutura portuária; 14 Estabelecer financiamento para o desenvolvimento portuário; 15 Atrair investimento estrangeiro; 16 Apoiar o desenvolvimento da indústria do turismo; 17 Oferecer oportunidades de emprego; 18 Garantir que a carga seja manuseada com segurança e eficácia. Social: 19 Reconhecer os requisitos da comunidade vizinha; 20 Dar suporte às atividades sociais da comunidade; 21 Fornecer suporte para treinamento e educação dos funcionários; 22 Expandir os benefícios de bem-estar dos funcionários; 23 Garantir segurança do emprego da equipe; 24 Fortalecimento da gestão da segurança portuária; 25 Garantia da igualdade social no emprego; 26 Consultoria a grupos de interesse ao elaborar projetos portuários; 27 Fortalecimento da infraestrutura portuária para contribuição social.	Análise importância-desempenho (IPA)	Em uma escala de classificação que vai até 5 pontos, verificou-se que as pontuações médias para a percepção de importância para os 27 indicadores da avaliação são superiores a 3,5 para todos eles. Segundo os autores, isso demonstra que os gestores portuários na Coreia do Sul atribuem significativa relevância às 27 medidas de avaliação de sustentabilidade ambiental portuária. A percepção dos gestores portuários em relação ao seu próprio nível de desempenho nos critérios de avaliação de sustentabilidade é relativamente alta, pois a classificação nos 27 indicadores de sustentabilidade ficou entre 2,8 e 4,0 na escala de 5 pontos.

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 10. Resumo dos indicadores de sustentabilidade em portos – continuação

Referência / Indicadores utilizados	Método	Resumo dos Resultados
Hossain et al. (2021) Indicadores: Política Ambiental (PA); Disponibilidade pública da PA; Sistema de Gestão Ambiental; Certificação EMS (ISO 14001); Monitoramento da Qualidade do Ar; Monitoramento da Qualidade da Água; Monitoramento do Nível de Ruído; Monitoramento da Qualidade dos Sedimentos; Proteção da Vida Selvagem; Eficiência e Conservação Energética; Uso de Energia Renovável; Inventário de Emissões; Energia de Costa; Instalação de GNL; Incentivos Verdes; Desenvolvimento de Infraestrutura Verde/Edifício; Disponibilidade do Relatório de Monitoramento Ambiental; Relatório de Sustentabilidade; Relatório de Sustentabilidade com Diretrizes; Engajamento da Comunidade; Barra de Menu Ambiental no site do porto; Profissional Ambiental; Pesquisa e Desenvolvimento (P&D); Adaptação às Mudanças Climáticas; Sistema de Revisão Ambiental do Porto	Estatística descritiva utilizando o <i>software</i> SPSS	Os portos da União Europeia têm maior propensão para implantar Sistemas de Gestão Ambiental. Por outro lado, nos portos da Ásia/Pacífico e da América do Norte, menos de metade implementou tais programas. Com relação aos gases de efeito estufa, 80% dos portos da União Europeia completaram inventários de emissões em comparação com 67% dos portos da América do Norte e 42% dos portos da Ásia/Pacífico.
Di Vaio et al. (2018) <u>Ações Ambientais e Energéticas - Porto de Cagliari:</u> Abastecimento de Gás Natural Liquefeito (GNL); Fornecimento de energia em terra; Incentivos para empresas que usam hidrovias interiores (por exemplo, navios) para distribuição de carga; Descontos para navios que usam óleos de bunker com baixo teor de enxofre; Incentivos para empresas que tratam seus resíduos; Descontos para navios que usam filtros práticos que reduzem as emissões de Nox. Incentivos para reduzir a velocidade da embarcação de acordo com uma chegada virtual. Redução da emissão de CO₂; Economia de energia; Certificados de navios verdes; Redução de emissão de GEE (gás de efeito estufa); <u>Ações Ambientais e Energéticas - Porto de Gênova:</u> Fornecimento de energia em terra; Taxas diferenciadas para implementação; ações verdes; Redução de emissão de CO₂; Economia de energia; Cogeração 4 Biomassa; GNL. <u>Ações Ambientais e Energéticas - Porto de Nápoles:</u> Economia de energia; Abastecimento de Gás Natural Liquefeito (GNL).	Modelo <i>Balanced Scorecard</i>	As questões mais relevantes e consideradas prioritárias para a autoridade portuária de Nápoles são: gestão de resíduos, o consumo de energia, a qualidade do ar e a relação com a comunidade. No que diz respeito ao porto de Cagliari, este adota um programa de monitorização ambiental que verifica a gestão de resíduos e a qualidade do ar. No porto de Gênova, os principais processos de sustentabilidade ambiental e de eficiência energética dizem respeito à gestão de resíduos, qualidade da água, ruído, qualidade do ar, qualidade dos sedimentos, biodiversidade e qualidade do solo.
Narasimha et al. (2022) A pesquisa adotou 115 principais indicadores de desenvolvimento sustentável dos portos marítimos que foram derivados de uma ampla gama de estudos de literatura sobre sustentabilidade dos portos marítimos em todo o mundo. Link do trabalho: https://www.researchgate.net/publication/360225718_Sustainability_Performance_Assessment_Framework_for_Major_Seaports_in_India	Processo Hierárquico Analítico (FAHP)	A dimensão desempenho econômico foi considerada o aspecto mais importante e com o maior peso atribuído. Na sequência vieram: dimensão desempenho de sustentabilidade, dimensão desempenho ambiental e dimensão desempenho social.

Fonte: Elaboração própria.

4. MÉTODO DE PESQUISA

Conforme anunciado na seção introdutória deste trabalho, o objetivo geral dessa pesquisa foi, a partir da Análise Envoltória de Dados, calcular a eficiência de 11 portos (sendo 6 internacionais e 5 nacionais), sob a ótica da sustentabilidade, contemplando as dimensões econômica, social e ambiental, do período de 2017 a 2024 e, ainda considerando a DEA, criar um índice composto que mensure a sustentabilidade desses mesmos portos, fornecendo um *ranking* robusto, abrangendo as três dimensões da sustentabilidade.

Para alcançar tal objetivo, três métodos foram adotados: (i) revisão sistemática de literatura; (ii) análise envoltória de dados, para o cálculo dos indicadores de eficiência dos portos investigados; (iii) análise envoltória de dados, para o cálculo dos índices compostos dos portos investigados.

As três primeiras seções deste capítulo são dedicadas a cada uma das metodologias adotadas. A última seção do capítulo traz uma síntese da técnica de análise empregada nesta tese. Ressalta-se, apenas, que os resultados obtidos do processo de revisão sistemática de literatura já foram apresentados nos Capítulos 1 e 2; sendo os resultados da aplicação dos métodos (ii) e (iii) apresentados no Capítulo 5.

4.1 Revisão sistemática de literatura

Esta tese é composta por dois capítulos de revisão de literatura, os Capítulos 2 e 3. O segundo capítulo tratou, de forma mais técnica e documental, de trazer um panorama da matriz de transporte brasileira, culminando no protagonismo dos portos no que diz respeito à movimentação de carga e na balança comercial brasileira. Tal conclusão, em relação à balança comercial, pode ser estendida aos portos de outros países também, uma vez que o modal de transporte predominante, para movimentação de carga, na maior parte dos países, é o marítimo.

Como sequência lógica, atenção integral foi dedicada ao setor portuário brasileiro, assim como aos 20 maiores portos do mundo. E, nesse sentido, seja para caracterizar a matriz de transporte brasileira, seja para caracterizar o setor portuário no país, assim como para brevemente caracterizar os 20 maiores portos do mundo, as bases de dados públicas oficiais brasileiras, as bases de dados setoriais e os sites dos portos investigados se mostraram bastante adequados para estes propósitos.

Nesse sentido, as seguintes bases foram amplamente utilizadas na elaboração do Capítulo 2 desta tese:

- Confederação Nacional do Transporte (CNT);

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA);
- Empresa de Planejamento e Logística (EPL);
- Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL);
- Associação de Terminais Portuários Privados (ATP);
- Comex Stat;
- Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ);
- World Shipping Council (WSC);
- Global Issues;
- The Maritime Executive;
- PSA Singapore;
- Zhe Jiang Sea Port;
- Guangzhou Port Group;
- Qingdao Port International;
- Tianjin Port Development Holdings Limited;
- Dubai Ports World (DP WORLD);
- Port Klang Authority;
- Xiamen Port Development Co.;
- Yearbook of Statistics Antwerp-Bruges;
- Taiwan International Ports Corporation;
- Los Angeles Port;
- Port of Hamburg;
- Pelabuhan Tanjung Pelepas Sdn Bhd (PTP);
- Hutchison Ports Thailand;
- E-Ports Co.;
- Liaoning Port Co.

Também foram consultados os seguintes relatórios dos seguintes portos internacionais e nacionais:

Portos internacionais:

- Porto de Shanghai: Sustainability / Annual / ESG Report – 2017 a 2024;

- Porto de Singapura (MPA): Sustainability / Annual / ESG Report – 2017 a 2024;
- Porto de Hamburgo: Sustainability / Annual / ESG Report – 2017 a 2024;
- Porto de Roterdã: Sustainability / Annual / ESG Report - 2017 a 2024;
- Porto de Sines e do Algarve: Sustainability / Annual / ESG Report - 2017 a 2024;
- Porto de Valência: Sustainability / Annual / ESG Report - 2017 a 2024.

Portos nacionais:

- Porto de Santos: Relatório de Sustentabilidade Anual – ESG - 2017 a 2024;
- Porto de Paranaguá: Relatório de Sustentabilidade Anual – ESG - 2017 a 2024;
- Porto de Suape: Relatório de Sustentabilidade Anual – ESG - 2017 a 2024;
- Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí: Relatório de Sustentabilidade Anual – ESG - 2017 a 2024;
- Porto de Itaquí: Relatório de Sustentabilidade Anual – ESG - 2017 a 2024;

Em atenção ao Capítulo 3, sobre a eficiência portuária e sustentabilidade em portos, foi realizada uma pesquisa bibliométrica para identificar os trabalhos que mais estivessem alinhados ao objetivo do capítulo. Nesse sentido, foi selecionada a base de dados *Scopus* para buscar trabalhos da área. A justificativa pela referida base está relacionada ao fato de ela ser considerada de maior abrangência e cobertura e possuir mais conteúdo de acesso aberto.

Os parâmetros iniciais restringiram a busca ao período pós ano 2000, concentrando, apenas, em artigos científicos de periódicos. A restrição temporal de origem está relacionada ao fato de a discussão acadêmica sobre a temática de sustentabilidade em portos estar mais concentrada em períodos mais recentes, uma vez que somente a partir de 2008 passou a haver certo empenho das autoridades portuárias em aderir aos princípios da sustentabilidade.

Em atenção à restrição de selecionar, somente, artigos científicos de periódicos, a justificativa está relacionada às questões relacionadas ao rigor técnico demandado pelos periódicos, garantindo revisão por pares e exigência de metodologia sistematizada, possibilitando maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Para a temática de eficiência portuária, os termos “*port efficiency*”, “*port performance*” (e seus equivalentes em português) foram utilizados como parâmetros iniciais de busca. A inserção da função de busca retornou, inicialmente, a seleção de 86 artigos científicos, os quais foram selecionados para a próxima etapa de refino da busca.

A partir das categorias e subcategorias do *Scopus*, foram selecionadas as que mais são correlacionadas ao tema do trabalho, sendo elas: *Administration, Management and Accounting (General Administration, Management and Accounting Industrial Relations)*; *Economy, Econometrics and Finance (Economics, Econometrics and Finance)*; *Environmental Sciences (Ecological Modeling, Environmental Engineering, Management, Monitoring, Policies and Legislation, Water Science and Technology)*; *Multidisciplinary (Multidisciplinary)*; *Social Sciences (Public Administration, Transport)*, sendo as demais categorias descartadas, restando 45 artigos selecionados.

A partir da leitura do *abstract* dos 45 artigos selecionados, novo filtro foi realizado, buscando selecionar somente aqueles que, de alguma forma, se utilizaram de metodologia quantitativa para obter seus resultados. Ressalta-se que tal filtro foi realizado de forma manual, de maneira a obter maior precisão nos resultados obtidos. Nesse sentido, para compor as seções 3.1, 3.2 e 3.3 do terceiro capítulo desta tese, foram selecionados 16 artigos científicos para análise. O Quadro 11 apresenta a lista de trabalhos analisados nas subseções iniciais do terceiro capítulo.

Quadro 11. Trabalhos analisados nas primeiras seções do Capítulo 3

Ano	Autores
2001	VALENTINE, V. F.; GRAY, R.
2003	BARROS, C. P.
2004	BARROS, C. P.; ATHANASSIOU, M.
2005	TONGZON, J.; HENG, W.U.
2005	WANG, J. J.; CULLINANE, K.; SONG, DONG-WOOK.
2006	CULLINANE, K. P. B; WANG, T. F.
2007	TRUJILLO, L.; TOVAR, B.
2008	GONZÁLEZ, M. M.; TRUJILLO, L.
2010	WU, YEN-CHUN J.; GOH, M.
2010	HUNG, SHIU-WAN; LU, WEN-MIN; WANG, TUNG-PAO
2013	WANKE, P. F
2013	YUEN, A. CHI-LOK; ZHANG, A; CHEUNG, W.
2015	OLIVEIRA, G. F.; CARIU, P.
2020	PÉRICO, A. E.; SILVA, G. R.
2021	NIKOLAOU, P.; DIMITRIOU, L.
2021	NGUYEN, T. L. H.; PARK, S.-H.; KIM, Y.; YEO, G.-T.

Fonte: Elaboração própria.

Para a temática de sustentabilidade em portos, os termos “*sustainability in ports*”, “*environmental issues in ports*” e “*social issues in ports*” (e seus equivalentes em português)

foram utilizados como parâmetros iniciais de busca. A inserção da função de busca retornou, inicialmente, a seleção de 33 artigos científicos, os quais foram selecionados para a próxima etapa de refino da busca.

Considerando as categorias e subcategorias do *Scopus*, foram selecionadas as que mais são correlacionadas ao tema do capítulo, sendo elas: *Administration, Management and Accounting (General Administration)*; *Economy, Econometrics and Finance (Economics, Econometrics and Finance)*; *Environmental Sciences (Ecological Modeling, Environmental Engineering, Management, Monitoring, Policies and Legislation, Water Science and Technology)*; *Multidisciplinary (Multidisciplinary)*; *Social Sciences (Public Administration, Transport)*, sendo as demais categorias descartadas, restando 22 artigos selecionados.

A partir da leitura do *abstract* dos 22 artigos selecionados, um novo filtro foi realizado visando, principalmente, retirar da amostra as sobreposições. Dos 22 trabalhos, 12 artigos trabalhavam com o mesmo indicador para avaliar a questão ambiental dos portos (emissão de CO²). Nesse sentido, 12 artigos foram suprimidos da amostra remanescente, permanecendo 10 artigos para análise. Destaca-se, ainda, que o filtro do método (restrição à metodologias quantitativas) não foi utilizado nesta busca, uma vez que tal restrição reduziria drasticamente a base de análise. Dessa forma, permaneceram, para as seções finais do Capítulo 3, trabalhos de naturezas bastante diversas (alguns estudos de casos de cunho mais qualitativo; outros, contribuições pontuais sobre variáveis/indicadores específicos (especialmente nas dimensões social e ambiental) de portos isolados; e outros com modelagens quantitativas). O Quadro 12 apresenta a lista de trabalhos analisados nas subseções finais do terceiro capítulo.

Quadro 12. Trabalhos analisados nas seções finais do Capítulo 3

Ano	Referência
2013	SONG, DONG-WOOK
2018	OH, H.; SUNG-WOO L.; YOUNG-JOON SEO
2018	DI VAIO, ASSUNTA; VARRIALE, L.; ALVINO, F.
2019	NUNES, R O.; ALVIM-FERRAZ, M. C. M.; MARTINS, F. G.; SOUSA, S. I. V.
2019	WAN, ZHENG; ZHANG, QIANG; XU, ZHIPENG; CHEN, JIHONG; WANG, QIN
2020	CASTELLANO, R.; FERRETTI, M.; MUSELLA, G.; RISITANO, M.
2020	PUIG, M.; RAPTIS, S.; WOOLDRIDGE, C.; DARABRA, R. M.
2021	RODRIGUES, V.; RUSSO, M.; SORTE, S.; REIS, J.; OLIVEIRA, K.; DIONÍSIO, A. L.; MONTEIRO, A.; LOPES, M
2021	HOSSAIN, T.; ADAMS, M.; WALKER, T. R.
2022	NARASIMHA, P. T.; JENA, P. R.; MAJHI, R.

Fonte: Elaboração própria.

Ressalta-se que todos os trabalhos listados, seja no Quadro 11 ou no Quadro 12, foram investigados e apresentados no Capítulo 3 desta tese.

4.2 Análise Envoltória de Dados (DEA): eficiência dos portos investigados

Para atender ao objetivo proposto por esta tese, é necessário especificar os passos e procedimentos que envolvem a DEA. As subseções, a seguir, detalham cada etapa, apresentando definições e descrição dos procedimentos propostos. Importante destacar que, tanto para os indicadores e análise de eficiência, como para a criação do índice composto (a ser mais bem detalhado em 4.3), as delimitações temporal e amostral são as mesmas. Assim, tais delimitações, apresentadas na próxima subseção, servem para as duas finalidades: análise de eficiência e índice composto.

4.2.1 Delimitação amostral e temporal da pesquisa

Na presente pesquisa, foram investigados 11 portos, sendo 6 portos internacionais e 5 portos públicos brasileiros. A definição dos portos investigados foi integralmente condicionada à disponibilidade de dados das variáveis utilizadas. A ideia inicial era possuir uma amostra de 10 portos internacionais e 10 portos nacionais. No entanto, a restrição nos dados das variáveis condicionou a definição da amostra final. Tal dificuldade será mais bem detalhada no Capítulo de Considerações Finais, no que diz respeito às limitações da pesquisa.

Os portos investigados foram: porto de Hamburgo (Alemanha), porto de Roterdã (Holanda), porto de Shanghai (China), porto de Valência (Espanha), porto de Singapura (Sudeste Asiático), portos de Sines e do Algarve (Portugal), complexo portuário do Rio de Janeiro e Itaguaí (Rio de Janeiro – Brasil), porto de Paranaguá (Paraná – Brasil), porto de Itaqui (Maranhão – Brasil), porto de Santos (São Paulo – Brasil) e porto de Suape (Pernambuco – Brasil).

A seguir, a Figura 12 apresenta a localização geográfica dos portos pesquisados, permitindo melhor visualização da distribuição espacial da amostra analisada. Observa-se que as unidades selecionadas encontram-se inseridas em diferentes contextos operacionais e logísticos, abrangendo portos internacionais e portos públicos brasileiros com distintas características de inserção no comércio marítimo.

Figura 12. Localização geográfica dos 11 portos analisados – 2017 a 2024.



Fonte: Elaboração própria

Na sequência, para garantir uma maior eficácia da metodologia empregada, deve ser mantida uma proporção mínima entre a quantidade total de *inputs* e *outputs* em relação ao número de DMUs (Unidades Tomadoras de Decisão – para esta pesquisa, os portos). Segundo Antunes (2020), quando o número de variáveis utilizadas no modelo (*inputs* e *outputs*) é muito elevado em relação à quantidade de unidades analisadas (DMUs), a capacidade do DEA de diferenciar o desempenho entre essas unidades pode ser reduzida. Em outras palavras, o modelo pode acabar classificando muitas unidades como eficientes, dificultando a identificação de diferenças reais de desempenho entre elas.

Por essa razão, o autor recomenda que a quantidade de unidades analisadas seja, no mínimo, três vezes superior à soma total das variáveis consideradas no modelo. Assim, busca-se garantir um número suficiente de observações para que a comparação entre as unidades seja estatisticamente mais consistente e o poder discriminatório do modelo seja preservado. No presente estudo, considerando as variáveis utilizadas e o total de observações analisadas, esse critério foi atendido.

Deste modo, no presente trabalho, para cada ano investigado, cada porto correspondeu a uma unidade virtual ou DMU.

A presente pesquisa teve horizonte temporal de 8 anos, de 2017 a 2024. A escolha do período teve como justificativa dois parâmetros determinantes e igualmente importantes: (i) delimitação temporal baseada em períodos mais recentes; e (ii) delimitação temporal baseada

em períodos com dados disponíveis e padronizados para todos os portos e todas as variáveis investigadas. Ao considerar os dois parâmetros, foi delimitado de 2017 a 2024 como o período de investigação.

4.2.2 Identificação e escolha das variáveis

A partir de investigação da literatura sobre análise de eficiência em portos e indicadores de sustentabilidade em portos, seja a partir da abordagem DEA ou não, foi possível pré-selecionar variáveis de *inputs* e *output* para compor o modelo teórico inicial.

Tendo em consideração o tamanho da amostra proposta (88 unidades) e o critério, anteriormente elencado, em relação às quantidades de variáveis e de unidades analisadas, é seguro afirmar que a soma do total de variáveis de *inputs* e *outputs* não poderá exceder 29 variáveis, considerando o modelo de eficiência proposto, conforme poderá ser observado mais adiante.

A literatura especializada em DEA, faz menção a diversos métodos disponíveis para validação desses modelos de eficiência, sendo alguns mais contemporâneos e robustos, e outros, menos sofisticados e já superados.

Dentre esses, os mais robustos, é possível citar: Teste de Hipóteses baseado em DEA, Medição para Contribuição da Eficiência (ECM) e Análise de Componentes Principais aplicada à DEA (PCA-DEA).

O Teste de Hipóteses baseado em DEA, de acordo com Banker (1996), avalia o nível de significância de uma variável, de *input* ou *output*, em um processo determinado de produção, a partir de estatísticas que testam as diferentes hipóteses. Outro método é o ECM que, segundo Pastor et al. (2002), analisa o papel marginal de cada variável em relação aos indicadores de eficiência obtidos, identificando a contribuição de cada variável de *input* nas variáveis de *outputs*.

Adler e Golany (2001) propuseram a utilização da Análise de Componentes Principais (PCA) associada à Análise Envoltória de Dados (DEA) como forma de reduzir a dimensionalidade dos dados e melhorar o poder discriminatório do modelo. Posteriormente, Adler e Yazhemsky (2010) demonstraram, por meio de simulações, que a abordagem PCA-DEA apresenta maior capacidade de discriminação e maior acurácia na classificação de unidades eficientes e ineficientes, especialmente em contextos com elevado número de variáveis em relação ao número de unidades analisadas.

Pontos relevantes na PCA-DEA são no sentido de definir pela permanência ou não de variáveis nos modelos inicialmente propostos, sendo eles: as comunalidades, a matriz de correlação anti-imagem, os testes de Kaiser, Meyer, Olkin (KMO) e Bartlett e os autovalores.

As comunalidades indicam a proporção da variância explicada pelas componentes principais. Existem tantas comunalidades quantas são as variáveis do modelo e os valores podem variar entre 0 e 1. Sendo 0 quando os fatores comuns não explicam nenhuma variância da variável e 1 quando a explicam a sua totalidade. Valores abaixo de 0,5 sugerem a exclusão da variável.

Por sua vez, a matriz de correlação anti-imagem indica a adequação de cada variável para ser usada no método PCA-DEA. Em casos de se detectarem valores pequenos na diagonal (ou seja, $r < 0,5$), deve considerar-se a eliminação da variável.

O teste KMO é uma medida da adequação dos dados das variáveis para entrarem no modelo, testando se o método é adequado aos dados disponíveis. Trata-se de um teste que varia de 0 a 1. Os valores abaixo de 0,5 invalidam a proposta, ou não classificam os dados como adequados para o método proposto; valores entre 0,5 e 0,8 indicam adequação média; valores entre 0,8 e 0,9 indicam boa adequação; e, por fim, valores entre 0,9 e 1 indicam adequação excelente.

O teste de Bartlett é baseado na distribuição estatística de qui-quadrado e testa a hipótese nula de que a matriz de correlação é uma matriz identidade, isto é, não há correlação entre as variáveis. Valores de significância maiores do que 0,1 indicam que os dados não são adequados para o tratamento com o método PCA-DEA. Já os valores menores, permitem rejeitar a hipótese nula. Como dado adicional, os autovalores apontam o percentual acumulado da variância que os fatores são capazes de explicar.

Uma vez apresentados os testes científicos de validação de variáveis disponíveis na literatura, e apontado o que se pretende utilizar nesta pesquisa, faz-se relevante apresentar a proposta preliminar de variáveis (*inputs* e *outputs*) no modelo de eficiência proposto.

Como visto, especialmente no Capítulo 3 desta tese, diversos trabalhos tratam da análise de eficiência em portos e cada um utiliza abordagens e variáveis diferentes. Há trabalhos de natureza mais operacional, assim como há trabalhos que buscaram, ainda que de forma pouco aprofundada, incorporar variáveis sociais e ambientais aos modelos de desempenho de portos. E, ainda, há trabalhos que apenas sugerem o uso de variáveis para quantificar questões de natureza ambiental ou social, sem efetivamente quantificá-las.

Deste modo, buscando analisar a eficiência dos 11 portos investigados, com base, principalmente, na literatura especializada em desempenho portuário e em estudos mais

genéricos, foi definido um conjunto de variáveis que reúne os principais aspectos técnicos a serem analisados, contemplando uma abordagem de eficiência sustentável dos portos.

O modelo proposto é composto por *inputs* e *outputs* das três dimensões da sustentabilidade (social, ambiental e econômica). Foram, inicialmente, selecionados como *inputs*: (i) sociais: número de funcionários e número de funcionárias; (ii) ambientais: resíduos gerados (toneladas), consumo de energia (kwh) e consumo de água (m³); econômico: carga movimentada (toneladas). Como *outputs*: (i) social: taxa de frequência (%), utilizada como indicador relacionado à segurança do trabalho, representando a frequência relativa de acidentes ou ocorrências ocupacionais registradas no ambiente portuário; (ii) ambiental: emissão de gases de efeito estufa – GEE (toneladas); econômico: receita operacional bruta (R\$).

O modelo preliminar conta com 6 variáveis de *inputs* e 3 variáveis de *outputs*, perfazendo 9 variáveis no total. Considerando que são 88 unidades virtuais analisadas, é possível concluir que há coerência científica entre a quantidade de unidades analisadas e a quantidade de variáveis de *inputs* e *outputs*.

4.2.2.1 Notas sobre as variáveis

Considerando que esta pesquisa enfatiza a importância de uma abordagem integrada que equilibre o desenvolvimento econômico com a responsabilidade social e ambiental para o futuro dos portos, as variáveis, inicialmente propostas, no presente estudo, são apresentadas, a seguir:

- Emprego (Funcionários e Funcionárias): Quantidade de trabalhadores vinculados às atividades portuárias. A geração de empregos constitui aspecto relevante da dimensão social da sustentabilidade, especialmente em atividades intensivas em mão de obra, como parte das operações portuárias. Nesse contexto, optou-se pela utilização desagregada das variáveis relacionadas ao número de funcionários e funcionárias, buscando incorporar elementos associados à estrutura da força de trabalho dos portos investigados. Além disso, considerando a histórica predominância masculina em diversas atividades do setor portuário, a utilização desagregada dessas variáveis permite incorporar, ainda que de forma limitada, aspectos relacionados à diversidade de gênero na composição da força de trabalho. Embora tais variáveis não esgotem a complexidade inerente à dimensão social da sustentabilidade, entende-se que sua inclusão contribui para representar aspectos relacionados à composição ocupacional dos portos, preservando possíveis diferenças na estrutura de emprego entre as unidades analisadas. Ademais, reconhece-se a limitação decorrente da reduzida disponibilidade de

indicadores sociais mais abrangentes e comparáveis no setor portuário internacional. Essas variáveis são do tipo “quanto maiores, melhor”.

- Resíduos gerados: Resíduos gerados a partir das atividades realizadas pelo porto. Os portos emitem resíduos em suas atividades e que esses resíduos resultam em importantes impactos ambientais, não apenas no entorno dos portos. A redução/extinção de resíduos é crucial para mitigar poluição marinha, protegendo ecossistemas costeiros, biodiversidade e qualidade da água contra resíduos sólidos perigosos e biológicos gerados por navios, operações de carga e manutenção. Essa variável é do tipo “quanto menor, melhor”;
- Consumo de energia e água: Consumo de energia e água decorrente das atividades realizadas pelo porto. O consumo de energia elétrica e de água constituem indicadores fundamentais da intensidade operacional e da eficiência no uso de recursos naturais nos sistemas portuário. O monitoramento conjunto do consumo de energia e água permite capturar não apenas a eficiência técnica, mas também a ecoeficiência operacional dos portos. Essas variáveis são do tipo “quanto menores, melhor”;
- Movimentação de carga: Trata-se da representação da atividade central dos portos. Esta variável é central nos estudos de eficiência operacional e é medida de diversas formas, como volume de contêineres (TEUs), volumes sólidos e transferências de carga em toneladas. Essa variável é do tipo “quanto maior, melhor”;
- Taxa de frequência: Mede a quantidade de acidentes ocorridos no porto (número de acidentes por milhão de horas trabalhadas). A taxa de frequência de acidentes incorpora aspectos de segurança do trabalho, permitindo avaliar riscos operacionais e práticas de prevenção. Essa variável é do tipo “quanto menor, melhor”;
- Emissão de GEE: É a liberação de gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 e N_2O) na atmosfera por atividades portuárias de diversas naturezas, intensificando o efeito estufa e causando aquecimento global. É um indicador crucial para a sustentabilidade, sendo frequentemente tratado como um *output* indesejável nos modelos de eficiência ambiental. Essa variável é do tipo “quanto menor, melhor”;
- Receita operacional bruta: Receita obtida pelos portos decorrentes da movimentação de carga. Indicador mais adequado para avaliar a eficiência da operação dos portos, uma vez que exclui juros e impostos e demais despesas. Essa variável é do tipo “quanto maior, melhor”.

Para as variáveis do tipo “quanto menores, melhor” um ajuste foi realizado. Para evitar o problema de maximizar as variáveis indesejáveis, Seiford e Zhu (2002) indicam uma metodologia de transformação monotônica decrescente, ou multiplicativa inversa. Nessa técnica, os valores das variáveis indesejadas são transformados no inverso do seu valor, ou $f_k^u(U) = 1/u_i^k$.

No Quadro 13 são apresentados os autores e as variáveis estudadas por eles e discutidas na revisão de literatura do presente estudo, embasando, de certa forma, o modelo de eficiência sustentável, proposto por esta tese.

Quadro 13. Variáveis trabalhadas na revisão bibliográfica e seus autores

Variável	Autores	Dimensão
Emprego/funcionários	LAXE, F. G.; BERMÚDEZ, F. M.; PALMERO, F. M.; NOVO-CORTI, I OH, H.; LEE, S.; SEO, Y.; ROH, S. Y. (2018)	Social / Econômica
Taxa de frequência	NEIS B, MACPHERSON RA, SHAN D, ET AL. (2025)	Social / Econômica
Resíduos gerados	DI VAIO et al. (2018); PUIG et al. (2020)	Ambiental
Consumo de energia	RODRIGUES et al. (2021); DI VAIO et al. (2018)	Ambiental
Consumo de água	RODRIGUES et al. (2021)	Ambiental
Emissão GEE	NGUYEN et al. (2021); SONG (2013); CASTELLANO et al. (2020); HOSSAIN et al. (2021)	Ambiental
Movimentação de carga	WANKE (2013); BARROS (2003); TRUJILLO e TOVAR (2007); NGUYEN et al. (2021)	Econômica
Receita operacional	SONG (2013)	Econômica

Fonte: Elaboração própria.

Considerando, então, as variáveis propostas no modelo inicial, e corroboradas pela literatura consultada, chega-se na etapa de coleta de dados, a partir dos recortes temporal e amostral da pesquisa. Nesse sentido, e se utilizando, também, de ferramentas de Inteligência Artificial (principalmente, *Google NotebookLM* e *Perplexity AI*), os dados foram obtidos das seguintes fontes:

No Quadro 14 são listados todos os relatórios dos portos internacionais consultados, com seus respectivos anos e endereços eletrônicos.

Quadro 14. Relatórios dos portos internacionais consultados

Porto	Ano	Tipo de Relatório	URL (página oficial de relatórios)
Shanghai	2017	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Shanghai	2018	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Shanghai	2019	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Shanghai	2020	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Shanghai	2021	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Shanghai	2022	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Shanghai	2023	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Shanghai	2024	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portshanghai.com.cn
Singapore (MPA)	2017	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Singapore (MPA)	2018	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Singapore (MPA)	2019	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Singapore (MPA)	2020	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Singapore (MPA)	2021	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Singapore (MPA)	2022	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Singapore (MPA)	2023	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Singapore (MPA)	2024	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.mpa.gov.sg
Hamburgo	2017	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Hamburgo	2018	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Hamburgo	2019	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Hamburgo	2020	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Hamburgo	2021	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Hamburgo	2022	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Hamburgo	2023	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Hamburgo	2024	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.hamburg-port-authority.de
Roterdã	2017	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Roterdã	2018	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Roterdã	2019	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Roterdã	2020	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Roterdã	2021	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Roterdã	2022	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Roterdã	2023	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Roterdã	2024	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.portofrotterdam.com
Sines e do Algarve	2017	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Sines e do Algarve	2018	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Sines e do Algarve	2019	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Sines e do Algarve	2020	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Sines e do Algarve	2021	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Sines e do Algarve	2022	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Sines e do Algarve	2023	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Sines e do Algarve	2024	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.apsinesalgarve.pt
Valência	2017	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com
Valência	2018	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com
Valência	2019	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com
Valência	2020	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com
Valência	2021	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com
Valência	2022	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com
Valência	2023	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com
Valência	2024	Sustainability / Annual / ESG Report	https://www.valenciaport.com

Fonte: Elaboração própria.

No Quadro 15 são listados todos os relatórios de portos públicos brasileiros consultados, com seus respectivos anos e endereços eletrônicos.

Quadro 15. Relatórios dos portos públicos nacionais consultados

Porto	Ano	Tipo de Relatório	URL (página oficial de relatórios)
Santos	2017	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Santos	2018	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Santos	2019	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Santos	2020	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Santos	2021	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Santos	2022	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Santos	2023	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Santos	2024	Sust. Anual - ESG	https://www.portodesantos.com.br/transparencia/relatorios/
Paranaguá	2017	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Paranaguá	2018	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Paranaguá	2019	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Paranaguá	2020	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Paranaguá	2021	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Paranaguá	2022	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Paranaguá	2023	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Paranaguá	2024	Sust. Anual - ESG	https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Relatorios
Suape	2017	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Suape	2018	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Suape	2019	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Suape	2020	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Suape	2021	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Suape	2022	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Suape	2023	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Suape	2024	Sust. Anual - ESG	https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2017	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2018	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2019	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2020	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2021	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2022	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2023	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Rio de Jan/Itaguaí	2024	Sust. Anual - ESG	https://www.portosrio.gov.br/pt-br/acao-a-informacao/relatorios
Itaqui	2017	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios
Itaqui	2018	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios
Itaqui	2019	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios
Itaqui	2020	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios
Itaqui	2021	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios
Itaqui	2022	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios
Itaqui	2023	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios
Itaqui	2024	Sust. Anual - ESG	https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/transparencia/relatorios

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Construção do modelo DEA

Um dos principais pontos a serem definidos em um modelo DEA é quanto à sua direção, ou seja, em que sentido busca-se maximizar e/ou minimizar as variáveis.

Na DEA, podem-se distinguir dois tipos de direcionamento: o modelo orientado a insumos, no qual se busca minimizar os inputs mantendo os outputs em níveis constantes, e o modelo orientado a produtos, em que se busca maximizar os outputs dado um nível fixo de insumos (COOPER; SEIFORD; TONE, 2007; CAVALCANTE, 2011).

Essa distinção permite que a análise seja ajustada conforme o foco gerencial, seja pela redução de recursos aplicados ou pela ampliação do nível de serviços/produtos ofertados pelas unidades portuárias. Portanto, como escolha conceitual, o presente estudo visa entender o quanto os *inputs* colaboram para maiores produtividades dos *outputs*, ainda que seja necessário ajustar as variáveis que são do tipo “quanto menor, melhor” para se tornarem do tipo “quanto maior, melhor”, conforme apresentado na subseção 4.2.2.1.

Quanto ao modelo utilizado, é possível utilizar duas opções: o de retorno constantes de escala (CCR-CRS) e o de retorno variável de escala (BCC-VRS). O modelo CCR é geralmente utilizado quando os *inputs* e *outputs* são proporcionais entre si, e desconsidera ganhos de escala. Já o modelo BCC incorpora o conceito de economias de escala em seu método, onde a eficiência de uma DMU é obtida ao se dividir sua produtividade pela maior produtividade dentre DMUs de mesma escala. Tal modelo é aplicado quando não há proporcionalidade entre as variáveis.

Conceitualmente, o modelo BCC apresenta melhor resposta ao intuito desta pesquisa, porém, Banker (1996) sugere a realização do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) para a seleção entre um dos dois modelos, uma vez que escolha da tecnologia é uma questão crucial e, se feita de forma arbitrária, pode produzir resultados viesados. A estatística deste teste é dada por (Equação 1):

$$TSM = \max \{F(\theta_{DEA \text{ CCR}}) - F(\theta_{DEA \text{ BCC}})\} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que $F(\theta_{DEA \text{ CCR}})$ e $F(\theta_{DEA \text{ BCC}})$ são as distribuições de ineficiência acumuladas dos modelos DEA-CCR e DEA-BCC. No procedimento do teste, a estatística TSM é comparada ao valor crítico de D obtido. Se, $TSM < D$ crítico, aceita-se H_0 ; se, $TSM > D$ crítico, rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 . A H_0 determina a aceitação do modelo de retornos constantes de escala (CCR) e H_1 indica a aceitação do modelo de retornos variáveis de escala (BCC).

Após especificação da orientação e retorno de escala, o cálculo dos indicadores de eficiência foi realizado, a partir do software livre R, sendo os resultados apresentados e discutidos no Capítulo 5.

4.3 Análise Envoltória de Dados (DEA): índice composto (IC) dos portos investigados

Conforme mencionado no início na seção 4.2, os recortes temporal e amostral se mantêm os mesmos na etapa de construção dos índices compostos. Uma vez que os dados já estão coletados e as dimensões do IC definidas, sendo as três dimensões da sustentabilidade (social, ambiental e econômica), o próximo passo consistiu na normalização dos dados das variáveis, sendo a técnica do dimensionamento linear (*min-max scaling*) adotada.

A DEA, em princípio, não exige a normalização dos dados, se desenvolvendo bem mesmo com variáveis em unidades de medidas e escalas distintas. Neste caso específico, optou-se pela normalização de forma a facilitar o processo de análise de resultados, deixando as variáveis mais próximas em relação a dimensões e magnitudes. Assim, os ICs foram calculados a partir de base de dados normalizada, no entanto, no que foi viável, os resultados também foram analisados considerando a base de dados bruta.

O próximo passo consistiu na construção das janelas de análise. A DEA, conforme já mencionado, foi aplicada de forma que cada porto, em cada ano, fosse considerado como sendo uma unidade distinta de análise. Considerando uma ótica dinâmica, que levou em conta uma movimentação temporal durante a análise, se mostra interessante o uso de janelas de tempo para a análise. Para cada janela subsequente, são incluídos dados do ano mais recente ao passo que são retirados os dados do ano mais defasado.

Cooper et al. (2000) propõem um modelo para o cálculo do número de janelas e sua amplitude, conforme as Equações 2 e 3:

$$W = k - p + 1 \quad (\text{Equação 2})$$

$$p = \frac{(k + 1)}{2} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

W é o número de janelas;

k é o número de anos;

p é a amplitude.

Por fim, na última etapa, foram calculados os ICs, a partir do *software* R, em três modelos: metafronteira, análise de janelas e indicador médio das janelas. Deve ser destacado que as 9 variáveis do modelo, no cálculo do IC, foram consideradas de *outputs* e adicionada uma variável de *input*, assumindo o valor 1, conforme preconizado por Cherchye et al. (2007), em sua obra seminal “*An introduction to 'benefit of the doubt' composite indicators*”. Todas as demais prerrogativas do modelo (orientação e retornos de escala) se mantiveram em relação à seção anterior.

O modelo de metafronteira envolve a aplicação do modelo ao conjunto completo de dados, em todos os portos e em todos os anos para, posteriormente, encontrar o resultado médio para cada porto. A análise de janelas corresponde a aplicação do modelo para cada janela. Por último, o indicador médio das janelas compreende a obtenção o valor médio para cada porto nas janelas, de acordo com a Equação 4.

$$ICM_j = \frac{(\sum_{i=1}^n IC_1, IC_2, \dots IC_n)}{n}$$

(Equação 4)

Onde:

ICM_j é o IC Médio das janelas;

IC_n é cada um dos ICs calculados em cada janela;

n é o número de janelas calculadas.

Após o cálculo dos indicadores citados (janelas, médio e meta-fronteira), os resultados são apresentados e discutidos. Onde os portos com maior e menor colocação no *ranking* criado são avaliados individualmente.

4.4 Técnica de análise

Embora fortemente difundida e conhecida na literatura, dispensando maiores detalhamento, a Análise Envoltória de Dados é a técnica utilizada nesta tese, seja para o cálculo da eficiência, seja para o cálculo do índice composto dos portos investigados. Nesse sentido, nesta seção serão apresentados, brevemente, os principais fundamentos da técnica.

4.4.1 Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados, mais conhecida no Brasil por sua sigla em inglês DEA (*Data Envelopment Analysis*), é um instrumental não-paramétrico que aplica a programação

linear para calcular e comparar as eficiências de diferentes sistemas produtivos a partir da construção de uma fronteira de eficiência (BARBOSA; FUCHIGAMI, 2018).

Farrell (1957) conceituou a noção de DEA, que posteriormente foi desenvolvida por Charnes et al. (1978).

Olaya et al. (2023) argumentam que criação de um modelo baseado em DEA envolve a seleção de entradas e saídas para refletir um processo de produção. É uma técnica para calcular a eficiência relativa de um grupo homogêneo de Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs – *Decision Making Units*). Como a DEA permite o cálculo de uma medida agregada de eficiência para cada DMU, com base em comparações com outras DMUs da amostra, é particularmente útil para atividades de *benchmarking*. Desta forma, o desempenho das DMUs pode ser quantificado com base nos valores de inúmeros *inputs* consumidos ou *outputs* obtidos de forma efetiva em um determinado período.

Para Meza et al. (2005), a eficiência é determinada comparando o que se produziu com os recursos disponíveis com o que poderia ter sido produzido com os mesmos recursos. Na prática, a eficiência significa conseguir atingir um resultado com o mínimo de recursos possível, ou seja, evitando o desperdício de recursos e tempo para atingir um objetivo específico.

Segundo Barbosa e Fuchigami (2018), para encontrar o peso que cada variável exerce sobre o resultado, utiliza-se de uma técnica de programação linear, estimando os pesos que otimizam as eficiências de cada *DMU*. Foursund e Sarafoglou (2002) argumentam que a determinação de pesos que maximizassem a relação *output/input*, mantendo as restrições do sistema em mente, constituiu uma inovação, além de combinar o conceito de produtividade da engenharia com o conceito econômico de eficiência.

Para Cook e Zhu (2005), as denominadas DMUs convertem múltiplos *inputs* em múltiplos *outputs*.

Uma das caracterizas relevantes da DEA, e da programação matemática, é prover aos gestores de organizações (como bancos, hospitais, empresas/indústrias etc.) informações estratégicas para tomada de decisão. Isso é possível pois sua aplicação é usada para observar dados de *inputs* e *outputs* e não somente para verificar o desempenho da eficiência (FUKUYAMA, 2014).

Segundo Mello et al. (2003), o propósito da DEA consiste em comparar uma quantidade de DMUs que realiza tarefas semelhantes e se distingue nas quantidades de *inputs* que consome e de *outputs* que produz.

De acordo com Gomes et al. (2001), a DEA apresenta algumas características básicas, tais como:

- Encontrar as DMUs eficientes, identificar e mensurar a ineficiência;
- Fornecer uma referência para as DMUs ineficientes através do cálculo de uma função de produção linear por partes (*piecewise linear frontier*). Assim, ao constatar a quantidade e a procedência da ineficiência relativa de cada uma das DMUs, é possível avaliar quaisquer de suas dimensões pertinentes aos *inputs* e/ou *outputs*. A fronteira de eficiência corresponde ao agrupamento de DMUs Pareto eficientes;
- Ponderar a probabilidade dos *outliers* serem possíveis *benchmarks* e representarem as melhores práticas dentro do universo investigado não significando apenas desvios em relação ao comportamento “médio”;
- Diferentemente dos modelos de fronteiras estocástica, não há necessidade de determinar uma forma funcional para a estimativa da fronteira.
- Dar suporte às estratégias de produção que otimizem a eficiência das DMUs avaliadas, recuperando as que apresentam ineficiência por meio da colocação de objetivos.

A concepção de eficiência, tanto na Engenharia como na Economia, está relacionada à aptidão de produzir saídas com quantidades dadas de entradas (SERRANO-CINCA et al. 2005).

Sobre a eficiência e a relação com as DMUs, pode-se afirmar:

A eficiência relativa de cada DMU é definida como a razão da soma ponderada de seus produtos (*outputs*) pela soma ponderada dos insumos necessários para gerá-los (*inputs*). Em DEA, estas variáveis são ponderadas por pesos, calculados livremente ou de forma restrita através de programação linear, objetivando maximizar a eficiência de cada DMU em relação ao conjunto de referência (MELO et al. 2007, p.192).

De acordo com Roiz (2022), para encontrar a eficiência (E) de uma DMU com vários *inputs* e *outputs*, deve-se calcular a razão entre a soma ponderada dos produtos e a soma ponderada dos insumos de forma que (Equação 5):

$$E = \frac{u_1 y_1 + u_2 y_2 + \dots + u_s y_s}{v_1 x_1 + v_2 x_2 + \dots + v_m x_m}$$

(Equação 5)

Onde:

E : eficiência de uma DMU;

u_1 : Peso dado ao *Output* 2;

v_1 : Peso dado ao *Output* 1;
 x_{1j} : Total do *Input* 1 da unidade j ;
 y_{1j} : Total do *Input* 2 da unidade j .

Com isso, é plausível a existência de duas maneiras básicas de uma unidade considerada não eficiente se tornar eficiente. A primeira é diminuir os recursos utilizados, mantendo inalterados os produtos (orientação a *inputs*) e a segunda é fazendo o inverso (orientação a *outputs*) (ROIZ, 2022).

Existem dois modelos básicos para se encontrar a eficiência técnica de uma DMU em DEA: modelos CCR (Retornos Constantes de Escala) e BCC (Retornos Variáveis de Escala) (CHARNES et al., 1978 e MEZA 2005).

Originalmente, a DEA, criada por Charnes et al. (1978), não levava em consideração a dimensão da DMU para escolhê-la como referência para as demais. O método utilizado considerava retornos constantes de escala, ou seja, os *inputs* e *outputs* variavam de forma equivalente e proporcional. A sigla CCR, encontrada na literatura para denominar essa metodologia, foi uma homenagem aos seus criadores (Charnes, Cooper e Rhodes) (FOURSUND; SARAFOGLOU, 2002).

A eficiência é definida, neste modelo, como a razão entre a soma ponderada dos produtos e a soma ponderada dos insumos. A fim de aumentar a eficiência de cada DMU, o modelo permite que tanto as entradas quanto as saídas recebam um conjunto de pesos. Nesse cenário, a função de produção (ou fronteira) é uma reta que passa pela origem de um sistema cartesiano, em que o eixo horizontal retrata os insumos e o eixo vertical simboliza os produtos. Se o desempenho da DMU estiver sobre a fronteira da eficiência, a unidade investigada é tecnicamente eficiente; se estiver abaixo da fronteira, a unidade é tecnicamente ineficiente. O único requisito é que todas as DMUs tenham uma eficiência menor ou igual a 1 (AZAMBUJA, 2002).

De acordo com Périco et al. (2008), o modelo CCR possui duas concepções matemáticas: o modelo CCR orientado a *input* e o modelo CCR orientado a *output* (Figura 13). O objetivo básico do modelo CCR orientado a *inputs* é maximizar a eficiência por meio de mudanças (reduções) nos níveis de *inputs* (insumos), mantendo o nível de produto (*output*) fixo e levando em consideração o retorno constante de escala. O primeiro requisito restritivo é o resultado corporativo, uma vez que deriva da subtração dos produtos (soma das quantidades geradas multiplicado pelos pesos dos produtos) dos insumos (soma dos insumos consumidos

multiplicado pelos seus pesos correspondentes). É limitado a 0. Como consequência, unidades eficientes receberão uma pontuação de 0.

O segundo requisito restritivo é que a soma do produto das quantidades consumidas de recursos pelos pesos específicos para a DMU da empresa K deve ser igual a 1. Se a firma K é eficiente, h_j é igual a 1. Se não for, sempre receberá um indicador menor que 1. O propósito do modelo CCR com orientação de saída (*output*) é maximizar o nível de produção usando não mais que o consumo de insumos (*inputs*) observados. As restrições são idênticas às do modelo CCR orientado ao *input* (PÉRICO et al. 2008).

Versões desse modelo incluem duas concepções matemáticas, o modelo CCR com orientação para o *input* e o modelo CCR com orientação para o *output* (Figura 13).

Figura 13. Modelo CCR

Modelo CCR: Orientação <i>input</i>	Modelo CCR Orientação <i>output</i>
Maximizar $h_k = \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$	Maximizar $h_k = \sum_{i=1}^n v_i x_{ik}$
Sujeito a:	Sujeito a:
$\sum_{r=1}^m u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} \leq 0$	$\sum_{r=1}^m u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} \leq 0$
$\sum_{i=1}^n v_i x_{ik} = 1$	$\sum_{r=1}^m u_r y_{rk} = 1$
$u_r, v_i \geq 0$	$u_r, v_i \geq 0$
Considerando: $y = \text{outputs}; x = \text{inputs};$ $u, v = \text{pesos};$ $r = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n; e$ $j = 1, \dots, N$	Considerando: $y = \text{outputs}; x = \text{inputs};$ $u, v = \text{pesos};$ $r = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n; e$ $j = 1, \dots, N$

Fonte: PÉRICO et al. (2008).

Em atenção ao modelo de retorno variável de escala (BCC/VRS), ele foi idealizado por Banker, Charnes e Cooper (1984), e procura evitar problemas existentes em situações de competição imperfeita. Este modelo diferencia entre ineficiência técnica e de escala, avaliando a eficiência técnica pura em uma escala particular de operações e detectando se existem benefícios de escala crescente, decrescente ou estável para exploração futura.

O indicador de eficiência técnica produzido pelo modelo BCC permite identificar a ineficiência técnica, separando o componente relacionado com a ineficiência de escala da

ineficiência produtiva. O modelo permite o uso de unidades de referência de vários tamanhos, eliminando os desafios associados à abordagem da escala de fabricação (BELLONI, 2000).

A apresentação da concepção matemática dos dois modelos BCC é apresentada na Figura 14.

Figura 13. Modelo BCC

Modelo BCC: Orientação <i>input</i>	Modelo BCC Orientação <i>output</i>
Maximizar $\sum_{r=1}^m u_r y_{rk} - u_k$	Maximizar $= \sum_{i=1}^n v_i x_{ki} + v_k$
Sujeito a:	Sujeito a:
$\sum_{i=1}^n v_i x_{ik} = 1$	$\sum_{r=1}^m u_r y_{rk} = 1$
$\sum_{r=1}^m u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} - u_k \leq 0$	$\sum_{r=1}^m u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} - v_k \leq 0$
$u_r, v_i \geq 0$	$u_r, v_i \geq 0$
Considerando: $y = \text{outputs}; x = \text{inputs};$ $u, v = \text{pesos};$ $r = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n; e$ $j = 1, \dots, N$	Considerando: $y = \text{outputs}; x = \text{inputs};$ $u, v = \text{pesos};$ $r = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n; e$ $j = 1, \dots, N$

Fonte: PÉRICO et al. (2008).

De acordo com Casa Nova (2002), a variável u_k pode assumir valores negativos e não deve atender à restrição de positividade. Ela é introduzida para representar os retornos variáveis de escala.

4.4.1.1 Modelo DEA – BoD (*Benefit of the Doubt*): Indicador composto

Anteriormente foram apresentados os modelos convencionais de DEA, tais como os modelos CCR e BCC.

Embora a DEA tenha sido desenhada para avaliar a eficiência, ela também pode ser aplicada para a construção de indicadores compostos (IC). Um indicador composto IC tenta combinar vários indicadores-chave de desempenho (do inglês *Key-Performance Indicators*, KPIs) em uma única métrica global. Como resultado, o IC pode refletir várias noções que não podem ser medidas em um único KPI (OLAYA et al. 2023).

A ideia da formulação de ICs baseados em DEA foi introduzida por Cook et al. (1991). Posteriormente, o trabalho de Cherchye et al. (2007) difundiu seu uso no meio científico.

Segundo Olaya (2023), esses autores sugeriram um modelo denominado de “*Benefit-of-the-doubt (BoD) composite indicator*” (IC de “benefício da dúvida”) que era relativamente simples de usar do ponto de vista matemático. *BoD* significa que os pesos de cada KPI são definidos na otimização de maneira endógena, considerando cada DMU em avaliação. Dessa forma, as DMUs são avaliadas de forma individual utilizando os pesos que mais contribuem na avaliação, evitando a utilização de um único esquema de pesos que poderiam desfavorecer alguma outra DMU.

A importância de utilizar o DEA para construir indicadores compostos decorre do fato da não obrigatoriedade de atribuir um peso específico a cada indicador de entrada (*input*) e saída (*output*) (CHERCHYE, et al. 2007).

Rogge (2012) argumenta que, desta forma, os pesos são determinados "automaticamente" por meio de um procedimento de maximização que visa determinar os pesos ideais para cada DMU, a fim de otimizar a pontuação de desempenho relativo das DMU's.

O ponto de partida conceitual da abordagem *BoD* é que, na ausência de conhecimento detalhado sobre os pesos corretos para os critérios de desempenho subjacentes, as informações sobre o peso podem ser recuperadas dos próprios dados de desempenho observados (ou seja, a posteriori, permitindo que os dados de desempenho observados falem sozinhos). Assim, a ideia básica do modelo *BoD* é colocar cada unidade avaliada em uma perspectiva relativa, comparando-as entre si e procurando pontos de força e fraqueza relativa como critérios de desempenho. O modelo *BoD* seleciona, para cada unidade avaliada, os pesos mais favoráveis em uma perspectiva relativa aos desempenhos das demais unidades. Como resultado, cada unidade obtém o valor IC mais alto possível (ROGGE, 2012).

Este modelo tem como arrimo o pressuposto de que os dados da própria amostra podem fornecer informação sobre a situação dos pesos adequados (CHERCHYE et al., 2007).

Conforme dito anteriormente, o objetivo da obtenção do IC é transformar os valores dos indicadores de cada dimensão em um único valor que reflita sua média ponderada (ROIZ, 2022).

A seguir (Equação 6), apresenta-se a formalização para o problema matemático do peso que maximiza a pontuação do IC para m indicadores e n unidades através da aplicação do modelo DEA-*BOD*, descrito em Cherchye et al. (2007).

$$IC_j = \max_{w_{ij}} \sum_{i=1}^m y_{ij} w_{ij}$$

(Equação 6)

Considerando que:

$$j = 1, \dots, n;$$

$$i = 1, \dots, m.$$

Sendo:

IC_j : Indicador composto da unidade j ;

y_{ij} : Indicador i para a unidade j , sendo que quanto maiores os valores de y_{ij} , melhor;

w_{ij} : peso do i -ésimo indicador para a unidade j que maximiza o IC da unidade.

De acordo com a Equação 6, o eventual indicador composto pode assim ser reinterpretado como sendo a soma de $i = 1$ e m ações de subindicadores, uma para cada dimensão de realização. A interpretação conceitual de cada uma dessas m variáveis é muito direta: cada número puro $y_{ij}w_{ij}$ indica em quanto a dimensão i contribui para a pontuação composta geral da unidade j . Objetivamente, esses m termos também podem ser interpretados como as ‘partes da torta’ (*‘pie shares’* – se constitui na abstração de visualizar o IC como se fosse uma fatia de torta) que juntas constituem IC_j : o i -ésimo termo representa o volume da fatia de torta do i -ésimo subindicador. O volume total da torta captura, portanto, a pontuação do indicador composto de uma unidade, e o tamanho relativo das parcelas reflete a importância/significância relativa dos subindicadores (CHERCHYE et al., 2007).

A Equação 6 está sujeita às seguintes restrições (Equações 7 e 8):

$$\sum_{i=1}^m y_{ij}w_{ij} \leq 1$$

(Equação 7)

$$w_{ij} \geq 0$$

(Equação 8)

De acordo com Roiz (2022), a Equação 7 é referida como a restrição de fronteira, pois a maior eficiência relativa de cada unidade deve ser igual ou menor a 1, ao passo que a Equação 8 garante que os pesos sejam valores não negativos (requisito de não negatividade). A Equação 8 indica a existência de dois problemas potenciais. O primeiro é a probabilidade que haja uma unidade que tenha um valor substancialmente maior para um dos indicadores do que as outras unidades, resultando em um *score* igual a 1 para esta unidade, mesmo com valores inferiores

às demais unidades nos outros indicadores. Outra questão é a possibilidade de existirem unidades na fronteira da eficiência (*score* igual a 1), dificultando a análise correta dos dados.

Como resultado, outra restrição relacionada aos pesos precisa ser implementada. Denominada por Cherchye et al. (2007) de *pie share constraint* (restrição da fatia de torta), indica o quanto cada indicador contribui para a composição do IC, sendo cada um considerado uma fatia, e consequentemente, a soma das fatias deve ser igual ao todo, no caso, o Indicador Composto. A Equação 9 representa tal restrição (ROIZ, 2022).

$$L_i \leq \frac{y_{ij}w_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}w_{ij}} \leq U_i$$

(Equação 9)

Objetivamente, na Equação 9 tem-se que a “fatia de torta” do porto j é dada como o produto $y_{ij} w_{ij}$. Desta forma, a soma das “fatias de torta” é igual ao IC_j considerando limites inferiores L_i e superiores U_i .

Assim, ao contrário da maioria das abordagens utilizadas na construção de Indicadores Compostos, que utilizam métodos subjetivos de ponderação dos pesos dos subindicadores, como visto na revisão da literatura de IC, o modelo DEA *BoD* demonstra vantagem significativa ao permitir que para cada unidade avaliada sejam considerados os seus pesos ótimos, otimizando assim o valor de seu IC em relação aos outros portos (ROIZ, 2022).

Entretanto, de acordo com Cherchye et al. (2007), a ajustabilidade que o modelo pressupõe para os pesos pode ser indevidamente otimista, uma vez que permite atribuir pesos zero ou extremamente altos a uma ou mais métricas de desempenho. Desta forma, ao interpretar e comparar os pesos, é necessário ter precaução.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos nesta pesquisa. A primeira seção apresenta a validação do modelo de eficiência proposto no Capítulo 4; a segunda seção apresenta os índices de eficiência dos portos investigados; e a terceira seção apresenta os indicadores compostos obtidos.

5.1 Validação do modelo: teste PCA-DEA e teste KS

Objetivando validar o modelo teórico de eficiência técnica apresentado no capítulo anterior, aplicou-se a Análise de Componentes Principais integrada à Análise Envoltória de Dados (PCA-DEA). Essa abordagem é amplamente adotada em estudos internacionais e, quando comparada a outros métodos, demonstra resultados consistentes e precisos (ADLER; YAZHEMSKY, 2010). A técnica possibilita verificar a permanência ou exclusão de variáveis no modelo inicial por meio de estatísticas de teste e matrizes específicas, como as comunalidades, a matriz de correlação anti-imagem, os testes de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e Bartlett, além dos autovalores. A aplicação da PCA-DEA foi realizada no software SPSS.

A primeira métrica examinada foram as comunalidades, que expressam a proporção da variância explicada pelos componentes principais. O número de comunalidades corresponde ao total de variáveis incluídas no modelo, e seus valores variam entre 0 e 1 — sendo 0 quando os fatores comuns não explicam nenhuma variância da variável, e 1 quando explicam toda a sua variabilidade. De modo geral, valores inferiores a 0,5 indicam a necessidade de excluir a variável do modelo. A Tabela 11 apresenta o resultado das comunalidades para as 9 variáveis do modelo proposto.

Tabela 11. Comunalidades das variáveis

Variáveis	Inicial	Extração
Funcionários	1	0,979
Taxa de frequência %	1	0,877
Total de resíduos (toneladas)	1	0,954
Consumo Energia (KWH)	1	0,981
Consumo de água (m ³)	1	0,981
Gases de Efeito Estufa (GEE) (toneladas)	1	0,888
Movimentação de carga (toneladas)	1	0,742
Receita operacional bruta (US\$)	1	0,946
Funcionárias	1	0,992

Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na Tabela 11, todas as 9 variáveis obtiveram valores de comunalidade acima de 0,5, sendo que 6 delas tem mais de 90% de sua variância explicada pelos fatores comuns. Portanto, o conjunto de comunalidades apresentadas pelo teste indica que todas as variáveis podem ser mantidas no modelo, sem a necessidade de exclusão. O maior valor de comunalidade foi observado na variável “funcionárias”, uma vez que esta explica 99,2% da variância explicada do componente, sendo a variável mais bem representada pelo modelo.

A segunda análise do teste de validação das variáveis se trata da matriz de correlação anti-imagem, que indica a adequação de cada variável para ser usada na PCA-DEA. Em casos de se detectarem valores pequenos na diagonal (ou seja, $r < 0,5$), deve considerar-se a eliminação da variável. A seguir, a Tabela 12 apresenta a matriz de correlação anti-imagem das 9 variáveis do modelo proposto para o presente estudo.

A análise da matriz de correlação anti-imagem permite avaliar a adequação individual de cada variável por meio dos valores dos coeficientes da “Medida de Adequação da Amostra” (*Measure of Sampling Adequacy MSA*)⁵, dispostos na diagonal principal da matriz.

Observa-se que a maioria das variáveis apresenta valores de coeficientes superiores a 0,70, como “Funcionários” (0,760), “Consumo de Energia” (0,780), “Consumo de água” (0,714), “Gases de efeito estufa (GEE)” (0,892), “Movimentação de carga” (0,715) e “Receita operacional bruta” (0,785), confirmando sua elevada contribuição para a estrutura correlacional do modelo.

No caso específico da variável “Total de resíduos (ton)”, o valor do coeficiente MSA observado é 0,166, o que, isoladamente, poderia sugerir baixa adequação individual à estrutura fatorial. Embora a variável apresente indicador individual de adequação reduzido, a literatura reconhece que critérios estatísticos não devem ser aplicados de forma automática. Conforme Hair et al. (2019) e Tabachnick e Fidell (2019), variáveis de elevada relevância teórica e substantiva podem e devem ser mantidas em modelos aplicados, desde que o modelo global apresente consistência estatística, como evidenciado pelo valor satisfatório do KMO geral.

Além disso, do ponto de vista conceitual do presente estudo, a variável “Total de resíduos (ton)” representa um indicador central de desempenho ambiental, refletindo diretamente impactos operacionais associados à sustentabilidade portuária. Sua presença no modelo é coerente com abordagens contemporâneas da DEA utilizadas com enfoque ambiental, as quais buscam integrar *outputs* desejáveis e indesejáveis, permitindo avaliar não apenas

⁵ A *Measure of Sampling Adequacy* (MSA), ou Medida de Adequação da Amostra, é um indicador estatístico utilizado em análises multivariadas, especialmente na Análise Fatorial e em procedimentos exploratórios.

eficiência produtiva, mas também eficiência eco-operacional. A exclusão dessa variável implicaria perda significativa de informação relevante, além de comprometer a capacidade do modelo de captar externalidades ambientais associadas às operações portuárias.

Adicionalmente, a análise das correlações fora da diagonal da matriz anti-imagem mostra que a variável “Total de resíduos (ton)” mantém relações consistentes com variáveis ambientais e operacionais, como consumo de água, consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa. Esse comportamento indica que a variável adiciona informação complementar ao modelo, reduzindo riscos de multicolinearidade excessiva e contribuindo para uma análise mais abrangente da eficiência portuária.

Tabela 12. Matriz de correlação anti-imagem

Variáveis	Funcionários	Taxa Freq.	Total de resíduos (ton.)	Consumo energia (kwh)	Consumo de água	GEE	Mov. carga (ton.)	Receita operacional	Funcionárias
Funcionários	,760 ^a	0,082	0,043	0,572	-0,691	0,318	0,387	-0,249	-0,614
Taxa Freq.	0,082	,542 ^a	0,496	0,175	-0,39	-0,011	0,184	-0,223	0,245
Total de resíduos (ton.)	0,043	0,496	,166 ^a	0,386	-0,499	-0,45	-0,059	-0,437	0,4
Consumo energia (kwh)	0,572	0,175	0,386	,780 ^a	-0,716	-0,092	0,235	-0,415	-0,299
Consumo de água	-0,691	-0,39	-0,499	-0,716	,714 ^a	-0,251	-0,049	0,651	-0,028
GEE	0,318	-0,011	-0,45	-0,092	-0,251	,892 ^a	0,041	-0,029	-0,156
Mov. carga (ton.)	0,387	0,184	-0,059	0,235	-0,049	0,041	,715 ^a	0,303	-0,614
Receita operacional	-0,249	-0,223	-0,437	-0,415	0,651	-0,029	0,303	,785 ^a	-0,504
Funcionárias	-0,614	0,245	0,4	-0,299	-0,028	-0,156	-0,614	-0,504	,783 ^a

Fonte: Elaboração própria.

As próximas métricas apresentadas correspondem à análise da adequação amostral por meio dos testes de Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) e de Bartlett⁶. O teste KMO é uma medida da adequação dos dados das variáveis para entrarem no modelo (compara as correlações simples com as correlações parciais), testando se o método é adequado aos dados disponíveis. Trata-se de um teste que varia de 0 a 1. Os valores abaixo de 0,5 invalidam a proposta, ou não classificam os dados como adequados para o método proposto; valores entre 0,5 e 0,8 indicam adequação média; valores entre 0,8 e 0,9 indicam boa adequação; e, por fim, valores entre 0,9 e 1 indicam adequação excelente.

O fato de o KMO geral permanecer em 0,744, mesmo com a inclusão da variável “Total de resíduos (ton)” confirma que sua presença não compromete a adequação global do modelo. Pelo contrário, evidencia que o conjunto das variáveis, analisado de forma integrada, apresenta estrutura correlacional suficiente para sustentar análises multivariadas robustas.

Dessa forma, a manutenção da variável “Total de resíduos (ton)” no modelo mostra-se estatisticamente defensável e teoricamente justificada, uma vez que:

- (i) o KMO geral indica boa adequação amostral;
- (ii) a variável não distorce a estrutura correlacional do conjunto; e
- (iii) sua exclusão reduziria a capacidade explicativa do modelo no que se refere à eficiência ambiental. Assim, a decisão metodológica adotada está alinhada tanto às boas práticas estatísticas quanto aos objetivos analíticos do estudo, reforçando a robustez e a consistência dos resultados obtidos.

O teste de Bartlett, por sua vez, é baseado na distribuição estatística de qui-quadrado e testa a hipótese nula de que a matriz de correlação é uma matriz identidade, isto é, não há correlação entre as variáveis. Valores de significância maiores do que 0,1 indicam que os dados não são adequados para o tratamento com a técnica PCA-DEA. Já os valores menores, permitem rejeitar a hipótese nula. Os resultados para os testes KMO e Bartlett constam na Tabela 13.

Tabela 13. KMO e Bartlett

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adequação de amostragem.		0,744
Teste de esfericidade de Bartlett	Qui-quadrado aprox.	1609,326
	df	36
	Sig.	0

Fonte: Elaboração própria.

⁶ Seu objetivo é verificar se as correlações entre as variáveis são suficientemente diferentes de zero para justificar a aplicação dessas técnicas

Quanto ao teste de Bartlett, com uma estatística de teste de 1609,326 e 36 graus de liberdade, foi obtida significância do teste igual a 0,000 rejeitando assim a hipótese nula de que a matriz de correlação é uma matriz identidade, isto é, que não há correlação entre as variáveis.

Na sequência, o último parâmetro apresentado é conhecido como autovalores, que apontam o percentual acumulado da variância que os fatores são capazes de explicar. Essa métrica mostra quantos fatores explicam o conjunto de variáveis da amostra e qual a parcela da variância eles explicam, a partir do processo chamado de retenção de fatores. Os resultados para os autovalores (*eigenvalues*) podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14. Autovalores

Componente	Valores próprios iniciais			Somadas de extração de carregamentos ao		
	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa
1	5,967	66,296	66,296	5,967	66,296	66,296
2	1,286	14,293	80,588	1,286	14,293	80,588
3	1,087	12,082	92,671	1,087	12,082	92,671
4	0,428	4,759	97,43			
5	0,153	1,704	99,134			
6	0,051	0,569	99,702			
7	0,021	0,239	99,941			
8	0,003	0,037	99,978			
9	0,002	0,022	100			

Fonte: Elaboração própria.

Ao reter três fatores, é possível notar que os três primeiros explicam cerca de 92,671% da variância cumulativa da amostra, sendo que a partir do 4º fator, os acréscimos de explicação da variância são marginais. Deste modo, conclui-se a etapa de validação, onde o modelo proposto foi validado pela metodologia PCA-DEA.

Por fim, ao aplicar o teste KS para a amostra e variáveis em questão, no período (2017-2024), foi obtido como resultado o valor da estatística 0,62797. Ao comparar com o valor crítico 0,14498 ($n=88$, $\alpha=5\%$), rejeitou-se a hipótese nula do teste, sendo possível aceitar a hipótese de retornos variáveis de escala e, portanto, a aplicação do modelo BCC nos dados e no modelo proposto.

5.2 Análise de eficiência portuária

A presente seção destina-se a apresentação dos resultados da aplicação da Análise Envoltória de Dados aos dados dos 11 portos investigados para o período de 2017 a 2024 considerando o tripé econômico, social e ambiental.

Na análise de desempenho dos portos, é considerada especialmente aqueles cujos índices de eficiência se destacaram, seja em aspectos positivos ou negativos. A eficiência, nesse caso, está relacionada principalmente à forma como os portos utilizam seus recursos (*Input*): Quantidade de funcionários, Taxa de frequência, Consumo de Energia (KWH), Consumo de água (m³), Resíduos (ton.) e seus resultados (*Output*): Movimentação de carga (ton.), Receita operacional bruta (US\$), e Emissão de gases de efeito estufa (GEE) em (ton).

5.2.1 Eficiência dos 11 portos analisados

A aplicação da DEA permitiu avaliar o desempenho relativo dos portos ao longo do período considerado (2017 a 2024), tomando como referência a fronteira eficiente construída a partir das melhores combinações observadas entre insumos e produtos. Os escores obtidos evidenciam um padrão de variação significativo, o que já era esperado em função da diversidade operacional e estrutural que caracteriza os diferentes portos analisados.

As Tabela 15, 16 e 17 apresentam os indicadores percentuais de eficiência considerando o tripé econômico, social e ambiental dos portos analisados (nacionais e internacionais) e suas respectivas medidas estatísticas.

Tabela 15. Eficiência dos portos – 2017 a 2024

Porto	Eficiência
Porto de Hamburgo2017	100,00%
Porto de Hamburgo2021	98,25%
Porto de Hamburgo2023	97,88%
Porto de Hamburgo2022	97,87%
Porto de Hamburgo2024	97,49%
Porto de Hamburgo2020	94,86%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2020	94,30%
Porto de Hamburgo2018	93,42%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2019	92,52%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2017	92,48%
Porto de Hamburgo2019	92,18%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2018	91,47%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2023	90,25%
Porto de Paranaguá2023	85,61%
Porto de Paranaguá2024	84,76%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2021	83,19%
Porto de Paranaguá2017	79,88%
Porto de Itaquí2018	79,08%
Porto de Itaquí2017	78,13%
Porto de Itaquí2019	77,62%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2022	77,32%
Porto de Itaquí2021	75,09%
Porto de Paranaguá2018	74,01%
Porto de Roterdã2017	72,51%

Tabela 16. Eficiência dos portos – 2017 a 2024 (continuação)

Porto	Eficiência
Porto de Itaquí2024	72,34%
Porto de Roterdã2024	71,91%
Porto de Valência2021	71,16%
Porto de Suape 2017	70,59%
Porto de Paranaguá2022	70,03%
Porto de Paranaguá2019	69,67%
Portos de Sines e do Algarve2019	69,33%
Porto de Roterdã2023	69,22%
Porto de Santos2023	68,87%
Porto de Suape 2019	67,96%
Porto de Roterdã2021	67,80%
Porto de Shanghai2022	67,78%
Porto de Shanghai2021	67,44%
Porto de Valência2017	67,36%
Porto de Santos2022	66,21%
Porto de Shanghai2019	65,78%
Portos de Sines e do Algarve2020	64,44%
Porto de Roterdã2022	64,01%
Porto de Shanghai2023	63,95%
Porto de Roterdã2018	63,93%
Porto de Suape 2021	63,88%
Porto de Shanghai2020	63,88%
Porto de Santos2020	63,88%
Porto de Shanghai2024	63,88%
Porto de Suape 2022	63,88%
Porto de Itaquí2020	63,88%
Portos de Sines e do Algarve2017	63,88%
Porto de Suape 2023	63,88%
Porto de Suape 2024	63,88%
Porto de Itaquí2023	63,88%
Porto de Shanghai2017	63,88%
Portos de Sines e do Algarve2021	63,88%
Portos de Sines e do Algarve2022	63,88%
Porto de Santos2021	63,88%
Porto de Singapura2023	63,88%
Porto de Santos2024	63,88%
Porto de Shanghai2018	63,88%
Portos de Sines e do Algarve2024	63,88%
Porto de Santos2018	63,88%
Porto de Santos2017	63,88%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguai2024	63,88%
Porto de Singapura2024	63,88%

Tabela 17. Eficiência dos portos – 2017 a 2024 (continuação)

Porto	Eficiência
Porto de Paranaguá2021	63,88%
Porto de Itaquí2022	63,88%
Porto de Paranaguá2020	63,88%
Portos de Sines e do Algarve2018	63,88%
Portos de Sines e do Algarve2023	63,88%
Porto de Valência2018	63,07%
Porto de Roterdã2019	62,93%
Porto de Valência2020	61,48%
Porto de Valência2019	60,79%
Porto de Suape 2018	56,97%
Porto de Roterdã2020	56,28%
Porto de Valência2024	52,82%
Porto de Santos2019	49,19%
Porto de Valência2022	41,07%
Porto de Valência2023	38,22%
Porto de Singapura2021	33,38%
Porto de Singapura2020	22,25%
Porto de Suape 2020	20,32%
Porto de Singapura2019	18,24%
Porto de Singapura2017	17,26%
Porto de Singapura2022	17,07%
Porto de Singapura2018	16,78%
Medidas estatísticas	
Média	66,74%
Mediana	63,91%
Desvio padrão	18,52%
Valor mínimo	16,78%
Valor máximo	100,00%

Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, a média de eficiência observada, de 66,74%, indica que, no conjunto, as unidades operam aquém de seu potencial máximo, quando comparadas à unidade que compõe a fronteira eficiente. A mediana, situada em 63,91%, indica que metade dos portos investigados apresenta desempenho inferior a esse valor, e a outra metade apresenta desempenho superior à mediana.

O desvio padrão de 18,52% confirma a existência de ampla heterogeneidade entre o desempenho dos portos avaliados. Esse resultado evidencia que a eficiência relativa não se distribui de forma uniforme, sendo influenciada por fatores estruturais, operacionais e gerenciais próprios de cada porto. Dessa forma, observa-se que alguns portos se posicionam próximos à fronteira eficiente – alcançando escores iguais ou superiores a 95% – enquanto

outros apresentam desempenhos substancialmente inferiores, revelando significativo potencial de melhoria.

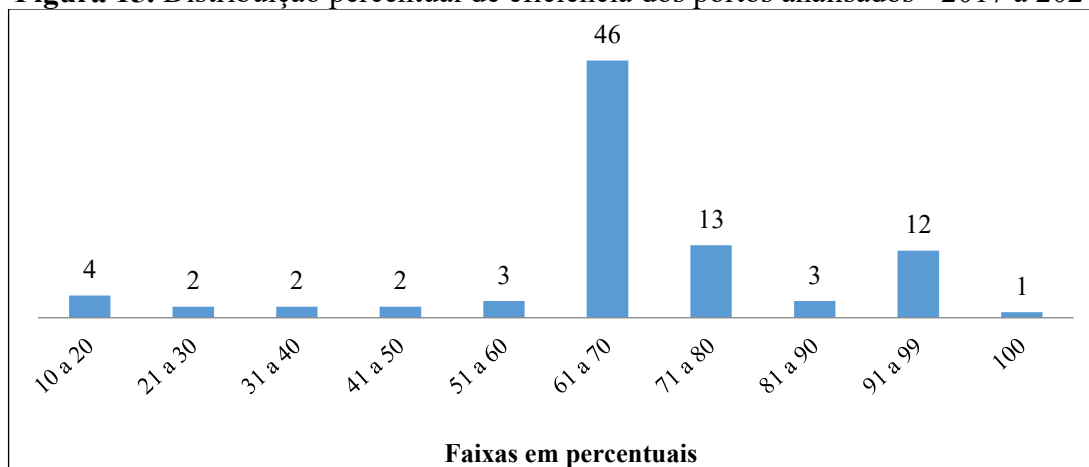
A amplitude dos escores, variando entre 16,78% e 100%, reforça esse diagnóstico. Valores próximos ao limite superior representam os portos que, dadas as condições observadas, utilizam seus recursos de maneira mais eficiente. Em contrapartida, escores muito baixos revelam unidades distantes das melhores práticas, indicando ineficiências técnicas relevantes que podem estar associadas a limitações operacionais, defasagem tecnológica, capacidade infraestrutural insuficiente ou escolhas gerenciais menos efetivas.

Outro aspecto que merece atenção diz respeito à concentração de diversas observações em torno de 63,88%, valor que surge repetidamente em diferentes portos e anos. Essa recorrência não pode ser confundida com configurações operacionais similares entre esses portos.

De modo geral, os resultados demonstram que a DEA foi eficaz em discriminar as unidades analisadas, permitindo identificar portos que atuam como referência e aqueles que apresentam maior lacuna de eficiência. Assim, a análise evidencia não apenas o nível de desempenho relativo dos portos investigados, mas também a magnitude da heterogeneidade presente no sistema portuário avaliado.

Além disso, percebe-se pela Figura 15 que os indicadores percentuais de eficiência entre 60% e 70% possuem maior frequência na amostra investigada, significando que a eficiência média do grupo analisado se enquadra nesse intervalo – fato comprovado pela média geral de eficiência.

Figura 15. Distribuição percentual de eficiência dos portos analisados - 2017 a 2024



Fonte: Elaboração própria.

5.2.2 Eficiência dos portos desagregados em internacionais e nacionais

A Tabela 18 apresenta a eficiência média dos portos internacionais analisados, considerando os três aspectos (econômicos, ambientais e sociais).

Tabela 18. Eficiência média dos 6 portos internacionais analisados – 2017 a 2024

Porto	Eficiência	Porto	Eficiência
Porto de Hamburgo2017	100,00%	Porto de Roterdã2017	72,51%
Porto de Hamburgo2021	98,25%	Porto de Roterdã2024	71,91%
Porto de Hamburgo2023	97,88%	Porto de Roterdã2023	69,22%
Porto de Hamburgo2022	97,87%	Porto de Roterdã2021	67,80%
Porto de Hamburgo2024	97,49%	Porto de Roterdã2022	64,01%
Porto de Hamburgo2020	94,86%	Porto de Roterdã2018	63,93%
Porto de Hamburgo2018	93,42%	Porto de Roterdã2019	62,93%
Porto de Hamburgo2019	92,18%	Porto de Roterdã2020	56,28%
Média	96,49%	Média	66,07%
Porto de Shanghai2022	67,78%	Portos de Sines e do Algarve2019	69,33%
Porto de Shanghai2021	67,44%	Portos de Sines e do Algarve2020	64,44%
Porto de Shanghai2019	65,78%	Portos de Sines e do Algarve2017	63,88%
Porto de Shanghai2023	63,95%	Portos de Sines e do Algarve2021	63,88%
Porto de Shanghai2020	63,88%	Portos de Sines e do Algarve2022	63,88%
Porto de Shanghai2024	63,88%	Portos de Sines e do Algarve2024	63,88%
Porto de Shanghai2017	63,88%	Portos de Sines e do Algarve2018	63,88%
Porto de Shanghai2018	63,88%	Portos de Sines e do Algarve2023	63,88%
Média	65,06%	Média	64,63%
Porto de Valência2021	71,16%	Porto de Singapura2023	63,88%
Porto de Valência2017	67,36%	Porto de Singapura2024	63,88%
Porto de Valência2018	63,07%	Porto de Singapura2021	33,38%
Porto de Valência2020	61,48%	Porto de Singapura2020	22,25%
Porto de Valência2019	60,79%	Porto de Singapura2019	18,24%
Porto de Valência2024	52,82%	Porto de Singapura2017	17,26%
Porto de Valência2022	41,07%	Porto de Singapura2022	17,07%
Porto de Valência2023	38,22%	Porto de Singapura2018	16,78%
Média	57,00%	Média	31,59%
Medidas estatísticas			
Média	63,48%		
Mediana	63,88%		
Desvio padrão	21,42%		
Valor mínimo	16,78%		
Valor máximo	100,00%		

Fonte: Elaboração própria.

A eficiência média do conjunto é de 63,48%, com uma mediana de 63,88%, indicando uma distribuição assimétrica e ligeiramente enviesada por observações de alta eficiência. O desvio padrão de 21,42% demonstra ampla dispersão dos escores, indicando níveis de desempenho consideravelmente desiguais entre os portos internacionais investigados. A amplitude observada, variando de 16,78% a 100%, confirma a coexistência de portos mais próximos à fronteira eficiente e portos com menor desempenho.

O Porto de Hamburgo apresenta-se consistentemente como a DMU mais eficiente do conjunto, com média de 96,49%, alcançando eficiência máxima (100%) em 2017 e mantendo valores muito próximos da fronteira eficiente nos demais anos analisados. Essa estabilidade indica alinhamento contínuo entre recursos utilizados e *outputs* gerados, característica típica de operações maduras e com elevada capacidade de adaptação tecnológica e organizacional. De acordo com o modelo DEA, o porto de Hamburgo funciona como *benchmark* para as demais unidades, projetando a fronteira eficiente e demonstrando a capacidade de operar em equilíbrio entre escala e intensidade de uso dos insumos.

Em contraste, o porto de Roterdã apresenta desempenho mediano, com eficiência média de 66,07%, situando-se próximo ao valor central do conjunto (63,48%). Embora seja um porto de grande porte e relevância global, seus resultados sugerem ineficiências possivelmente associadas a reorganização operacional ou impactos conjunturais externos.

A situação do porto de Shanghai revela uma trajetória marcada por estabilidade, embora em um patamar intermediário, com média de 65,06%. A concentração de diversos anos exatamente em 63,88% reforça a baixa variabilidade e indica que o porto opera de forma relativamente previsível e constante. No entanto, a distância em relação às melhores práticas sugere a existência de oportunidades de otimização, sobretudo em termos de escala produtiva e modernização de processos logísticos.

Os portos de Sines e do Algarve também apresentam desempenho estável, com média de 64,63%, posicionando-se próximos à mediana geral. A repetição de valores em diversos anos sugere um padrão operacional pouco variável, o que pode refletir limitações estruturais ou constância operacional. Embora não figurem entre os portos mais eficientes, sua eficiência relativamente constante indica previsibilidade e certa maturidade operacional.

O porto de Valência exhibe tendência de queda acentuada de eficiência ao longo da série, partindo de níveis moderados (71,16% em 2021) e atingindo valores de baixa eficiência, como 38,22% em 2023. Com média de 57,00%, situa-se abaixo dos demais portos de grande porte, refletindo perda de competitividade relativa dentro do conjunto analisado. A volatilidade

observada ao longo dos anos pode indicar desequilíbrio entre *inputs* e *outputs*, mudanças estruturais internas ou pressões de mercado ainda não absorvidas operacionalmente.

Por fim, o porto de Singapura apresenta a maior disparidade interna e o menor desempenho médio entre os portos avaliados, com apenas 31,59% de eficiência média. A presença de múltiplos anos com eficiência inferior a 20% — incluindo o valor mínimo geral (16,78%), sugere significativa distância da fronteira eficiente. Embora Singapura seja um dos portos mais movimentados do mundo, os resultados demonstram que, no conjunto comparativo e para o modelo DEA específico utilizado, há grande desproporção entre os recursos empregados e os *outputs* gerados, revelando forte potencial de melhoria, sobretudo em escala, tecnologia e gestão de capacidade.

A Tabela 19 apresenta a eficiência média dos portos nacionais analisados, considerando os três aspectos (econômicos, ambientais e sociais).

A análise dos portos públicos brasileiros, apresentada na Tabela 19, revela um conjunto relativamente mais homogêneo em comparação aos portos internacionais, embora ainda apresente diferenças significativas de desempenho ao longo dos anos observados. As medidas estatísticas gerais mostram uma eficiência média de 70,65%, com mediana de 68,41%. O desvio padrão de 13,54%, inferior ao observado nos portos internacionais, aponta para menor dispersão dos escores entre os portos brasileiros. Os valores extremos variam de 20,32% a 94,30%, evidenciando a coexistência de portos altamente eficientes e outros com performance substancialmente abaixo da fronteira técnica.

O complexo envolvendo os portos do Rio de Janeiro e Itaguaí destaca-se como a unidade portuária mais eficiente da amostra, alcançando média de 85,68% e com diversos anos se aproximando da fronteira eficiente, como em 2020, quando registra 94,30%, o valor máximo de toda a série brasileira. A consistência de seus resultados sugere forte alinhamento entre insumos empregados e *outputs* gerados, além de elevada capacidade de adaptação operacional.

Tabela 19. Eficiência média dos 5 portos públicos brasileiros analisados – 2017 a 2024

Porto	Eficiência	Porto	Eficiência
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2017	92,48%	Porto de Paranaguá2017	79,88%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2018	91,47%	Porto de Paranaguá2018	74,01%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2019	92,52%	Porto de Paranaguá2019	69,67%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2020	94,30%	Porto de Paranaguá2020	63,88%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2021	83,19%	Porto de Paranaguá2021	63,88%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2022	77,32%	Porto de Paranaguá2022	70,03%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2023	90,25%	Porto de Paranaguá2023	85,61%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2024	63,88%	Porto de Paranaguá2024	84,76%
Média	85,68%	Média	73,97%
Porto de Itaquí2017	78,13%	Porto de Santos2017	63,88%
Porto de Itaquí2018	79,08%	Porto de Santos2018	63,88%
Porto de Itaquí2019	77,62%	Porto de Santos2019	49,19%
Porto de Itaquí2020	63,88%	Porto de Santos2020	63,88%
Porto de Itaquí2021	75,09%	Porto de Santos2021	63,88%
Porto de Itaquí2022	63,88%	Porto de Santos2022	66,21%
Porto de Itaquí2023	63,88%	Porto de Santos2023	68,87%
Porto de Itaquí2024	72,34%	Porto de Santos2024	63,88%
Média	71,74%	Média	62,96%
Porto de Suape 2017	70,59%		
Porto de Suape 2018	56,97%		
Porto de Suape 2019	67,96%		
Porto de Suape 2020	20,32%		
Porto de Suape 2021	63,88%		
Porto de Suape 2022	63,88%		
Porto de Suape 2023	63,88%		
Porto de Suape 2024	63,88%		
Média	58,92%		
Medidas estatísticas			
Média			70,65%
Mediana			68,41%
Desvio Padrão			13,54%
Valor Mínimo			20,32%
Valor Máximo			94,30%

Fonte: Elaboração própria.

O porto de Paranaguá apresentou eficiência média de 73,97%, posicionando-se em segundo lugar nacionalmente, considerando a amostra investigada, refletindo desempenho pouco acima do médio. Sua trajetória revela uma tendência de recuperação após anos de queda, culminando em valores destacados em 2023 e 2024 (85,61% e 84,76%, respectivamente). Essa

evolução indica avanços operacionais, possivelmente relacionados à modernização logística, ganhos de escala ou maior equilíbrio entre capacidade instalada e movimentação efetiva. Os resultados sugerem que Paranaguá se aproxima da fronteira eficiente em anos específicos, tornando-se referência intermediária dentro do contexto nacional.

O porto de Itaquí, com eficiência média de 71,74%, apresenta padrão operacional com oscilações perceptíveis. O desempenho elevado em anos como 2017 e 2018 (acima de 78%) contrasta com períodos de recuo para a faixa de 63,88%, que se repete em diversos anos. Essa constância nesse valor específico pode indicar limitações estruturais ou uma estabilidade operacional que manteve o porto bastante abaixo da fronteira eficiente. Apesar disso, o porto de Itaquí permanece entre os portos com desempenho médio superior à média nacional e demonstra regularidade dentro do modelo DEA empregado.

O porto de Santos, maior complexo portuário do país, apresenta média de 62,96%, valor inferior à média geral da amostra. A presença de anos com baixa eficiência, como em 2019, com 49,19%, revela desafios operacionais associados à complexidade estrutural do porto, que historicamente opera sob forte pressão de demanda. Embora Santos apresente resultados moderados em vários anos (63,88% repetidamente), sua distância da fronteira eficiente evidencia potencial significativo para melhorias em organização, modernização e gestão da capacidade. Nesse sentido, o porto se afasta de atuar como *benchmark*, apesar de sua relevância econômica.

O porto de Suape é o que apresenta maior volatilidade entre os portos brasileiros analisados. Sua média geral é de 58,92%, a menor da amostra. O ano de 2020 destaca-se negativamente, com eficiência de apenas 20,32%, constituindo o valor mínimo de toda a série. Essa queda brusca pode estar associada a fatores conjunturais, interrupções operacionais ou desequilíbrios entre *inputs* e *outputs* naquele período. A partir de 2021, entretanto, o porto de Suape apresenta valores estáveis de 63,88%, sugerindo recuperação e estabilização de seu desempenho técnico, embora ainda distante da fronteira eficiente.

De forma geral, a análise conjunta dos portos brasileiros revela um conjunto menos disperso que o observado nos portos internacionais, mas ainda apresentando diferenças estruturais importantes. O complexo dos portos do Rio de Janeiro/Itaguaí opera menos distante da fronteira eficiente, sendo potencial *benchmark* nacional, enquanto outros, como os portos de Santos e, sobretudo, Suape, exibem lacunas consideráveis em eficiência relativa, segundo o modelo DEA.

A comparação dos portos mais e menos eficientes, com base nas médias de eficiência, obtidas pela Análise Envolvória de Dados, no período de 2017 a 2024, permite identificar

diferenças estruturais relevantes entre portos internacionais e portos públicos nacionais. Os resultados evidenciam contrastes significativos tanto nos níveis máximos de eficiência alcançados quanto na magnitude das ineficiências observadas, reforçando a utilidade da DEA como instrumento comparativo entre sistemas portuários distintos.

No grupo dos portos mais eficientes, o porto de Hamburgo destaca-se no contexto internacional com eficiência média de 96,49%, operando de forma sistematicamente próxima à fronteira eficiente ao longo do período analisado. Esse desempenho indica elevado grau de maturidade operacional, forte integração logística e utilização otimizada dos recursos disponíveis. No contexto nacional, o complexo dos portos do Rio de Janeiro e Itaguaí apresenta eficiência média de 85,68%, configurando-se como o porto público brasileiro mais eficiente da amostra. Embora apresente desempenho robusto, a diferença de 10,81 pontos percentuais, em relação a Hamburgo, revela um hiato de eficiência que pode ser atribuído a fatores como escala, nível tecnológico, governança e complexidade logística internacional.

A análise dos portos menos eficientes reforça a assimetria entre os dois grupos analisados. No cenário internacional, o porto de Singapura apresenta eficiência média de apenas 31,59%, valor significativamente distante da fronteira técnica definida pelo modelo DEA. Esse resultado indica forte desproporção entre *inputs* e *outputs* no conjunto comparativo adotado, sugerindo que, apesar de sua relevância global, o porto não convergiu para as melhores práticas relativas às demais DMUs internacionais analisadas. Tal evidência ressalta a sensibilidade da DEA ao conjunto de referência e às variáveis selecionadas.

No contexto nacional, o porto de Suape apresenta eficiência média de 58,92%, posicionando-se como o menos eficiente entre os portos públicos brasileiros avaliados. Embora esse valor seja inferior à média nacional, ele ainda se mostra substancialmente superior ao desempenho do porto internacional menos eficiente. A diferença de 27,33 pontos percentuais entre os portos de Suape e Singapura sugere que, mesmo nos piores desempenhos relativos, os portos brasileiros analisados apresentam menor distanciamento da fronteira eficiente do que seus pares internacionais mais ineficientes dentro do respectivo conjunto de comparação.

De forma geral, os resultados indicam que os portos mais eficientes, tanto internacionais quanto nacionais, operam mais próximos à fronteira de eficiência, embora o porto internacional apresente patamar superior absoluto. Por outro lado, a comparação dos portos menos eficientes evidencia maior dispersão e maior intensidade de ineficiência no conjunto internacional. Esses achados reforçam a importância de análises comparativas segmentadas, uma vez que a eficiência DEA é relativa ao conjunto de unidades analisadas.

5.2.3 Eficiência dos portos desagregados por porte

Considerando a ausência de uma classificação padronizada e aceita na literatura portuária que permita categorizar o tamanho dos portos de forma objetiva e comparável, este estudo adota como referência a Tabela 20, a qual classifica os portos em pequeno, médio e grande porte com base na média de movimentação de carga, em milhões de toneladas. Esse critério de classificação reflete de maneira direta o nível de atividade operacional dos portos, reduzindo distorções associadas a flutuações conjunturais anuais.

Tabela 20. Tamanho dos portos com base na média de movimentação

Tamanho	Média de movimentação de carga (milhões de ton.) de 2017 a 2024
Pequeno	0 a 50
Médio	51 a 100
Grande	acima de 101

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 21 apresenta a média de movimentação de carga e a média de eficiência de portos classificados como pequenos, segundo o critério adotado neste estudo, que considera como tal aqueles cuja movimentação média anual situa-se entre 0 e 50 milhões de toneladas.

No conjunto analisado, o porto de Suape apresenta a menor escala operacional, com média de aproximadamente 8,21 milhões de toneladas movimentadas no período de 2017 a 2024, associada a uma eficiência média de 58,92%. Observa-se pouca estabilidade na movimentação ao longo dos anos, com oscilações moderadas em torno desse patamar. Sob a ótica da DEA, essa combinação de baixa escala e eficiência moderada sugere a presença de subutilização da capacidade produtiva, na medida em que parte dos insumos empregados não se converte proporcionalmente em *outputs*. Ademais, a elevada variabilidade anual dos escores de eficiência, com destaque para a queda acentuada em 2020, indica sensibilidade a choques externos e menor resiliência operacional, características frequentemente associadas a portos de pequeno porte com menor flexibilidade estrutural.

O porto de Itaqui, por sua vez, apresenta média de movimentação significativamente superior à de Suape, situando-se em torno de 28,39 milhões de toneladas, acompanhada de uma eficiência média de 71,74%, a mais elevada entre os portos de pequeno porte analisados. Observa-se uma trajetória de crescimento consistente ao longo do período, especialmente a partir de 2019, evidenciando expansão da atividade operacional. Do ponto de vista da DEA, essa expansão do nível de atividades não necessariamente vem acompanhada de aumento da

eficiência. Em todos os momentos investigados, para o porto de Itaquí, houve subutilização de recursos, em maior (2023, por exemplo) ou menor escala (2019, por exemplo).

Tabela 21. Média de movimentação de portos considerados pequenos – 2017 a 2024

Porto	Movimentação	Eficiência em %
Porto de Suape 2017	7.034.758	70,59
Porto de Suape 2018	9.548.327	56,97
Porto de Suape 2019	9.248.580	67,96
Porto de Suape 2020	8.526.249	20,32
Porto de Suape 2021	8.302.065	63,88
Porto de Suape 2022	7.901.782	63,88
Porto de Suape 2023	7.871.800	63,88
Porto de Suape 2024	7.208.362	63,88
Média	8.205.240	58,92
Porto de Itaquí2017	19.113.973	78,13
Porto de Itaquí2018	22.403.221	79,08
Porto de Itaquí2019	25.171.460	77,62
Porto de Itaquí2020	25.337.152	63,88
Porto de Itaquí2021	31.064.139	75,09
Porto de Itaquí2022	33.610.776	63,88
Porto de Itaquí2023	36.419.648	63,88
Porto de Itaquí2024	34.038.874	72,34
Média	28.394.905	71,74
Portos de Sines e do Algarve2017	49.970.360	63,88
Portos de Sines e do Algarve2018	48.028.296	63,88
Portos de Sines e do Algarve2019	41.907.926	69,33
Portos de Sines e do Algarve2020	42.337.820	64,44
Portos de Sines e do Algarve2021	46.600.000	63,88
Portos de Sines e do Algarve2022	44.800.000	63,88
Portos de Sines e do Algarve2023	43.100.000	63,88
Portos de Sines e do Algarve2024	47.856.000	63,88
Média	45.575.050	64,63
Média geral dos portos pequenos	28.276.818	65,10

Fonte: Elaboração própria.

Já os portos de Sines e do Algarve situam-se no limite superior da classificação de pequeno porte, com média de aproximadamente 45,58 milhões de toneladas movimentadas no período e eficiência média de 64,63%. Apesar de apresentarem oscilações ao longo dos anos, mantêm-se consistentemente abaixo do patamar de 50 milhões de toneladas, justificando sua inclusão nessa categoria. Sob a ótica da DEA, a combinação de escala operacional

relativamente elevada com eficiência intermediária sugere que os ganhos potenciais de escala não se traduzem integralmente em aumentos de eficiência técnica. Tal resultado pode indicar a presença de ineficiências operacionais ou organizacionais, nas quais o crescimento da movimentação não é acompanhado por uma conversão proporcional dos insumos em *outputs*, limitando o desempenho relativo do porto no conjunto analisado.

A seguir, na Tabela 22, é apresentada a média de movimentação de carga e a média de eficiência dos portos classificados como médios, considerando o período de 2017 a 2024, com base no critério de volume médio anual movimentado entre 51 e 100 milhões de toneladas.

Tabela 22. Média de movimentação de portos considerados médios – 2017 a 2024

Porto	Movimentação	Eficiência em %
Porto de Paranaguá2017	48.648.543	79,88
Porto de Paranaguá2018	47.906.918	74,01
Porto de Paranaguá2019	49.409.097	69,67
Porto de Paranaguá2020	53.942.756	63,88
Porto de Paranaguá2021	50.629.977	63,88
Porto de Paranaguá2022	52.322.865	70,03
Porto de Paranaguá2023	58.263.147	85,61
Porto de Paranaguá2024	58.208.852	84,76
Média	52.416.519	73,97
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2017	59.149.294	92,48
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2018	63.800.000	91,47
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2019	50.400.000	92,52
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2020	54.886.567	94,30
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2021	62.053.189	83,19
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2022	62.000.370	77,32
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2023	66.902.040	90,25
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí2024	76.230.143	63,88
Média	61.927.700	85,68
Porto de Valência2017	73.559.877	67,36
Porto de Valência2018	76.621.101	63,07
Porto de Valência2019	81.063.555	60,79
Porto de Valência2020	80.882.224	61,48
Porto de Valência2021	85.269.726	71,16
Porto de Valência2022	79.365.729	41,07
Porto de Valência2023	77.163.000	38,22
Porto de Valência2024	81.139.000	52,82
Média	79.383.027	57,00
Média geral dos portos médios	64.575.749	72,21

Fonte: Elaboração própria.

O porto de Paranaguá apresentou média de movimentação de 52,42 milhões de toneladas no período de 2017 a 2024, posicionando-se no limite inferior da categoria de portos médios, com eficiência média de 73,97%. Observa-se uma trajetória de crescimento gradual ao longo do período analisado, com uma transição clara a partir de 2020, quando o porto passa a operar de forma consistente acima do patamar de 50 milhões de toneladas, alcançando volumes superiores a 58 milhões de toneladas em 2023 e 2024. Essa combinação de expansão de escala e eficiência relativamente elevada sugere melhora no aproveitamento da capacidade instalada, ainda que com oscilações relevantes nos escores anuais de eficiência. Tal comportamento indica que o crescimento da movimentação contribuiu para ganhos de eficiência técnica, especialmente nos anos mais recentes, aproximando o porto de uma operação mais equilibrada entre escala e desempenho relativo.

O complexo portuário do Rio de Janeiro e Itaguaí apresentou média de movimentação de 61,93 milhões de toneladas, consolidando-se de forma robusta na categoria de portos médios, associada a uma eficiência média de 85,68%, a mais elevada entre os portos dessa classe. A série temporal evidencia crescimento expressivo ao longo do período, culminando em 76,23 milhões de toneladas em 2024. Através das lentes da DEA, esse desempenho combinado de escala crescente e elevada eficiência média indica forte capacidade de conversão dos insumos em *outputs*, sugerindo que a intensificação do uso dos ativos portuários foi acompanhada por ganhos consistentes de eficiência técnica, no entanto, com espaços para melhorias. Esse resultado posiciona o complexo como referência de desempenho entre os portos médios.

Por sua vez, o porto de Valência destacou-se como o porto médio com maior volume médio de movimentação, registrando, em média, 79,38 milhões de toneladas no período analisado, associado, contudo, a uma eficiência média de 57,00%, a mais baixa entre os portos médios. Os valores anuais de movimentação mantêm-se consistentemente elevados, com baixa volatilidade. Entretanto, na visão da DEA, a dissociação entre alta escala operacional e eficiência técnica moderada indica que os ganhos de volume não se traduzem proporcionalmente em desempenho relativo. Esse resultado sugere a presença de ineficiências estruturais ou operacionais, nas quais o elevado nível de atividade não é acompanhado por uma utilização igualmente eficiente dos insumos, afastando o porto da fronteira eficiente, apesar de sua posição de destaque em termos de movimentação.

Por fim, nas Tabela 23 e 24, são apresentados as médias de movimentações de cargas, bem como a média de eficiência dos portos classificados como grandes, conforme o critério adotado neste estudo (quantidade acima de 101 milhões de toneladas).

Tabela 23. Média de movimentação de portos considerados grandes – 2017 a 2024

Portos	Movimentação	Eficiência em %
Porto de Santos2017	105.664.106	63,88
Porto de Santos2018	116.488.522	63,88
Porto de Santos2019	121.270.047	49,19
Porto de Santos2020	131.653.780	63,88
Porto de Santos2021	126.819.232	63,88
Porto de Santos2022	137.091.529	66,21
Porto de Santos2023	152.269.514	68,87
Porto de Santos2024	159.668.140	63,88
Média	131.365.609	62,96
Porto de Shanghai2017	561.000.000	100,00
Porto de Shanghai2018	561.000.000	93,42
Porto de Shanghai2019	538.000.000	92,18
Porto de Shanghai2020	510.000.000	94,86
Porto de Shanghai2021	539.000.000	98,25
Porto de Shanghai2022	514.000.000	97,87
Porto de Shanghai2023	564.000.000	97,88
Porto de Shanghai2024	581.000.000	97,49
Média	546.000.000	96,49
Porto de Singapura2017	627.700.000	17,26
Porto de Singapura2018	630.100.000	16,78
Porto de Singapura2019	626.500.000	18,24
Porto de Singapura2020	590.740.000	22,25
Porto de Singapura2021	599.640.000	33,38
Porto de Singapura2022	578.220.000	17,07
Porto de Singapura2023	592.010.000	63,88
Porto de Singapura2024	622.670.000	63,88
Média	608.447.500	31,59
Porto de Hamburgo2017	136.500.000	100,00
Porto de Hamburgo2018	135.100.000	93,42
Porto de Hamburgo2019	136.600.000	92,18
Porto de Hamburgo2020	126.200.000	94,86
Porto de Hamburgo2021	128.700.000	98,25
Porto de Hamburgo2022	119.900.000	97,87
Porto de Hamburgo2023	119.900.000	97,88
Porto de Hamburgo2024	119.900.000	97,49
Média	127.850.000	96,49

Tabela 24. Média de movimentação de portos considerados grandes – 2017 a 2024
(continuação)

Porto	Movimentação	Eficiência em %
Porto de Roterdã2017	467.354.000	72,51
Porto de Roterdã2018	468.984.000	63,93
Porto de Roterdã2019	469.402.000	62,93
Porto de Roterdã2020	436.807.000	56,28
Porto de Roterdã2021	468.709.000	67,80
Porto de Roterdã2022	467.381.000	64,01
Porto de Roterdã2023	438.802.000	69,22
Porto de Roterdã2024	435.799.000	71,91
Média	456.654.750	66,07
Média geral dos portos grandes	374.063.572	70,72

Fonte: Elaboração própria.

O porto de Santos, maior porto da América Latina, apresentou média de movimentação de 131,37 milhões de toneladas no período de 2017 a 2024, associada a uma eficiência média de 62,96%. A trajetória da movimentação é claramente crescente, sobretudo a partir de 2020, culminando em 159,67 milhões de toneladas em 2024, o que evidencia expansão no uso da infraestrutura instalada. No entendimento da DEA, entretanto, observa-se que a elevada escala operacional não se traduz plenamente em eficiência técnica, sugerindo a presença de restrições operacionais, organizacionais ou tecnológicas que limitam a conversão proporcional dos insumos em *outputs*. Esse resultado indica que, apesar do crescimento expressivo do volume movimentado, o porto ainda apresenta ineficiências relativas compatíveis com a complexidade operacional típica de grandes *hubs* logísticos.

Os portos asiáticos de Shanghai e Singapura destacam-se como as maiores unidades do conjunto analisado, com médias de 546,00 milhões e 608,45 milhões de toneladas movimentadas, respectivamente. No caso do porto de Shanghai, essa elevada escala é acompanhada por uma eficiência média de 96,49%, posicionando-o consistentemente próximo à fronteira eficiente ao longo de todo o período analisado. A combinação de volume extremamente elevado, estabilidade operacional e altos escores de eficiência evidencia um uso altamente eficaz dos insumos produtivos, refletindo elevados níveis de automação, integração logística e maturidade institucional. Na perspectiva da DEA, o porto de Shanghai configura-se como referência estrutural de eficiência, influenciando de forma significativa a definição da fronteira eficiente do modelo.

Em contraste, o porto de Singapura, apesar de apresentar a maior média de movimentação da amostra (608,45 milhões de toneladas), registra eficiência média de apenas 31,59%, a mais baixa entre todos os portos analisados. Esse resultado evidencia uma dissociação marcante entre escala operacional e eficiência técnica, caracterizando uma fragilidade estrutural generalizada, conforme discutido anteriormente. Ainda que o porto apresente robustez logística e estabilidade de volumes, a DEA indica que os insumos empregados não são convertidos de forma proporcional em *outputs* eficientes no contexto comparativo do modelo, o que compromete seu desempenho agregado e o distancia da fronteira eficiente.

Já o porto de Roterdã, principal *hub* logístico da Europa, apresentou média de movimentação de 456,65 milhões de toneladas, associada a uma eficiência média de 66,07%. Embora se observe uma leve redução nos volumes movimentados a partir de 2020, o porto mantém-se claramente enquadrado na categoria de grande porte ao longo de toda a série histórica. A combinação de escala elevada e eficiência intermediária sugere que ajustes operacionais e conjunturais, possivelmente relacionados a mudanças no comércio internacional e à transição energética europeia — afetaram a capacidade do porto de operar próximo à fronteira eficiente. Ainda assim, sua relevância estrutural e institucional permanece elevada, embora sem desempenho técnico de excelência no período analisado.

Por fim, o porto de Hamburgo apresentou média de movimentação de 127,85 milhões de toneladas no período investigado, posicionando-se no limite inferior da categoria de grandes portos, mas com eficiência média de 96,49%, uma das mais elevadas da amostra. A relativa estabilidade da movimentação observada a partir de 2021 indica consolidação de um patamar operacional consistente. De acordo com a DEA, o porto de Hamburgo constitui um caso emblemático de elevada eficiência técnica associada a uma escala relativamente menor dentro do grupo de grandes portos, ainda assim, evidenciando elevada capacidade de conversão dos insumos em *outputs*.

Esse desempenho reforça seu papel como *benchmark* recorrente em estudos de eficiência portuária, demonstrando que níveis elevados de eficiência não dependem exclusivamente de grandes volumes movimentados, mas sobretudo da qualidade da gestão e do uso dos recursos produtivos.

5.2.4 Produtividade dos fatores

Por fim, resta realizar uma análise quanto à produtividade de alguns insumos dos portos, visando identificar o quanto essas variáveis contribuíram para a construção dos indicadores de

eficiência encontrados. A escolha dos insumos utilizados recaiu naquelas variáveis de *inputs* que apresentaram as maiores comunalidades (Tabela 11): funcionários (funcionárias + funcionários) e consumo de energia. A escolha dos resultados utilizados também se baseou nas variáveis de *outputs* de maiores comunalidades (Tabela 11): receita operacional e emissão de GEE.

Com isso, foram criados 4 indicadores do tipo *output/input*: (a) Receita operacional/Funcionários (produtividade do funcionário na geração de receita – quanto maior, melhor); (b) Emissão de GEE/Funcionário (produtividade do funcionário na emissão de GEE – quanto menor melhor); (c) Receita operacional/Consumo de energia (produtividade do kwh de energia na geração de receita – quanto maior, melhor); e (d) Emissão de GEE/Consumo de energia (produtividade do kwh de energia na emissão de GEE – quanto menor, melhor).

Duas observações se fazem relevantes: (i) devido à grande diferença na escala do registro das variáveis, os dados seguem normalizados (normalização linear – escalonamento min-max), embora essa não seja uma exigência da Análise Envoltória de Dados; e (ii) as variáveis “consumo de energia” e “emissão de GEE” são do tipo “quanto menor, melhor”, sendo assim, e para evitar o problema de otimização de variáveis indesejáveis, Seiford e Zhu (2002) indicam uma metodologia de transformação monotônica decrescente, ou multiplicativa inversa.

Nessa técnica, os valores das variáveis indesejadas são transformados em seus inversos. Dessa forma, valores originalmente menores passam a assumir valores mais elevados na nova escala, tornando essas variáveis compatíveis com a lógica do modelo DEA, em que valores maiores representam melhor desempenho.

A Tabela 25 apresenta os valores dos indicadores (a), (b), (c) e (d) além do indicador de eficiência média, por porto. Vale destacar que tais indicadores foram obtidos a partir dos valores médios das variáveis “funcionários”, “consumo de energia”, “receita operacional” e “emissão de GEE”, por porto, do período de 2017 a 2024.

Tabela 25. Relação *output/input* dos portos e indicadores de eficiência

Portos	Receita/Funcionário	GEE/Funcionário	Receita/Energia	GEE/Energia	Eficiência
Porto de Hamburgo	2,32272	0,19689	5,90546	0,50059	0,96494
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí	2,58008	0,12451	0,82317	0,03972	0,85679
Porto de Paranaguá	0,38166	0,27780	0,04753	0,03460	0,73967
Porto de Itaquí	15,22496	199,17074	0,05676	0,74248	0,71739
Porto de Roterdã	2,06372	0,69760	1,03899	0,35121	0,66074
Porto de Shanghai	1,00000	0,00000	0,10024	0,03360	0,65061
Portos de Sines e do Algarve	0,80841	0,97200	0,00000	0,33833	0,64635
Porto de Santos	0,64189	0,00340	0,40692	0,00216	0,62961
Porto de Suape	0,22472	0,95541	0,00242	0,01029	0,58921
Porto de Valência	1,02814	50,70754	0,05032	2,48192	0,56998
Porto de Singapura	0,92401	1,25888	0,14106	0,19218	0,31594
Tercil 1 (pior)	0,22472 - 0,80841	0,00000 - 0,19689	0,00000 - 0,05032	0,00216 - 0,03460	0,31594 - 0,62961
Tercil 2 (intermediário)	0,80841 - 2,06372	0,19690 - 0,97200	0,05033 - 0,40692	0,03461 - 0,35121	0,62962 - 0,71739
Tercil 3 (melhor)	2,06373 - 15,22496	0,97201 - 199,17074	0,40693 - 5,90546	0,35122 - 2,48192	0,71740 - 0,96494

Fonte: Elaboração própria.

Os dados dos cinco indicadores apresentados [(a), (b), (c), (d) e eficiência] foram subdivididos em tercils. Para cada um dos indicadores, no primeiro tercil estão agrupados os dados dos portos de pior desempenho, no segundo tercil estão agrupados os dados dos portos de desempenho intermediário e, por fim, no terceiro tercil estão os dados dos portos de melhor desempenho.

Na sequência, alguns portos foram analisados individualmente. Optou-se por seleccionar os dois portos (um internacional e um nacional) de melhor desempenho (porto de Hamburgo e o complexo do Rio de Janeiro e Itaguaí); dois portos categorizados no pior tercil de desempenho (portos de Santos e Singapura); assim como o porto de Roterdã, um dos maiores e mais importantes do mundo.

A unidade de maior eficiência média foi o porto de Hamburgo, com um indicador de eficiência de 96,49%. O porto em questão, que está localizado no terceiro tercil do âmbito da eficiência, obteve: (i) a melhor produtividade do consumo de energia na geração de receita, dentre os portos analisados; (ii) a segunda melhor produtividade dos funcionários na geração de receita entre os portos; e (iii) uma das melhores produtividades do kwh de energia na emissão de GEE – fazendo com que este porto fosse alocado no terceiro tercil (melhor desempenho) destes indicadores.

Apenas a produtividade dos funcionários na geração de GEE foi considerada de desempenho ruim (primeiro tercil), indicando que o porto de Hamburgo pode se aprimorar nesta questão, incrementando, assim, sua eficiência média. Para efeito de análise, conforme já mencionado, este indicador sofreu ajuste na variável 'emissão de GEE'. Dessa forma, um aumento no valor do indicador representa uma menor emissão de GEE por funcionário, refletindo melhor desempenho ambiental da unidade analisada.

Dessa forma, o porto de Hamburgo apresentou relativa homogeneidade na disposição dos tercils, sendo que 80% dos indicadores estavam no terceiro tercil, ou seja, na faixa de melhor desempenho. Na prática, tais resultados apontam, por exemplo, que mesmo o porto de Hamburgo não apresentando os maiores valores nas variáveis de *inputs*, foi o porto que melhor conseguiu convertê-las em resultados, obtendo, assim, a maior eficiência média da amostra no recorte temporal investigado.

Já o complexo portuário do Rio de Janeiro e Itaguaí apresentou eficiência média de 85,68%, posicionando-se no terceiro tercil de eficiência entre os portos analisados. Esse resultado indica desempenho global elevado, ainda que inferior ao observado na unidade de maior eficiência da amostra (porto de Hamburgo), refletindo diferenças na conversão relativa dos insumos econômicos, energéticos e ambientais em resultados.

No tocante à produtividade dos funcionários na geração de receita, o porto foi alocado no terceiro tercil (melhor desempenho), indicando que o porto consegue transformar seu quadro de funcionários em receita operacional de forma relativamente superior à maioria das unidades analisadas.

Em contraste, a produtividade dos funcionários na emissão de GEE do porto situou-se no primeiro tercil (pior desempenho). Considerando que a variável “emissão de GEE” foi ajustada, esse valor reduzido indica baixa eficiência ambiental do fator trabalho, sugerindo que as emissões associadas às atividades portuárias, quando ponderadas pelo número de funcionários, permanecem elevadas em termos relativos. Logo, assim como no porto de Hamburgo, um aumento no referido indicador reflete uma menor emissão de GEE por funcionário, indicando melhor desempenho ambiental.

Com relação à produtividade do consumo de energia na geração de receita, o complexo do Rio de Janeiro e Itaguaí foi classificado no terceiro tercil (melhor desempenho). Esse resultado aponta para elevada capacidade de conversão do consumo energético em receita operacional, evidenciando bom desempenho econômico associado ao uso da energia.

Por fim, a produtividade do consumo de energia na emissão de GEE, foi alocada no segundo tercil (desempenho intermediário). Esse resultado indica eficiência ambiental intermediária do uso energético, sugerindo que, embora o porto apresente desempenho superior ao das unidades menos eficientes, ainda há espaço para aprimoramentos na redução das emissões associadas ao consumo de energia.

No caso do porto de Santos, este foi enquadrado no primeiro tercil de eficiência média, com 62,96%. No que diz respeito à produtividade dos funcionários na geração de receita, o porto foi classificado no primeiro tercil (pior desempenho). Esse resultado evidencia baixa eficiência econômica do fator trabalho, indicando que a receita gerada por empregado é relativamente reduzida quando comparada à maior parte das unidades analisadas.

Em relação à produtividade dos funcionários na emissão de GEE, o porto de Santos situou-se no primeiro tercil (pior desempenho). Esse valor, extremamente reduzido, indica baixa eficiência ambiental associada ao fator trabalho, sugerindo elevada intensidade de emissões por empregado no contexto comparativo da amostra.

No âmbito da produtividade do consumo de energia na geração de receita, o porto foi alocado no segundo tercil (desempenho intermediário). Esse resultado aponta para uma capacidade moderada de conversão do consumo energético em receita operacional,

sem, contudo, alcançar o desempenho observado nos portos mais eficientes nesse indicador.

Por fim, a produtividade do consumo de energia na emissão de GEE, posicionou o porto no primeiro tercil (pior desempenho). Esse valor indica baixa eficiência ambiental do uso energético, evidenciando que o consumo de energia permanece fortemente associado à alta geração de GEE em termos relativos.

Seguindo para o porto de Singapura, a eficiência média foi de 31,59%, sendo classificado no primeiro tercil de eficiência entre os portos analisados. Tal resultado demonstra o menor desempenho global da amostra, refletindo limitações estruturais na capacidade de conversão dos insumos econômicos, energéticos e ambientais em resultados eficientes, no recorte temporal considerado.

No que se refere à produtividade dos funcionários na geração de receita, o porto situou-se no segundo tercil, indicando um desempenho econômico intermediário do fator trabalho. Esse resultado sugere que, embora o porto apresente capacidade razoável de geração de receita por empregado, tal desempenho não é suficiente para posicioná-lo entre as unidades mais eficientes nesse indicador.

Em contraste, a produtividade dos funcionários na emissão de GEE foi alocada no terceiro tercil (melhor desempenho). Esse resultado indica elevada eficiência ambiental associada ao fator trabalho, evidenciando que as emissões relativas por empregado são significativamente inferiores às observadas na maior parte dos portos analisados, constituindo o principal ponto forte da unidade.

No âmbito da produtividade do consumo de energia na geração de receita, o porto de Singapura foi classificado no segundo tercil, refletindo eficiência energética econômica intermediária. Esse resultado aponta que, apesar de o porto apresentar capacidade moderada de conversão do consumo energético em receita operacional, o uso da energia não se configura como fator de diferenciação positiva no conjunto avaliado.

De forma semelhante, a produtividade do consumo de energia na emissão de GEE, também se situou no segundo tercil. Esse valor indica eficiência ambiental intermediária do uso energético, sugerindo que as emissões associadas ao consumo de energia não representam um gargalo crítico isolado, tampouco configuram um elemento de destaque positivo.

Já o porto de Roterdã registrou eficiência média de 66,07%, posicionando-se no segundo tercil do conjunto avaliado. Esse desempenho revela uma posição intermediária no ranking de eficiência.

No âmbito da geração de receita por trabalhador, o porto situou-se no segundo tercil, indicando um nível moderado de retorno econômico do fator trabalho. Tal resultado sugere que, apesar de a estrutura operacional permitir a obtenção de receitas relevantes por empregado, o desempenho permanece aquém daquele observado nos portos com maior eficiência nesse indicador.

Quanto à relação entre quadro de pessoal e emissões de GEE, o porto de Roterdã também foi alocado no segundo tercil. Esse valor reflete uma eficiência ambiental intermediária associada ao trabalho, indicando que as emissões geradas por funcionário não se configuram nem como um ponto crítico nem como um diferencial positivo no conjunto analisado.

No que se refere à capacidade de transformar consumo energético em receita, o porto alcançou o terceiro tercil, destacando-se positivamente nesse aspecto. Esse resultado evidencia que a energia consumida nas operações portuárias é utilizada de forma relativamente eficiente para fins econômicos, constituindo um importante vetor de desempenho favorável da unidade.

Por fim, na relação entre consumo de energia e emissão de GEE, o porto permaneceu no segundo tercil, sinalizando um nível intermediário de eficiência ambiental do uso energético. Esse resultado indica que, embora o porto não apresente desempenho desfavorável nesse indicador, existem oportunidades de melhoria associadas à redução da intensidade de emissões vinculadas ao consumo energético.

A Tabela 26 apresenta um resumo da distribuição percentual dos indicadores por tercil, incluindo eficiência para os portos analisados.

A distribuição percentual dos indicadores por tercil evidencia diferenças marcantes nos perfis de desempenho dos portos analisados. O porto de Hamburgo apresenta o perfil mais homogêneo e robusto, com 80% dos indicadores no terceiro tercil, não registrando ocorrências no primeiro tercil, o que confirma sua condição de referência em eficiência econômico-ambiental no contexto da amostra.

O complexo do Rio de Janeiro e Itaguaí apresenta 60% dos indicadores no terceiro tercil e 40% no primeiro tercil, caracterizando um perfil assimétrico, no qual desempenhos econômicos elevados coexistem com fragilidades ambientais pontuais. O porto de Santos apresenta 60% dos indicadores no primeiro tercil e ausência de indicadores no grupo de melhor desempenho. O porto de Singapura, por sua vez, registra a menor eficiência média da amostra, caracterizando uma fragilidade estrutural maior que os demais portos analisados. Além disso, apresenta a maior dispersão, com 60% dos

indicadores no segundo tercil, 20% no primeiro e 20% no terceiro. O porto de Roterdã concentra 80% dos indicadores no segundo tercil, revelando um perfil predominantemente intermediário, sem extremos positivos ou negativos relevantes.

Tabela 26. Distribuição percentual dos indicadores por tercil (incluindo eficiência)

Porto	% no 1º tercil (pior)	% no 2º tercil (intermediário)	% no 3º tercil (melhor)
Porto de Hamburgo	0%	20%	80%
Porto do Rio de Janeiro e Itaguaí	40%	0%	60%
Porto de Roterdã	0%	80%	20%
Porto de Singapura	20%	60%	20%
Porto de Paranaguá	60%	20%	20%
Porto de Santos	60%	40%	0%

Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar a distribuição dos indicadores de produtividade nos tercis, nota-se que as razões Receita/Funcionários e Receita/Energia apresentaram maior efeito sobre os resultados, já que, em 60% dos casos, a eficiência e os indicadores Receita/Funcionários e Receita/Energia se encontram no mesmo tercil da distribuição. Além disso, foi possível identificar, em algumas unidades, uma completa dissociação entre o tercil que se encontra a eficiência e os tercis dos demais indicadores. Para esses casos, isso pode indicar que o papel da eficiência foi em grande medida definido pela produtividade de outras variáveis e outras relações *output/input*, não abordadas nas análises mais detalhadas.

A aplicação da Análise Envoltória de Dados nesta etapa teve como objetivo mensurar a eficiência técnica relativa dos portos analisados, considerando a relação entre insumos utilizados e produtos gerados no processo produtivo portuário. Os resultados obtidos permitem identificar quais unidades operam mais próximas da fronteira eficiente, bem como aquelas que apresentam maior potencial de melhoria no uso de seus recursos.

Entretanto, a avaliação da eficiência técnica, embora relevante, não é suficiente para capturar de forma abrangente o desempenho portuário quando se considera a perspectiva da sustentabilidade. Portos constituem sistemas complexos, nos quais dimensões econômicas, ambientais e sociais interagem simultaneamente. Dessa forma, torna-se necessário adotar uma abordagem complementar capaz de integrar múltiplos indicadores em uma métrica sintética de desempenho. Nesse contexto, a seção seguinte

apresenta a construção de um indicador composto de sustentabilidade portuária, desenvolvido a partir da abordagem *DEA-Benefit of the Doubt (BoD)*.

5.3 Construção do indicador composto de sustentabilidade portuária

Enquanto a seção anterior concentrou-se na mensuração da eficiência técnica dos portos por meio da DEA, nesta etapa a técnica é empregada com uma finalidade distinta: a construção de um indicador composto de sustentabilidade portuária. Diferentemente da aplicação tradicional da DEA — baseada na relação entre *inputs* e *outputs* para estimar eficiência produtiva — a abordagem *Benefit of the Doubt (BoD)* utiliza os princípios da DEA para agregar múltiplos subindicadores em um índice sintético de desempenho relativo.

Dessa forma, os resultados obtidos nesta seção não devem ser interpretados como eficiência técnica em sentido estrito, mas como um *score* composto que reflete o desempenho multidimensional dos portos nas dimensões econômica, ambiental e social. A utilização dessa abordagem permite sintetizar informações provenientes de diferentes indicadores em uma única métrica comparável, possibilitando a construção de um *ranking* de sustentabilidade entre os portos analisados.

5.3.1 Análise das variáveis

Nesta seção são expostas as principais estatísticas descritivas associadas aos subindicadores (variáveis) que integram o modelo de Indicador Composto proposto. A análise dessas estatísticas, tanto em sua forma original quanto após o processo de normalização, é fundamental para a adequada interpretação dos resultados obtidos com a aplicação do modelo.

5.3.1.1 Indicadores brutos

No que se refere aos indicadores em sua forma bruta, o Indicador Composto é constituído por nove subindicadores, conforme detalhado na seção metodológica. A Tabela 27 sintetiza as principais medidas estatísticas dessas variáveis, calculadas a partir dos dados de 11 portos ao longo de um período de oito anos contemplado na amostra.

A Tabela 27 evidencia a magnitude e unidades de medida diferentes entre si, tais como as medidas de dispersão e médias. Os valores máximos e mínimos dos 9 subindicadores utilizados evidenciam a amplitude das variáveis (subindicadores), para o grupo de portos estudado. A quantidade de funcionárias apresentou média de 386 para a

amostra utilizada, enquanto o menor valor foi de 44 funcionárias (porto de Sines e do Algarve) e o valor máximo observado foi de 2.699 (porto de Shanghai).

Para a variável funcionários, a média foi de 1.611. Os portos de Shanghai e Sines/Algarve também exibiram os valores máximo (14.514) e mínimo (128) para essa variável, respectivamente.

O total de resíduos em toneladas teve o porto de Santos como o maior gerador (288.000 toneladas) e o porto de Sines e do Algarve com o menor gerador, com 17,6 toneladas. Em relação ao consumo de energia em KWH, a média foi de 59.119.945, e o porto que apresentou o maior consumo foi o porto de Shanghai, com 515.950.000 KWH. Além disso, o porto que menos consumiu energia elétrica foi o porto de Itaquí, com 2.417.332 KWH.

Comportamento semelhante é observado para o consumo de água, cuja média foi de 513.830.112 m³, com valores mínimo e máximo de 7.105.000 m³ (porto de Itaquí) e 4.700.000.000 m³ (porto de Shanghai). O desvio padrão foi de 1.238.741.883 m³ e a mediana relativamente baixa (69.564.000).

A movimentação de carga, variável central para a caracterização da atividade portuária, apresentou média de 195.110.936 toneladas. A menor movimentação foi aquela observada no porto de Suape em 2017, com 7.034.758 toneladas e a maior movimentação de 630.100.000 toneladas, em 2018 no porto de Singapura, com desvio padrão de 215.142.860.

No que se refere à receita operacional, expressa em dólares americanos (US\$), a média observada foi de US\$ 871.432.000, com valor mínimo de US\$ 49.661.908, registrado para o Porto de Sines e do Algarve, e máximo de US\$ 5.752.670.817, para o Porto de Shanghai

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) em toneladas, apresentam média de 82.154, com valores mínimo e máximo de 48 e 890.738, para os portos de Itaquí e Shanghai, respectivamente. O desvio padrão elevado (173.529) e a mediana relativamente baixa (6.722) indicam elevada assimetria na distribuição desse indicador, associada a diferenças nos padrões operacionais e na eficiência ambiental dos portos.

Por fim, a taxa de frequência de acidentes apresenta média de 5,90, com valor mínimo de 0,00 e máximo de 28,77. O desvio padrão de 7,55 e a mediana de 2,95 indicam que a maior parte dos portos apresenta taxas de acidentes inferiores à média, enquanto poucos casos com valores elevados influenciam o comportamento médio da variável.

De modo geral, a comparação entre médias e medianas revela que diversas variáveis apresentam distribuições assimétricas, influenciadas por valores extremos. Essa característica reforça a importância da normalização dos dados antes da agregação dos subindicadores no Indicador Composto, de forma a mitigar a influência desproporcional de portos com valores muito elevados em determinados indicadores.

Tabela 27. Estatística descritiva dos dados brutos

	Funcionárias	Funcionários	Resíduos (ton.)	Consumo de energia (KWH)	Consumo de água (m³)	Movimentação de carga (ton.)	Receita Operacional (US\$)	GEE (ton.)	Taxa de frequência
Máximo	2699	14514	288.000	515.950.000	4.700.000.000	630.100.000	5.752.670.817	890.738	28,77
Mínimo	44	128	17,60	2.417.332	7.105.000	7.034.758	49.661.908	48	0,00
Média	386	1611	26.032	59.119.945	513.830.112	195.110.936	871.432.024	82.154	5,90
Desvio padrão	671	3315	52.020	132.319.553	1.238.741.883	215.142.860	1.455.661.210	173.529	7,55
Mediana	145	451	4.553	16.594.021	69.564.000	80.123.977	234.249.267	6.722	2,95

Fonte: Elaboração própria.

5.3.1.2 Indicadores normalizados

A normalização das variáveis modifica as características das variáveis, deixando-as mais próximas em relação às dimensões e magnitudes. Isto pode ser verificado na Tabela 28, que apresenta as estatísticas descritivas dos dados normalizados das variáveis consideradas na elaboração do Indicador Composto.

Após a normalização, os dados passam a apresentar a mesma escala, o que facilita a interpretação dos resultados e possibilita a comparação direta entre as variáveis analisadas. Observa-se que os desvios padrão apresentam magnitudes relativamente próximas entre si, indicando níveis de dispersão comparáveis ao longo dos diferentes subindicadores/variáveis. Contudo, o padrão de distanciamento entre médias e medianas permanece mais acentuado nas variáveis movimentação de carga, receita operacional e taxa de frequência de acidentes, evidenciando a persistência de distribuições assimétricas, mesmo após o processo de normalização.

Tabela 28. Estatística descritiva dos dados normalizados

	Funcionárias	Funcionários	Resíduos	Consumo de energia	Consumo de água	Movimentação de carga	Receita operacional	GEE	Taxa de frequência
Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Média	0,13	0,10	0,07	0,30	0,13	0,30	0,14	0,08	0,10
Desvio Padrão	0,25	0,23	0,15	0,27	0,13	0,35	0,26	0,16	0,27
Mediana	0,04	0,02	0,00	0,14	0,10	0,12	0,03	0,01	0,01

Fonte: Elaboração própria.

5.3.2 Construção das janelas

Para a construção das janelas, cada porto em cada ano foi tratado como sendo uma unidade diferente de análise e com isso, na análise da DEA, adotou-se o método de análise de janelas. Esse método baseia-se em um entendimento dinâmico, onde se considera a mesma DMU em diferentes períodos como sendo DMU's completamente diferentes.

Para realizar este procedimento, foi aplicada a média móvel para selecionar diferentes conjuntos de referência para estipular a eficiência relativa de cada DMU. Com isso, quando a janela estipulada se move uma vez, o primeiro período de cada janela será eliminado e um novo período é acrescentado ao mesmo tempo. Segundo Halkos e Tzeremes (2009), o benefício deste processo é a possibilidade de descrever a modificação dinâmica do valor do índice relativo que é obtido pela ferramenta de cada DMU de maneira abrangente, tanto vertical como horizontalmente.

Cooper et al. (2000) propõem um modelo para o cálculo do número de janelas e sua amplitude, conforme as Equações 10 e 11:

$$W = k - p + 1 \quad (\text{Equação 10})$$

$$p = \frac{(k + 1)}{2} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

W é o número de janelas;

k é o número de anos;

p é a amplitude;

No presente estudo, o período de 2017 a 2024 corresponde a 8 anos, logo aplicando as Equações 10 e 11, tem-se:

$$p = \frac{(8 + 1)}{2} = 4,5$$

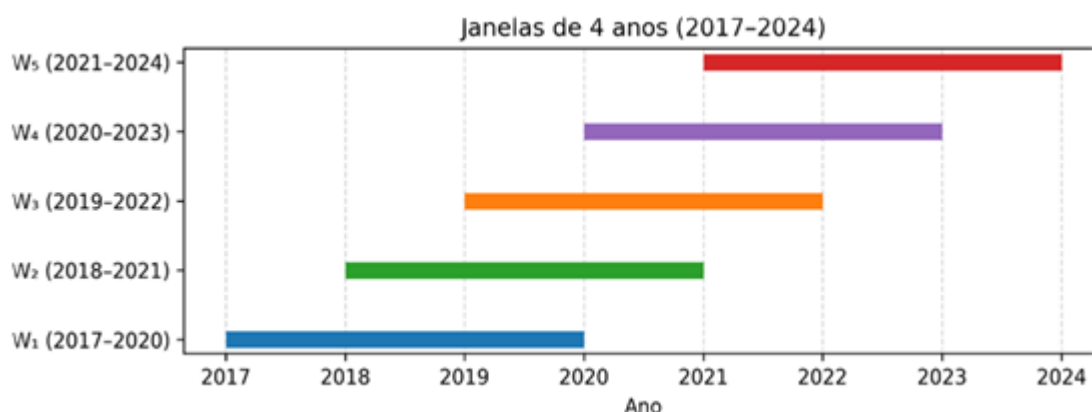
Com isso, obtém-se:

$$W = 8 - 4,5 + 1 = 4,5$$

Os 8 anos considerados (2017-2018) foram divididos em 5 janelas, contendo 4 anos cada, e seguindo o método proposto por Halkos e Tzeremes (2009), para cada janela seguinte, o ano mais defasado foi retirado enquanto um ano mais recente foi adicionado na próxima janela, compondo o seguinte conjunto de janelas: 2017-2020; 2018-2021; 2019-2022; 2020-2023; e 2021-2024.

Após a aplicação do modelo em cada uma das janelas, foi extraída a média simples de cada porto dentro de cada janela, compondo o valor do índice considerado para análise. Logo, de acordo com as Equações 10 e 11, foi assumido o valor de 5 janelas com amplitude de 4 anos cada, como apresentado na Figura 16.

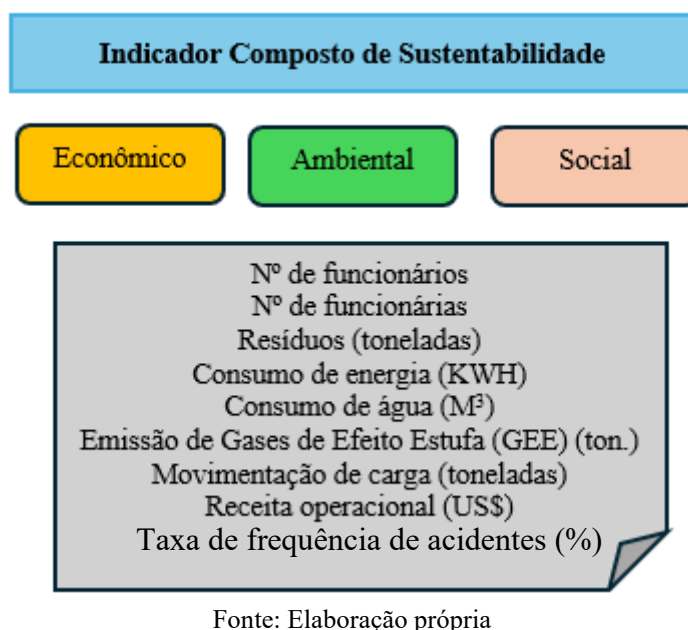
Figura 14. Janelas e suas amplitudes



Fonte: Elaboração própria.

5.3.3 Aplicação *DEA-BoD*

A modelagem proposta na seção de método foi aplicada para os dados normalizados em razão de suas vantagens em relação a escalas, desvios e magnitudes. A representação gráfica da composição do Indicador Composto sugerido e seus subindicadores/variáveis é ilustrada na Figura 17.

Figura 17. Subindicadores considerados

A aplicação do modelo para todas as janelas retornou os resultados que constam na Tabela 29.

Tabela 29. Resultado do modelo BoD das janelas

	Janelas					Média	Variância
	1	2	3	4	5		
Santos	0,394	0,360	0,301	0,277	0,229	0,312	0,003
Paranaguá	0,263	0,283	0,255	0,184	0,188	0,235	0,002
Suaape	0,917	0,820	0,673	0,655	0,638	0,741	0,012
Rio de Janeiro e Itaguaí	0,288	0,339	0,355	0,259	0,279	0,304	0,001
Itaqui	0,957	0,962	0,988	0,934	0,936	0,955	0,000
Shanghai	0,965	0,965	0,996	1,000	1,000	0,985	0,000
Singapura	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
Hamburgo	0,950	0,962	0,963	0,983	1,000	0,971	0,000
Roterdã	0,764	0,761	0,768	0,765	0,790	0,770	0,000
Valência	0,905	0,845	0,705	0,685	0,880	0,804	0,008
Sines e do Algarve	0,860	0,868	0,783	0,765	0,765	0,808	0,002

Fonte: Elaboração própria.

A observação das variâncias apresentadas na Tabela 29 permite afirmar que os índices variaram nada ou muito pouco ao longo das janelas consideradas, possibilitando inferir que o desempenho relativo dos portos analisados se manteve estável ao longo do período considerado. Tal comportamento indica que não foram observados crescimentos ou decrescimentos bruscos

nos níveis de eficiência, sugerindo a existência de padrões estruturais persistentes no desempenho portuário.

Com o intuito de estabelecer um *ranking* dos valores obtidos para o indicador composto médio ao longo das janelas, construiu-se uma ordenação decrescente dos portos. Nesse *ranking*, quanto maior o valor do indicador composto, melhor é o desempenho relativo do porto nas dimensões consideradas pelo modelo, que incluem aspectos operacionais/econômicos, ambientais e sociais. Esse procedimento permite comparar portos nacionais e internacionais sob uma mesma base metodológica, possibilitando inferências comparativas sobre o desempenho multidimensional dos portos analisados.

A Tabela 30 apresenta, de forma decrescente, os portos analisados. De acordo com as médias obtidas, os portos que apresentaram os maiores valores do indicador composto foram Singapura, Shanghai e Hamburgo, seguidos por Itaquí e Roterdã. Esses portos apresentam desempenho relativo superior no conjunto das dimensões consideradas pelo modelo, refletindo diferentes combinações entre escala operacional, desempenho econômico e padrões ambientais e sociais.

Tabela 30. *Ranking* de sustentabilidade – média do indicador composto ao longo das janelas

Ranking	Porto	Média do Indicador	Variância
1	Singapura	1,000	0,000
2	Shanghai	0,985	0,000
3	Hamburgo	0,971	0,000
4	Itaquí	0,955	0,000
5	Roterdã	0,770	0,000
6	Sines e Algarve	0,808	0,002
7	Valência	0,804	0,008
8	Suape	0,741	0,012
9	Santos	0,312	0,003
10	Rio de Janeiro e Itaguaí	0,304	0,001
11	Paranaguá	0,235	0,002

Fonte: Elaboração própria.

Em contrapartida, os portos que apresentaram os menores valores médios do indicador composto foram Paranaguá, Rio de Janeiro/Itaguaí e Santos. Tais resultados indicam desempenho relativo inferior no conjunto das dimensões consideradas pelo modelo, refletindo combinações menos favoráveis entre os subindicadores econômicos, ambientais e sociais utilizados na construção do indicador composto.

A análise por janelas temporais permite, ainda, observar que, embora haja pequenas oscilações nos valores do indicador ao longo do período analisado, o posicionamento relativo dos portos no *ranking* mantém-se praticamente inalterado ao longo do tempo. Esse comportamento decorre, em grande medida, da utilização de médias móveis na construção das janelas, procedimento que tende a suavizar variações conjunturais e a evidenciar padrões mais estáveis de desempenho relativo ao longo do período analisado.

Com base nos resultados do modelo *BoD* aplicados às janelas temporais, os valores do indicador composto foram ordenados em cada janela de forma decrescente, sendo: *Ranking* 1 = melhor desempenho relativo e *Ranking* 11 = pior desempenho relativo. A Tabela 31 apresenta a posição relativa de cada porto em cada janela temporal, permitindo observar sua evolução — ou estabilidade — ao longo do tempo.

Tabela 31. Classificação de cada porto em cada janela

Porto	Janela 1	Janela 2	Janela 3	Janela 4	Janela 5
Singapura	1	1	1	1	1
Shanghai	2	2	2	1	1
Itaqui	3	3	3	4	4
Hamburgo	4	3	4	3	1
Suape	5	7	8	8	8
Valência	6	6	7	7	5
Sines e do Algarve	7	5	5	5	7
Roterdã	8	8	6	5	6
Santos	9	9	10	9	10
Rio de Janeiro e Itaguaí	10	10	9	10	9
Paranaguá	11	11	11	11	11

Fonte: Elaboração própria.

A análise da colocação dos portos ao longo das janelas temporais revela comportamentos diferenciados em termos de estabilidade, tendência e variação relativa, permitindo uma leitura complementar aos valores médios e às variâncias observadas no modelo *BoD*. De modo geral, observa-se baixa mobilidade no *ranking*, o que corrobora os resultados de reduzida variância observados nos valores do indicador composto, indicando que o desempenho relativo dos portos apresenta caráter predominantemente estrutural ao longo do período analisado.

O Porto de Singapura mantém-se consistentemente na primeira colocação em todas as janelas analisadas, apresentando os maiores valores do indicador composto ao longo de todo o período considerado. Esse comportamento indica elevada estabilidade no desempenho relativo

do porto no conjunto das dimensões consideradas pelo modelo. Resultado semelhante, ainda que com pequenas variações ao longo das janelas, é observado para o Porto de Shanghai, que ocupa posições de destaque nas janelas iniciais e alcança a primeira colocação nas janelas finais, evidenciando melhora relativa em seu posicionamento no ranking ao longo do período analisado.

Entre os portos europeus analisados, como Hamburgo e Roterdã, bem como o porto brasileiro de Itaquí, observa-se elevada estabilidade nas posições superiores do *ranking*, com oscilações relativamente pequenas entre as primeiras colocações ao longo das janelas temporais. Esse comportamento indica que, mesmo diante de variações nos dados originais ao longo do tempo, o desempenho relativo desses portos permanece consistentemente elevado entre os subindicadores utilizados na análise.

Em contraste, os portos de Suape, Valência e Sines e do Algarve apresentam uma tendência de perda gradual de posições ao longo das janelas analisadas, especialmente nas janelas intermediárias. Esse movimento indica redução relativa de desempenho quando comparados aos portos mais bem posicionados no ranking, ainda que sem oscilações abruptas entre os períodos. Tal comportamento é compatível com a aplicação de janelas temporais baseadas em médias móveis, as quais tendem a suavizar variações pontuais e a evidenciar tendências mais persistentes ao longo do tempo.

Por sua vez, os portos de Santos, Rio de Janeiro e Itaguaí e Paranaguá concentram-se sistematicamente nas últimas posições do *ranking*, apresentando variações pouco expressivas ao longo das janelas analisadas. Esse padrão indica desempenho relativo inferior no indicador composto obtido, evidenciando baixa mobilidade nas posições ocupadas ao longo do período.

De forma geral, a reduzida mobilidade no *ranking* intertemporal confirma que a utilização de janelas temporais baseadas em médias móveis favorece a identificação de padrões relativamente estáveis de desempenho ao longo do tempo, em detrimento de variações pontuais entre períodos específicos. Assim, a análise da classificação ao longo das janelas complementa os resultados obtidos a partir dos valores médios e das variâncias do indicador composto, oferecendo uma leitura mais abrangente da dinâmica relativa de desempenho entre os portos analisados.

Entretanto, observa-se que, embora a utilização de janelas temporais permita incorporar a dimensão temporal na análise, os resultados apresentados exibem variações relativamente reduzidas entre os períodos considerados. Tal comportamento decorre do procedimento metodológico adotado para a construção das janelas, baseado em médias móveis, o qual tende a suavizar oscilações pontuais e variações mais abruptas nos valores do indicador composto ao

longo do tempo. Como consequência, esse método privilegia a identificação de padrões mais persistentes de desempenho entre os portos analisados, em detrimento de flutuações conjunturais de curto prazo. Sob essa perspectiva, a análise temporal torna-se particularmente relevante não para capturar variações pontuais entre períodos específicos, mas para verificar a persistência ou alteração do posicionamento relativo dos portos ao longo do intervalo temporal analisado.

De maneira a complementar a análise, o modelo foi também aplicado aos dados considerando todos os períodos simultaneamente, ou seja, sem a utilização de janelas temporais. Tal aplicação é conhecida pelo nome de Meta fronteira. Nesse procedimento, o modelo *DEA-BoD* é estimado utilizando o conjunto completo de observações disponíveis, permitindo a obtenção de um ranking global dos portos ao longo de todo o período analisado. Os resultados dessa aplicação são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32. *Ranking* do Indicador Composto para Meta fronteira

Ranking	Porto	Índice médio
1	Singapura	1,000
2	Shanghai	0,967
3	Hamburgo	0,964
4	Itaqui	0,896
5	Roterdã	0,753
6	Sine e do Algarve	0,690
7	Valência	0,680
8	Suape	0,665
9	Santos	0,287
10	Rio de Janeiro e Itaguaí	0,237
11	Paranaguá	0,189

Fonte: Elaboração própria.

Em síntese, os resultados obtidos nessa aplicação confirmam, em grande medida, os padrões previamente observados na análise baseada em janelas temporais (Tabela 30). Observa-se que as posições relativas dos portos permanecem bastante semelhantes, indicando que o posicionamento dos portos no *ranking* apresenta elevada estabilidade mesmo quando se altera a forma de agregação temporal dos dados. As pequenas diferenças observadas restringem-se principalmente à ordem relativa entre portos com desempenhos próximos, não alterando a interpretação geral dos resultados. Assim, os resultados sugerem que os padrões de desempenho observados no indicador composto apresentam caráter relativamente persistente ao longo do período analisado. Esse resultado reforça a robustez do indicador composto obtido, uma vez

que diferentes estratégias de agregação temporal conduzem a conclusões semelhantes quanto ao posicionamento relativo dos portos analisados.

Vale destacar que distribuição geográfica dos portos analisados reforça parte das diferenças estruturais observadas entre as unidades investigadas. Conforme ilustrado na Figura 12, os portos internacionais encontram-se inseridos em regiões estratégicas para o comércio marítimo global, especialmente em áreas caracterizadas por elevada conectividade logística e maior integração entre diferentes modais de transporte. No contexto europeu, portos como Hamburgo, Roterdã, Sines e do Algarve e Valência encontram-se posicionados em importantes rotas marítimas, favorecendo maior articulação logística e proximidade com centros industriais e consumidores.

Por fim, os portos brasileiros analisados apresentam maior associação ao escoamento de commodities agrícolas, minerais e energéticas, operando sob dinâmica distinta daquela observada em grande parte dos portos internacionais considerados na amostra. Além das diferenças de escala e infraestrutura, observa-se que tais unidades atuam em contexto marcado por limitações logísticas e menor agregação de valor das cargas movimentadas. Nesse sentido, entende-se que a localização geográfica e as características econômicas associadas à função desempenhada pelos portos constituem aspectos relevantes para interpretação dos resultados obtidos, ainda que tais fatores não tenham sido incorporados diretamente

5.3.4 Discussão dos resultados

Considerando que um dos objetivos principais do presente trabalho foi o desenvolvimento de um indicador composto de sustentabilidade aplicado aos portos, capaz de integrar múltiplas dimensões de desempenho e estabelecer um *ranking* comparativo entre instalações portuárias, esta seção dedica-se à discussão dos resultados obtidos a partir da aplicação do método proposto.

Inicialmente, são apresentados e analisados os resultados do indicador composto, bem como os valores médios dos subindicadores que o constituem, de forma a permitir uma interpretação sistêmica do desempenho portuário.

Os indicadores compostos constituem uma ferramenta metodológica relevante para a avaliação de sistemas complexos, como os portos, cujo desempenho não pode ser adequadamente representado por um único indicador isolado. A agregação de múltiplos subindicadores permite sintetizar diferentes dimensões — econômica, ambiental e social — em uma métrica integrada, favorecendo análises comparativas mais abrangentes.

Para esse propósito, apresenta-se a Tabela 33, contendo os três portos mais bem posicionados no *ranking* de sustentabilidade, acompanhados de seus respectivos valores médios dos subindicadores considerados no modelo. Essa análise permite avaliar não apenas a posição final de cada porto no *ranking*, mas também a forma como os diferentes subindicadores contribuem para o desempenho observado.

Observa-se que os portos de Singapura, Shanghai e Hamburgo apresentam perfis de desempenho distintos entre si quando se analisam os subindicadores considerados.

O Porto de Singapura destaca-se no *ranking* obtido, apresentando os maiores valores do indicador composto ao longo do período analisado. No entanto, a análise detalhada dos subindicadores mostra que esse porto não apresenta valores superiores em todas as dimensões consideradas. Embora apresente valores elevados em indicadores relacionados à movimentação de carga e receita operacional, seu desempenho relativo nos indicadores ambientais não se destaca de forma uniforme quando comparado aos demais portos analisados. Ainda assim, a combinação dos diferentes subindicadores considerados no modelo contribui para que o porto apresente posição de destaque na posição relativa dos portos.

Tabela 33. Subindicadores médios dos 3 primeiros portos no ranking de sustentabilidade

Portos	nº de funcionárias	nº de funcionários	Geração de Resíduos em (ton)	Consumo de Energia em (KWH)	Consumo de Água em M³	Volume de carga movim. (ton)	Receit total bruta em US\$	Geração de Gases de Efeito Estufa (GEE)	Taxa de freq acid. trabalho
Singapura	232	434	488	13.888.939	27.135.500	608.447.500	215.966.714	3.763	0,633
Shanghai	2.465	11.934	13.452	472.468.750	4.380.000.000	546.000.000	5.220.734.076	508.195	0,993
Hamburgo	477	1.526	8.233	55.956.471	60.914.000	127.850.000	1.591.527.410	6.375	0,029
Média	1.058	4.631	7.391	180.771.387	1.489.349.833	427.432.500	2.342.742.733	172.778	0,552

Fonte: Elaboração própria

De maneira semelhante, o Porto de Shanghai apresenta valores elevados em subindicadores associados à movimentação de carga e à geração de receita operacional, refletindo a elevada escala de suas operações portuárias no conjunto da amostra analisada. Entretanto, assim como observado no caso de Singapura, esse desempenho não se traduz necessariamente em valores superiores em todos os indicadores ambientais considerados no modelo. Observa-se que, embora o porto apresente destaque em determinados subindicadores, os resultados não indicam desempenho igualmente elevado em todas as dimensões analisadas. Esse resultado evidencia que a posição elevada do porto na classificação geral decorre da combinação entre diferentes subindicadores, e não da maximização isolada de uma única dimensão de desempenho.

O Porto de Hamburgo, por sua vez, apresenta um perfil relativamente mais equilibrado entre os subindicadores considerados no indicador composto. Embora apresente valores inferiores nos indicadores associados à escala de movimentação quando comparado aos grandes portos asiáticos da amostra, seus resultados mostram distribuição mais homogênea entre as dimensões econômica, ambiental e social analisadas. Essa distribuição relativamente equilibrada entre os subindicadores contribui para sua posição entre os portos melhor classificados na análise realizada.

A análise dos valores médios dos subindicadores revela que nenhum dos portos analisados apresenta desempenho superior em todas as dimensões simultaneamente. Esse resultado reforça a relevância da abordagem baseada em indicadores compostos, uma vez que o posicionamento final dos portos na classificação depende da combinação entre diferentes dimensões de desempenho representadas pelos subindicadores utilizados no modelo.

O porto de Hamburgo também apresenta a menor taxa de frequência de acidentes entre os portos analisados, indicando desempenho relativamente superior na dimensão de segurança do trabalho (social).

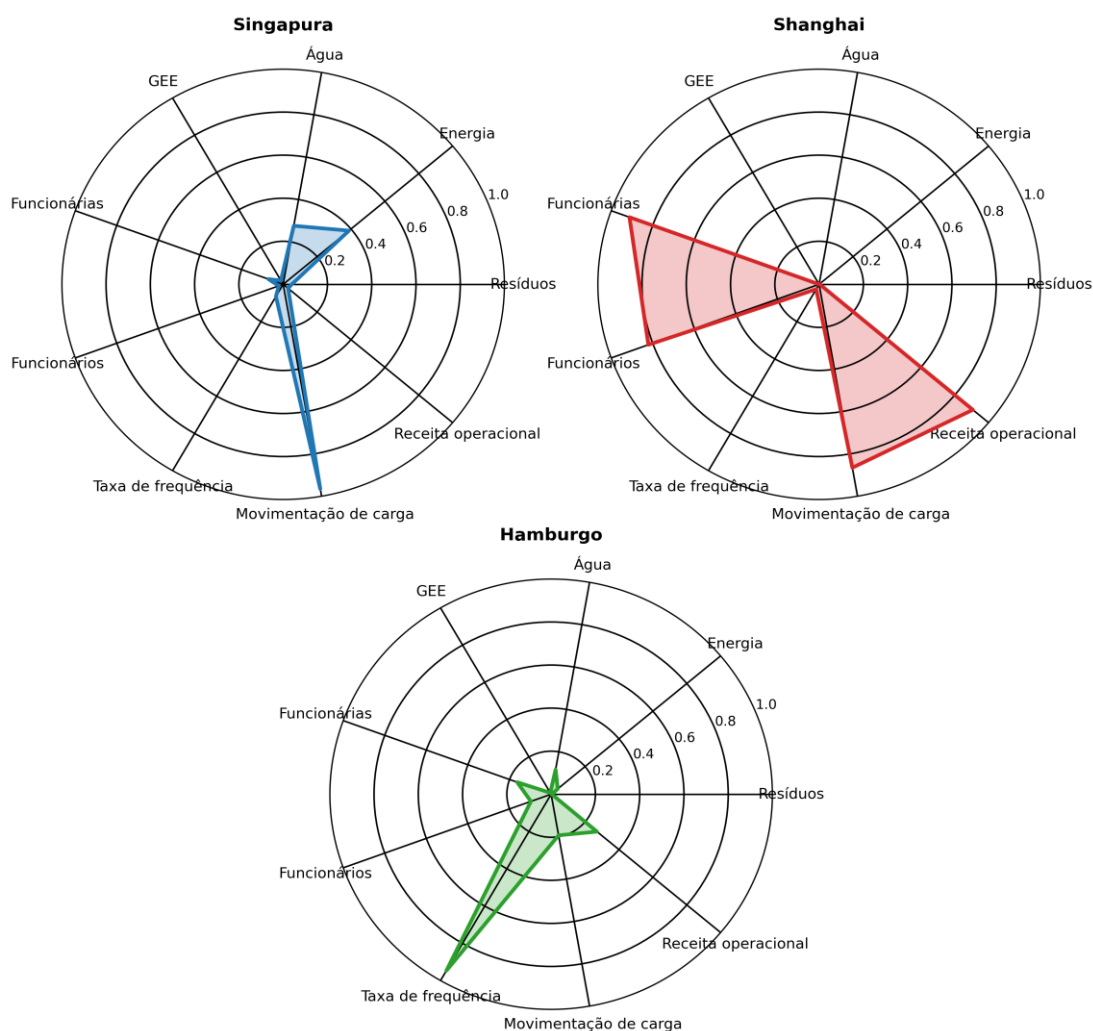
De forma geral, os resultados corroboram a premissa central da literatura sobre indicadores compostos aplicada à avaliação de sustentabilidade portuária: o desempenho global resulta da interação entre múltiplos fatores econômicos, ambientais e sociais, e não da maximização isolada de um único indicador. Dessa forma, a utilização de indicadores compostos permite capturar de forma mais abrangente a natureza multidimensional do desempenho portuário.

A Figura 18 apresenta os subindicadores médios de desempenho dos três portos mais bem colocados no *ranking* de eficiência e sustentabilidade analisado neste estudo. Quanto mais próximo da borda do gráfico radar, maior é o desempenho relativo do porto em cada

subindicador considerado. Todos os valores foram previamente normalizados, de modo a permitir a comparação conjunta entre as diferentes dimensões analisadas, incluindo aspectos ambientais, sociais, econômicos e de segurança operacional.

Os gráficos radar apresentados a seguir representam os subindicadores previamente normalizados utilizados na construção do indicador composto. Dessa forma, as projeções observadas em cada eixo correspondem ao desempenho relativo dos portos dentro do conjunto analisado, e não aos valores absolutos das variáveis originais.

Figura 15. Subindicadores dos portos com maiores valores para o Indicador Composto



Fonte: Elaboração própria.

As variáveis associadas a impactos negativos — tais como consumo de água, consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa (GEE), geração de resíduos e taxa de frequência

de acidentes — foram tratadas como variáveis indesejáveis e, portanto, submetidas à sua inversa e posterior normalização, considerando sua natureza de “quanto menor, melhor”. Assim, valores mais elevados nesses indicadores passam a representar melhores resultados comparativos nesses aspectos, assegurando coerência interpretativa na leitura dos gráficos.

A leitura do gráfico do Porto de Singapura, primeiro colocado na classificação geral, revela um perfil fortemente orientado aos componentes econômicos e operacionais, com destaque nos indicadores associados à movimentação de cargas. Esse padrão reflete a elevada escala logística observada para o porto dentro do conjunto analisado.

No que se refere ao eixo ambiental, considerando que os indicadores foram tratados como variáveis indesejáveis e submetidos à inversa e posterior normalização, observa-se resultado ambiental intermediário, sem projeções extremas positivas ou negativas. Tal comportamento indica que, embora o porto não apresente liderança absoluta nesse aspecto, também não evidencia fragilidades acentuadas quando comparado aos demais portos analisados. Visualmente, o polígono associado ao porto apresenta maior expansão nos eixos econômicos e retração moderada nos indicadores ambientais, evidenciando uma relação de compensação entre escala operacional e resultado ambiental comparativo.

No campo social e de segurança operacional, o gráfico sugere comportamento relativamente consistente, ainda que sem projeções dominantes entre as variáveis consideradas. Em conjunto, o formato do gráfico indica que a posição de destaque de Singapura decorre não da maximização isolada de um único indicador, mas da combinação entre forte desempenho operacional e resultados relativamente estáveis nos demais aspectos analisados.

Já o porto de Shanghai apresenta forte projeção nos indicadores associados ao eixo econômico, especialmente aqueles relacionados à movimentação de carga e à geração de receita. Observa-se também projeção elevada nas variáveis relacionadas ao emprego, refletindo maior intensidade de mão de obra quando comparado aos demais portos da amostra.

Entretanto, a leitura dos eixos ambientais invertidos revela desempenho ambiental relativo inferior quando comparado aos demais portos analisados. Essa assimetria manifesta-se visualmente por retração mais acentuada do polígono nos eixos ambientais, contrastando com a expansão observada nos subindicadores econômicos e operacionais. O formato do gráfico sugere, portanto, a existência de maior desequilíbrio entre as dimensões consideradas, indicando que o elevado desempenho econômico exerce papel relevante na composição do indicador composto.

No que se refere à segurança operacional, o comportamento observado também não apresenta projeção elevada quando comparado aos demais portos analisados. Assim, a

interpretação do gráfico indica que a posição de destaque de Shanghai na classificação resulta principalmente da contribuição dos indicadores econômicos e operacionais no índice final, compensando resultados relativamente menos expressivos em outros aspectos.

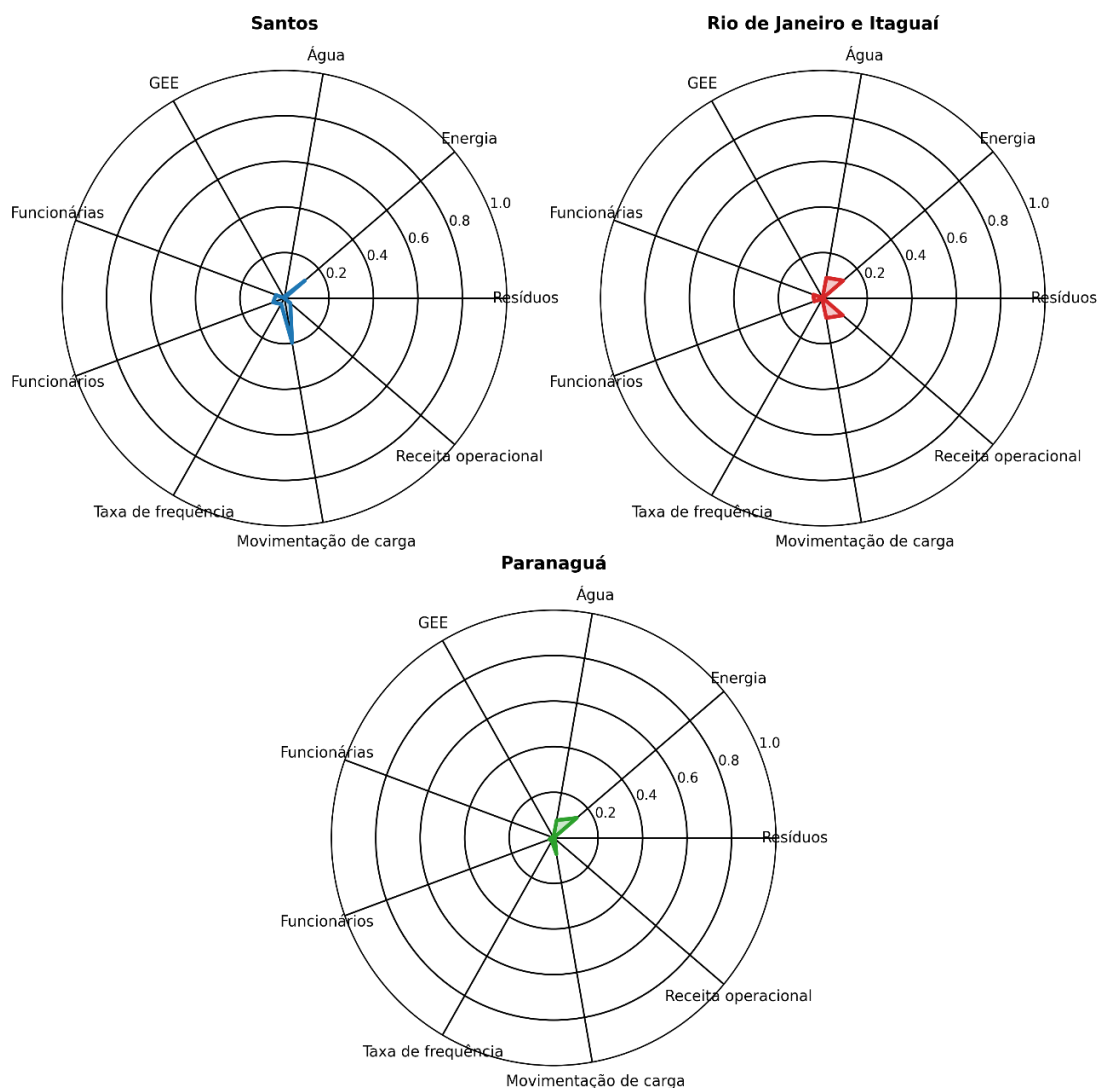
No caso do porto de Hamburgo, terceiro colocado na classificação geral, o gráfico apresenta configuração mais equilibrada entre as variáveis consideradas. Diferentemente dos grandes portos asiáticos da amostra, Hamburgo apresenta menor projeção nos indicadores associados à escala de movimentação de cargas e geração de receita. Entretanto, observa-se distribuição mais homogênea entre os aspectos econômico, ambiental, social e de segurança operacional.

No bloco ambiental, considerando a inversão das variáveis indesejáveis, o polígono apresenta projeções relativamente mais elevadas quando comparadas às observadas em Shanghai, indicando resultado ambiental comparativamente mais favorável dentro do conjunto analisado. Esse comportamento contribui para um perfil geral mais equilibrado entre os diferentes indicadores considerados.

Do ponto de vista econômico, embora o porto não apresente a mesma magnitude observada nos grandes hubs asiáticos, o comportamento comparativo é suficiente para evitar retrações acentuadas no gráfico. Nos campos social e de segurança operacional, o comportamento também se mostra consistente, contribuindo para uma distribuição relativamente homogênea entre os indicadores considerados. Dessa forma, a posição de Hamburgo na classificação do índice sintético resulta da regularidade observada entre os diferentes aspectos considerados no modelo.

A Figura 19 apresenta os indicadores dos três portos posicionados nas últimas colocações da classificação geral. Assim como na Figura 17, quanto mais próximo da borda do gráfico radar, maior é o resultado comparativo do porto em cada variável analisada. Todos os valores foram previamente normalizados, permitindo a comparação direta entre os diferentes aspectos considerados.

Figura 16. Subindicadores dos portos com menores valores para o Indicador



Fonte: Elaboração própria.

As variáveis associadas a impactos negativos — tais como consumo de água, consumo de energia, emissões de gases de efeito estufa (GEE), geração de resíduos e taxa de frequência de acidentes — foram tratadas como variáveis indesejáveis e submetidas à sua inversa antes do processo de normalização, considerando sua natureza de “quanto menor, melhor”.

O gráfico radar do porto de Santos evidencia um perfil marcado por maior assimetria entre os indicadores considerados. Observa-se retração mais acentuada nos eixos ambientais, enquanto os indicadores sociais e operacionais apresentam projeções relativamente modestas. Embora o porto apresente projeção relativamente mais elevada nos eixos associados à movimentação de cargas, a diferença observada entre os diferentes aspectos analisados indica

menor equilíbrio no conjunto das variáveis, o que contribui para sua posição nas últimas colocações da classificação geral.

O complexo portuário do Rio de Janeiro e Itaguaí apresenta configuração gráfica caracterizada por comportamento heterogêneo entre as variáveis analisadas. Observa-se resultado intermediário em alguns indicadores operacionais e retração mais evidente nos eixos ambientais e de segurança operacional. Mesmo considerando a inversão e normalização das variáveis indesejáveis, o polígono associado ao porto mantém projeções relativamente limitadas nesses eixos, contribuindo para seu posicionamento desfavorável na classificação geral.

O gráfico do porto de Paranaguá, último colocado na classificação, apresenta configuração relativamente mais equilibrada entre os aspectos ambiental e social quando comparado aos demais portos brasileiros desse grupo. Entretanto, observa-se retração mais acentuada nos indicadores econômicos, especialmente nos eixos associados à movimentação de carga e geração de receita. Esse padrão indica que, embora algumas variáveis apresentem resultado ambiental relativamente mais favorável, os resultados observados nos indicadores econômicos reduzem o desempenho global do porto no índice agregado.

Assim, os portos brasileiros posicionados nas últimas colocações da classificação — Santos, Rio de Janeiro e Itaguaí e Paranaguá — apresentam maior assimetria entre as variáveis consideradas quando comparados aos portos internacionais analisados, evidenciando diferenças mais pronunciadas entre os componentes econômico, ambiental e social no conjunto da amostra.

Outro aspecto relevante para a interpretação dos resultados refere-se às diferenças estruturais entre os portos internacionais analisados e os portos públicos brasileiros. Enquanto parte dos portos internacionais apresenta forte participação na movimentação de cargas containerizadas e mercadorias de maior valor agregado, muitos portos nacionais permanecem fortemente associados ao escoamento de commodities e grãos, refletindo características da inserção brasileira no comércio internacional.

Nesse sentido, entende-se que a competitividade dos portos nacionais não deve ser analisada exclusivamente pela aproximação aos modelos operacionais dos grandes hubs internacionais, mas também pela capacidade de responder de forma eficiente às especificidades da matriz logística brasileira. Assim, investimentos em modernização da infraestrutura, integração intermodal, digitalização das operações e maior agregação de valor aos serviços portuários mostram-se relevantes para ampliar a competitividade do setor nacional.

Na Figura 20, é apresentada uma comparação entre o Porto de Singapura, que apresenta o maior valor para o índice agregado, e o Porto de Itaquí, que corresponde ao porto brasileiro

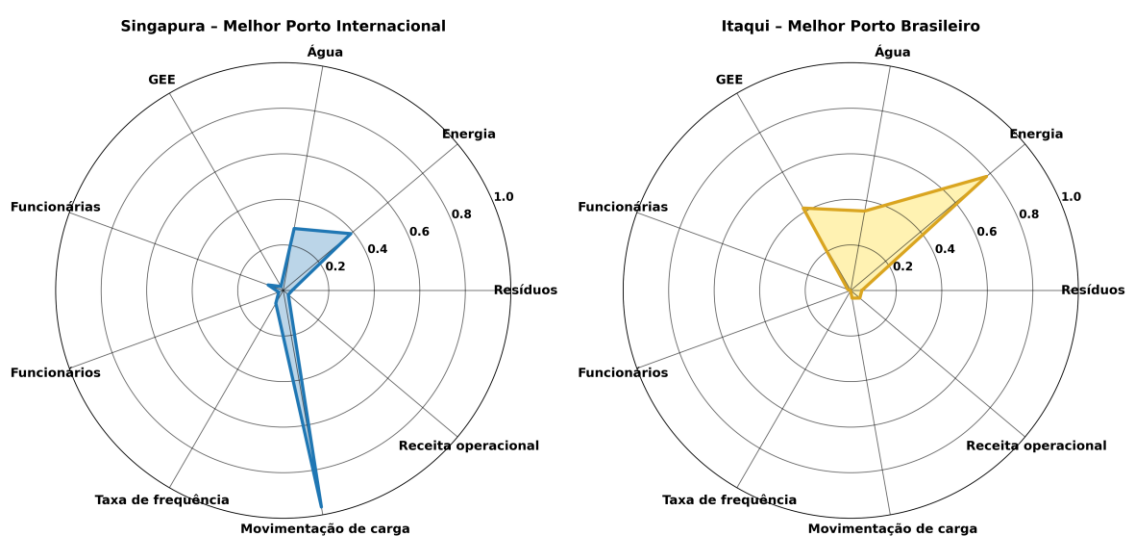
mais bem posicionado na classificação geral. A representação gráfica permite visualizar simultaneamente o comportamento comparativo das variáveis associadas aos aspectos ambiental, social, econômico e de segurança operacional.

Observa-se que Singapura apresenta maior projeção nos indicadores associados à escala operacional, particularmente no eixo relacionado à movimentação de cargas, enquanto os demais indicadores apresentam valores relativamente moderados. Esse padrão indica que o desempenho global do porto no índice agregado está fortemente associado à sua elevada capacidade logística.

O Porto de Itaquí, por sua vez, apresenta comportamento distinto, com projeções relativamente mais elevadas em alguns indicadores ambientais e operacionais, porém com retração mais evidente nos indicadores associados à movimentação de cargas e geração de receita. Esse padrão evidencia diferenças estruturais entre os portos analisados, indicando contribuições distintas das variáveis consideradas no modelo.

O formato dos polígonos indica que o posicionamento mais elevado de Singapura no índice agregado resulta da combinação entre forte projeção nos indicadores associados à escala operacional e comportamento relativamente consistente nos demais aspectos analisados. Já o Porto de Itaquí apresenta perfil mais concentrado em determinadas variáveis, refletindo diferenças na contribuição relativa dos aspectos considerados no modelo.

Figura 20. Comparação entre os portos de Singapura e Itaquí



Fonte: Elaboração própria.

Um ponto particularmente significativo evidenciado pelos resultados desta pesquisa refere-se à distinção entre eficiência técnica e desempenho sustentável. Embora ambas as perspectivas estejam relacionadas ao desempenho portuário, os achados indicam que não devem ser interpretadas como medidas equivalentes ou necessariamente convergentes. A eficiência técnica, mensurada por meio da Análise Envoltória de Dados (DEA), está associada à capacidade relativa dos portos em converter insumos em produtos, considerando a melhor utilização possível dos recursos disponíveis. Já o indicador composto de sustentabilidade busca ampliar essa análise ao incorporar, de forma integrada, aspectos econômicos, ambientais e sociais.

Cabe destacar que o indicador composto desenvolvido neste estudo não deve ser interpretado como uma medida absoluta de sustentabilidade portuária, mas sim como um índice comparativo que permite avaliar o desempenho relativo dos portos analisados a partir da combinação das variáveis econômicas, ambientais e sociais consideradas no modelo.

De forma geral, os resultados reforçam que a sustentabilidade portuária deve ser compreendida como um fenômeno multidimensional, no qual o desempenho global resulta da interação entre fatores econômicos, ambientais, sociais e de segurança operacional. Dessa forma, portos bem posicionados na classificação tendem a apresentar maior equilíbrio relativo entre as variáveis consideradas, enquanto posições inferiores refletem maior assimetria entre os diferentes componentes representados no indicador composto.

Esse comportamento é consistente com a lógica dos indicadores compostos baseados na abordagem *Benefit of the Doubt* (BoD), na qual o posicionamento final resulta da interação entre múltiplas variáveis e não da maximização isolada de um único indicador. Assim, diferentes combinações de desempenho entre os aspectos econômico, ambiental e social podem conduzir a posições semelhantes no ranking, desde que o conjunto das variáveis consideradas apresente contribuição positiva para a composição do índice agregado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho relativo de um conjunto de portos internacionais e públicos brasileiros sob a ótica da sustentabilidade, por meio da aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), considerando variáveis associadas às dimensões econômica, ambiental e social no período de 2017 a 2024. Adicionalmente, buscou-se construir um indicador composto de sustentabilidade portuária baseado na abordagem Benefit-of-the-Doubt (BoD), capaz de integrar essas diferentes variáveis em uma métrica sintética de avaliação, permitindo a mensuração comparativa do desempenho dos portos e a construção de um ranking consistente. Para tanto, a análise incorporou a utilização de janelas temporais e do modelo de metafronteira, possibilitando a avaliação conjunta de unidades com diferentes contextos operacionais.

Nesse contexto, buscou-se não apenas estimar o desempenho relativo dessas unidades, mas também avançar na integração das dimensões econômica, ambiental e social, considerando que, na literatura, essas dimensões ainda são, em grande parte, tratadas de forma isolada.

A aplicação do modelo proposto mostrou-se adequada para captar diferenças relevantes entre os portos analisados, preservando, ao mesmo tempo, as especificidades de cada unidade. A integração entre DEA e BoD revelou-se particularmente consistente ao permitir a definição endógena dos pesos, reduzindo a necessidade de atribuições arbitrárias e proporcionando uma avaliação mais aderente às características operacionais de cada porto.

A utilização da DEA possibilitou verificar a eficiência relativa a partir da relação entre múltiplos insumos e produtos, tendo como referência as melhores práticas observadas entre as unidades analisadas. A adoção do modelo com retornos variáveis de escala mostrou-se pertinente, sobretudo diante das diferenças de porte e capacidade operacional entre os portos, permitindo uma avaliação mais realista das condições de operação.

A incorporação de janelas temporais permitiu incluir a dimensão temporal na análise, reduzindo a influência de variações pontuais. Verificou-se baixa variabilidade entre as janelas, indicando que o desempenho relativo dos portos apresenta estabilidade ao longo do período analisado.

Outro ponto que merece destaque refere-se ao tratamento das variáveis ambientais. Considerando que indicadores como emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia, consumo de água e geração de resíduos seguem a lógica de “quanto menor, melhor”, optou-se por transformar essas variáveis de forma a inverter sua lógica original. Esse ajuste permitiu

compatibilizar tais variáveis com a lógica do DEA, em que valores mais elevados estão associados a melhores resultados.

Observam-se diferenças expressivas nos níveis de eficiência técnica entre os portos analisados. No contexto internacional, o porto de Hamburgo destaca-se com a maior eficiência média da amostra, atingindo aproximadamente 96,49%, operando de forma próxima à fronteira eficiente. Em sentido oposto, o porto de Singapura apresenta a menor eficiência média, com cerca de 31,59%, indicando maior distância em relação às melhores práticas observadas.

Quando considerados sob a ótica do indicador composto de sustentabilidade, verifica-se uma alteração significativa nesse ordenamento. Portos como Singapura, Shanghai e Hamburgo passam a ocupar as primeiras posições no ranking, refletindo um desempenho mais equilibrado entre as dimensões econômica, ambiental e social. O caso de Singapura é particularmente ilustrativo, ao ocupar a primeira posição no índice composto, mesmo apresentando o menor nível de eficiência técnica.

Esse comportamento evidencia que as abordagens utilizadas — DEA e DEA-Benefit-of-the-Doubt (BoD) — são complementares, porém captam dimensões distintas do desempenho portuário. Enquanto a DEA avalia a eficiência técnica com base na relação entre insumos e produtos, o indicador composto incorpora múltiplas dimensões e admite diferentes combinações de desempenho entre os indicadores considerados.

A partir dessa análise, identifica-se um dos principais achados do estudo: a dissociação entre eficiência técnica e desempenho no indicador composto. Verifica-se que portos mais eficientes no modelo DEA não são, necessariamente, aqueles que ocupam as primeiras posições no índice de sustentabilidade. O porto de Hamburgo, por exemplo, apresenta a maior eficiência média da amostra, mas ocupa a terceira posição no indicador composto. Em sentido oposto, Singapura posiciona-se em primeiro lugar no índice, embora apresente a menor eficiência média.

Outro aspecto relevante refere-se à estabilidade observada ao longo do período analisado. Tanto a aplicação por janelas quanto a análise de metafronteira apresentaram posições relativas bastante semelhantes entre os portos, com baixa variabilidade dos índices, indicando consistência temporal dos padrões identificados.

No que se refere às contribuições, este trabalho propõe uma abordagem integrada para a avaliação da sustentabilidade portuária ao combinar a Análise Envoltória de Dados (DEA) com a abordagem Benefit-of-the-Doubt (BoD), possibilitando a construção de um indicador composto capaz de incorporar múltiplas dimensões do desempenho. Dessa forma, oferece uma

contribuição à literatura ao reduzir a dependência de ponderações arbitrárias e permitir uma análise mais aderente às especificidades das unidades avaliadas.

Em termos práticos, os resultados obtidos também permitem algumas reflexões voltadas à formulação de políticas públicas para o setor portuário. Destaca-se, nesse sentido, a importância da ampliação da padronização e transparência dos indicadores de sustentabilidade divulgados pelos portos, sobretudo aqueles relacionados às dimensões ambiental e social, de modo a fortalecer a comparabilidade entre unidades e subsidiar decisões mais aderentes às especificidades do setor. Além disso, iniciativas voltadas à modernização da infraestrutura, integração intermodal, eficiência energética e digitalização das operações mostram-se relevantes para ampliar a competitividade dos portos nacionais sob uma perspectiva integrada de sustentabilidade.

Do ponto de vista da gestão pública, os resultados obtidos sugerem que indicadores de sustentabilidade podem complementar os critérios tradicionalmente utilizados na avaliação do desempenho portuário. Nesse sentido, o indicador composto proposto nesta pesquisa pode contribuir para o acompanhamento da evolução do desempenho das unidades portuárias ao longo do tempo, auxiliando gestores públicos na definição de metas e prioridades relacionadas às dimensões econômica, ambiental e social.

Embora não tenha sido desenvolvido com a finalidade de substituir mecanismos regulatórios ou contratuais já existentes, o indicador apresenta potencial para subsidiar futuras discussões sobre critérios de sustentabilidade em processos de arrendamento, concessão e monitoramento de desempenho do setor portuário.

Apesar dos avanços, algumas limitações devem ser consideradas. A principal delas está relacionada à dificuldade de obtenção de dados, especialmente no caso dos portos internacionais. Observa-se a ausência de padronização na forma como as informações são mensuradas e divulgadas, o que compromete a comparabilidade dos dados. Essa limitação também se verifica em portos nacionais, restringindo o número de unidades analisadas. Soma-se a isso o fato de que muitos portos passaram a divulgar relatórios de sustentabilidade mais completos apenas a partir de 2016.

Adicionalmente, destaca-se a complexidade inerente ao tratamento de variáveis de diferentes naturezas. A integração de indicadores econômicos, ambientais, sociais e operacionais exige procedimentos de ajuste e normalização que, embora necessários, podem influenciar os valores obtidos.

Nesse contexto, abre-se espaço para o desenvolvimento de pesquisas futuras, especialmente no que se refere à ampliação da base de dados, tanto em termos do número de

portos analisados quanto da diversidade de variáveis consideradas. Estudos futuros podem avançar na ampliação da base de dados, na incorporação de novos indicadores sociais e ambientais, bem como na aplicação da abordagem proposta a diferentes conjuntos de portos e contextos operacionais.

Por fim, reforça-se que a sustentabilidade portuária não pode ser analisada a partir de uma única dimensão. Diferentes aspectos do desempenho podem evoluir de maneira distinta ao longo do tempo, o que evidencia a necessidade de abordagens capazes de captar essa complexidade. Nesse sentido, a utilização de um índice composto baseado em DEA–BoD mostra-se uma alternativa consistente para a análise do desempenho portuário sob uma perspectiva integrada.

REFERÊNCIAS

- ACCIARO, M.; VANELSLANDER, T.; SYS, C.; FERRARI, C.; ROUMBOUTSOS, A.; GIULIANO, G.; KAPROS, S. **Environmental sustainability in seaports: a framework for successful innovation**. *Maritime Policy & Management*, v. 41, n. 5, p. 480–500, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088839.2014.932926>.
- ADLER, N.; GOLANY, B. **Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis**. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 35, n. 5, p. 413–426, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00052-5).
- ADLER, N.; YAZHEMSKY, E. **Improving discrimination in data envelopment analysis: PCA-DEA or variable reduction**. *European Journal of Operational Research*, v. 202, n. 1, p. 273–284, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.03.050>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#>. Acesso em: jul. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **Brasil explora metade das vias navegáveis com potencial de transporte de cargas e passageiros**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/antaq/pt-br/noticias/2025/brasil-explora-metade-das-vias-navegaveis-com-potenciais-de-transporte-de-cargas-e-passageiros>. Acesso em: 20 fev. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **Estatísticas aquaviárias: movimentação portuária**. Brasília, 2026. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/movport.html#pt>. Acesso em: 8 mar. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Resolução nº 5.990/2022**. Disponível em: https://anttleis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=0005990&sgl_tipo=RES&sgl_orgao=DG/ANTT/MI&vlr_ano=2022&seq_ato=000&cod_modo=161&cod_menu=7796. Acesso em: 6 out. 2023.
- ALAMOUSH, A. S.; BALLINI, F.; ÖLÇER, A. I. **Revisiting port sustainability as a foundation for the implementation of the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs)**. *Journal of Shipping and Trade*, v. 6, n. 19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-021-00101-6>.
- AMSTEDMAXION. **Vagão Hopper HPE: boletim técnico**. São Paulo, 2017. Disponível em: https://www.amstedmaxion.com.br/wp-content/uploads/2017/10/GBM_013_laminas_hpe-1.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.
- ANDRADE, B.; BIAZON, T. **O transporte marítimo e o uso sustentável do oceano**. *Jornal da USP*, 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/artigos/o-transporte-maritimo-e-o-uso-sustentavel-do-oceano/>. Acesso em: jul. 2023.

ANGULO MEZA, L.; BIONDI NETO, L.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; GOMES, E. G. **ISYDS: Integrated System for Decision Support (SIAD – Sistema Integrado de Apoio à Decisão)**: a software package for data envelopment analysis model. *Pesquisa Operacional*, Niterói, v. 25, n. 3, p. 493–503, 2005.

ASHRAFI, M.; ACCIARO, M.; WALKER, T. R.; MAGNAN, G. M.; ADAMS, M. **Corporate sustainability in Canadian and US maritime ports**. *Journal of Cleaner Production*, v. 220, p. 386–397, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.098>.

ASSOCIAÇÃO DE TERMINAIS PORTUÁRIOS PRIVADOS – ATP. **Relatório 1º semestre de 2019**. Disponível em: <https://www.portosprivados.org.br/publicacoes/relatorios#>. Acesso em: 28 nov. 2023.

BANKER, R. D. **Hypothesis tests using data envelopment analysis**. *Journal of Productivity Analysis*, v. 7, n. 2–3, p. 139–159, 1996.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis**. *Management Science*, v. 30, n. 9, p. 1078–1092, 1984.

BARBOSA, F. C.; FUCHIGAMI, H. Y. **Análise envoltória de dados: teorias e aplicações**. Itumbiara: ULBRA, 2018.

BARROS, C. P. **The measurement of efficiency of Portuguese seaport authorities with DEA**. *International Journal of Transport Economics*, v. 30, p. 335–354, 2003.

BARROS, C. P.; ATHANASSIOU, M. **Efficiency in European seaports with DEA: evidence from Greece and Portugal**. *Maritime Economics & Logistics*, v. 6, p. 122–140, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100099>.

BELLONI, J. A. **Uma metodologia de avaliação da eficiência produtiva de universidades federais brasileiras**. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

BOEING. **Boeing 747-8F freighter (startup/airport planning)**. Chicago, 2024. Disponível em: https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about_bca/startup/pdf/freighters/747-8F-freighter.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

BOGETOFT, P.; OTTO, L. **Benchmarking with DEA, SFA, and R**. New York: Springer, 2011.

BORGIO FILHO, M. **Elementos de engenharia portuária**. Vitória: Flor & Cultura, 2008.

BOOKBINDER, J. H.; TAN, C. S. **Comparison of Asian and European logistics systems**. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 33, n. 1, p. 36–58, 2003.

BOTELHO, D. **Novo cenário de oferta de óleo bunker no Brasil**. BIP - Oil & Gas, 29 ago. 2022. Disponível em: <https://bipbrasil.com.br/novo-cenario-de-oferta-de-oleo-bunker-no-brasil/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

BPA BUSAN PORT AUTHORITY. **Busan Port: the global hub port that connects the world**. 2023. Disponível em: <https://www.busanpa.com/eng/Board.do?mCode=MN0053>. Acesso em: 29 dez. 2023.

BRASIL. **Lei nº 10.893, de 13 de julho de 2004**. Dispõe sobre o adicional ao frete para a renovação da Marinha Mercante – AFRMM e o Fundo da Marinha Mercante – FMM, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 jul. 2004. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.893.htm. Acesso em: 23 nov. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.815, de 5 de junho de 2013**. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários. Brasília, DF: Presidência da República, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/orgaos/seppi/centrais-de-conteudo/documentos/112815.pdf/view>. Acesso em: 29 fev. 2024.

BRASIL. **Ministério da Economia**. Exportações gerais. Comex Stat. Base de dados. Brasília, 2018-2021. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 25 nov. 2023.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia**. Estudos da Resolução CNPE nº 18/2019: Comitê de Avaliação do Abastecimento de Combustíveis Aquaviários. Brasília, 2019. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36220/895380/Relatorio+Final+Res+CNPE+18_2019+_Bunker.pdf/d9388b9b-8b0a-753f-5fa2-cd42b18fbf9e. Acesso em: 26 fev. 2024.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços**. Comex Stat: estatísticas de comércio exterior. Brasília, DF: MDIC, 2026. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 13 fev. 2026.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços**. Comex Stat: estatísticas de comércio exterior do Brasil. Brasília, DF: MDIC, 2026. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br>. Acesso em: 20 fev. 2026.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços**. Resultados da balança comercial brasileira de 2022. Brasília: MDIC, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/noticias/2023/janeiro/Balanca2022.pdf/view>. Acesso em: 29 nov. 2023.

BRASIL. **Ministério das Relações Exteriores**. Como exportar Singapura: guia 2023. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/empresas-e-negocios/pt-br/invest-export-brasil/exportar/conheca-os-mercados/como_exportar_privado/como-exportar.pdf/GuiaComoExportarSingapura2023.pdf. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços**. COMEX STAT: sistema de estatísticas do comércio exterior. Brasília, 2026. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 22 fev. 2026.

BRASIL. **Ministério dos Transportes**. Investimentos e inversões financeiras – série histórica. Brasília, 2025. Disponível em: <https://dados.transportes.gov.br/dataset/investimentos-inversoes-financeiras-serie-historica>. Acesso em: 22 fev. 2026.

BRASIL. **Ministério dos Transportes**. Transporte aquaviário. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte_aquaviario-antigo/sistema-portuario. Acesso em: 25 jul. 2023.

BRASIL. **Portos e aeroportos**. Sistema portuário nacional. [S.l.], 31 jul. 2020. Atualizado em: 8 jul. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aquaviario/sistema-portuario>. Acesso em: 14 out. 2023.

BRASIL. **Resolução nº 5.990, de 20 de setembro de 2022**. Institui o Registro Nacional do Agente Transportador Ferroviário de Cargas e regulamenta a prestação do serviço de transporte ferroviário de cargas desvinculado da exploração de infraestrutura por Agente Transportador Ferroviário – ATF. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed. 180, p. 137, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-5.990-de-20-de-setembro-de-2022-430748123>. Acesso em: 6 out. 2023.

BRUNO, M. **DP World moves almost 80 million TEU in 2022**. Port Technology International's, London, fev. 2023. Disponível em: <https://www.porttechnology.org/news/dp-world-comes-moves-almost-80-million-teu-in-2022/>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BUENO, S. **Entenda mais sobre os navios RO-RO**. Fazcomex, 2023. Disponível em: <https://www.fazcomex.com.br/comex/navios-ro-ro/>. Acesso em: 29 dez. 2023.

BUSTAMANTE, J. C. **Capacidade dos modos de transporte**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1999.

CALDAS, S. T. **Portos do Brasil: história passa pelo mar**. [S.l.]: Horizonte, 2013.

CASA NOVA, S. P. C. **Utilização da análise por envoltória de dados (DEA) na análise das demonstrações contábeis**. 2002. 317 f. Tese (Doutorado em Ciências Contábeis) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CASTELLANO, R.; FERRETTI, M.; MUSELLA, G.; RISITANO, M. **Evaluating the economic and environmental efficiency of ports: evidence from Italy**. Journal of Cleaner Production, v. 271, p. 122560, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122560>.

CGTN. **Busy Ningbo Zhoushan Port shows vitality of China's foreign trade**. 2023. Disponível em: <https://news.cgtn.com/news/2023-10-25/Busy-Ningbo-Zhoushan-Port-shows-vitality-of-China-s-foreign-trade-1ocaI3otPFfe/index.html>. Acesso em: 25 dez. 2023.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; GOLANY, B.; SEIFORD, L.; STUTZ, J. **Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions**. Journal of Econometrics, v. 30, p. 91–107, 1985.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. **Measuring the efficiency of decision making units**. European Journal of Operational Research, v. 2, n. 6, p. 429–444, 1978.

CHERCHYE, L.; MOESEN, W.; ROGGE, N.; VAN PUYENBROECK, T. **An introduction to “benefit of the doubt” composite indicators**. Social Indicators Research, v. 82, n. 1, p. 111–145, 2007.

CHINA DAILY. **Charming Qingdao**. Qingdao Port releases 2022 report. Qingdao, 3 mar. 2023. Disponível em: http://qingdao.chinadaily.com.cn/2023-03/30/c_874503.htm. Acesso em: 2 jan. 2024.

CHINA tem 7 entre os 10 portos mais movimentados do mundo; brasileiro está em 40°. **Estadão**, 8 jan. 2024. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/economia/ranking-portos-containers-mais-movimentados-china-porto-de-santos-nprei/>. Acesso em: 4 mar. 2024.

CODEBA. **Companhia das Docas do Estado da Bahia – Autoridade Portuária**. 2023. Disponível em: <https://www.codeba.gov.br/eficiente/sites/portalcodedba/pt-br/site.php?secao=sistemaportuariobrasileiro>. Acesso em: 25 jul. 2023.

COELLI, T.; ESTACHE, A.; PERELMAN, S.; TRUJILLO, L. **A primer on efficiency measurement for utilities and transport regulators**. Washington, D.C.: The World Bank, 2003.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Aspectos gerais da navegação interior no Brasil**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://cnt.org.br/aspectos-gerais-navegacao-brasil>. Acesso em: 5 dez. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Anuário CNT do transporte: estatísticas consolidadas**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Aeroviaro/4-6-/Transporte-de-cargas>. Acesso em: 8 out. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Boletim CNT Unificado – março 2022**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins>. Acesso em: 21 fev. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Boletim Unificado**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins>. Referente a outubro de 2023. Acesso em: 31 out. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **O transporte move o Brasil: propostas da CNT ao país**. Brasília: CNT, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Parcerias: a provisão de infraestruturas de transporte pela iniciativa privada – rodovias**. Brasília: CNT, 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Terminais de carga do Brasil: terminais gateways aeroportuários**. Brasília: CNT, 2021. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/painel-gateway>. Acesso em: 7 out. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Transporte em números 2022**. Brasília: CNT, 2022. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/transporte-em-numeros>. Acesso em: 5 fev. 2024.

CONSELHO MARÍTIMO E PORTUÁRIO DE HONG KONG. **Hong Kong Maritime and Port Board**. 2023. Disponível em: <https://www.hkmpb.gov.hk/en/port.html>. Acesso em: 2 dez. 2023.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução nº 882, de 13 de dezembro de 2021**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao8822021.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2026.

COOK, W. D.; KAZAKOV, A.; ROLL, Y.; SEIFORD, L. M. **A data envelopment approach to measuring efficiency: case analysis of highway maintenance patrols**. The Journal of Socio-Economics, v. 20, n. 1, p. 83–103, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/1053-5357\(91\)90019-P](https://doi.org/10.1016/1053-5357(91)90019-P).

COOK, W.; ZHU, J. **Modeling performance measurement: applications and implementation issues in DEA**. New York: Springer, 2005.

COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. **Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver software**. Boston: Kluwer Academic, 2000.

CULLINANE, K. P. B.; WANG, T. F. **The efficiency of European container ports: a cross-sectional data envelopment analysis**. International Journal of Logistics Research and Applications, v. 9, n. 1, p. 19–31, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675560500322417>.

DAVARZANI, H.; FAHIMNIA, B.; BELL, M.; SARKIS, J. **Greening ports and maritime logistics: a review**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 48, p. 473–487, 2016.

DE LUCA, P.; VALENTINUZ, G. **Social sustainability for health and well-being in port areas: a general framework**. Corporate Social Responsibility and Environmental Management, v. 31, n. 2, p. 6234–6249, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/csr.2920>.

DICKEN, P. **Global shift**. 4. ed. London: Sage, 2003.

DI VAIO, A.; VARRIALE, L.; ALVINO, F. **Key performance indicators for developing environmentally sustainable and energy efficient ports: evidence from Italy**. Energy Policy, v. 122, p. 229–240, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.046>.

DP WORLD. **Jebel Ali Port**. Dubai, [s.d.]. Disponível em: <https://www.dpworld.com/en/uae/ports-and-terminals/jebel-ali-port>. Acesso em: 4 jan. 2024.

EFRON, B. **Bootstrap methods: another look at the jackknife**. The Annals of Statistics, v. 7, p. 1–26, 1979.

EIDE, M.; LONGVA, T.; HOFFMANN, P.; ENDERSEN, Ø.; DALSRØREN, S. **Future cost scenarios for reduction of ship CO₂ emissions**. *Maritime Policy & Management*, v. 38, n. 1, p. 11–37, 2011.

ELKINGTON, J. **Towards the sustainable corporation: win-win-win business strategies for sustainable development**. *California Management Review*, v. 36, n. 2, p. 90–100, 1994.

E-PORTS CO., LTD. **A major Southeast Asian port favored by several international terminal operators worth your notice: Trade of Laem Chabang Port**. 2023. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/major-southeast-asian-port-favored-several-terminal-worth-co-ltd-/>. Acesso em: 4 mar. 2024.

ESTANISLAU, P. B. **Terminais portuários privados e portos públicos: origens, realidades e situações jurídicas distintas**. Florianópolis: e-Gov/UFSC, 2012.

FAHIMNIA, B.; SARKIS, J.; DAVARZANI, H. **Green supply chain management: a review and bibliometric analysis**. *International Journal of Production Economics*, v. 162, p. 101–114, 2015.

FARRELL, M. J. **The measurement of productive efficiency**. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, v. 120, n. 3, p. 253–290, 1957.

FEDERAÇÃO DO COMÉRCIO DE BENS, SERVIÇOS E TURISMO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – FECOMÉRCIO-MG. **O que é uma exportação ficta? 2014**. Disponível em: <https://fecomerciomg.org.br/noticias/o-que-e-uma-exportacao-ficta/>. Acesso em: 21 jan. 2024.

FOBBE, L.; LOZANO, R.; CARPENTER, A. **Assessing the coverage of sustainability reports: an analysis of sustainability in seaports**. In: EUROPEAN ROUNDTABLE FOR SUSTAINABLE CONSUMPTION AND PRODUCTION (ERSCP), 19., 2019, Barcelona. Proceedings [...]. Barcelona, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Maren-Kropfeld-2/publication/358142222_ERSCP_2019_Conference_Proceedings_Vol_2/data/61f2a701c5e3103375c4b44f/Volumen-2-Proceedings.pdf#page=619. Acesso em: 25 maio 2024.

FØRSUND, F. R.; SARAFOGLOU, N. **On the origins of data envelopment analysis**. *Journal of Productivity Analysis*, v. 17, n. 1, p. 23–40, 2002.

FUKUYAMA, H.; MAEDA, Y.; SEKITANI, K.; SHI, J. **Input-output substitutability and strongly monotonic p-norm least distance DEA measures**. *European Journal of Operational Research*, p. 997–1007, 2014.

GLOBAL ISSUES. **Shanghai Port: Yangtze growth strategy**. Shanghai, 2017. Disponível em: https://www.porttechnology.org/wp-content/uploads/2019/05/018-019_Shanghai_Port_Yangtze_Growth_Strategy.pdf. Acesso em: 18 jan. 2024.

GONZÁLEZ, M. M.; TRUJILLO, L. **Reforms and infrastructure efficiency in Spain's container ports**. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 42, n. 1, p. 243–257, 2008.

GOSS, R. O. **Economic policies and seaports – Part 4: strategies for port authorities.** Maritime Policy & Management, v. 17, n. 4, p. 273–287, 1990.

GUANGZHOU PORT GROUP CO., LTD. **Group profile.** 2022. Disponível em: https://www.gzpgroup.com/jtgk/jtjj/201404/t20140428_320.html. Acesso em: 29 dez. 2023.

GUELCOS INTERNATIONAL. **7 principais portos da China: saiba tudo sobre eles.** 2023. Disponível em: <https://guelcos.com.br/conteudo/importacao/principais-portos-da-china/>. Acesso em: 8 mar. 2026.

HALKOS, G. E.; TZEREMES, N. G. **Exploring the existence of Kuznets curve in countries' environmental efficiency using DEA window analysis.** Ecological Economics, v. 68, p. 2168–2176, 2009.

HAIR, J. F. et al. **Multivariate data analysis.** 8. ed. Cengage, 2019.

OH, H.; LEE, S.-W.; SEO, Y.-J. **The evaluation of seaport sustainability: the case of South Korea.** Ocean & Coastal Management, v. 161, p. 50–56, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.028>.

HEAVER, T. **The implications of increased competition among ports for port policy and management.** Maritime Policy & Management, v. 22, n. 2, p. 125–133, 1995.

HONG KONG MARINE DEPARTMENT. **The Port of Hong Kong.** Disponível em: <https://www.mardep.gov.hk/en/home/index.html>. Acesso em: 8 mar. 2026.

HOSSAIN, T.; ADAMS, M.; WALKER, T. R. **Role of sustainability in global seaports.** Ocean & Coastal Management, v. 202, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105435>.

HUNG, S.-W.; LU, W.-M.; WANG, T.-P. **Benchmarking the operating efficiency of Asia container ports.** European Journal of Operational Research, v. 203, n. 3, p. 706–713, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.005>.

HUTCHISON PORTS THAILAND. 2022. Disponível em: <https://hutchisonports.co.th/>. Acesso em: 12 jan. 2024.

IEA. **Oil 2019: analysis and forecast to 2024.** 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/oil2019/>. Acesso em: 5 mar. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Anual de Serviços (PAS) 2019.** Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/servicos/9028-pesquisa-anual-de-servicos.html>. Acesso em: 10 mar. 2024.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE – IEMA. **Relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).** 2023. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2021>. Acesso em: 30 out. 2023.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)**. Londres: IMO, [s.d.]. Disponível em: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx). Acesso em: 19 mar. 2025.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Prevention of air pollution from ships**. Londres: IMO, 2020. Disponível em: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx>. Acesso em: 5 mar. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Introduction to IMO**. Londres: IMO, [s.d.]. Disponível em: <https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>. Acesso em: 19 mar. 2025.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)**. Londres: IMO, [s.d.]. Disponível em: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/SOLAS.aspx>. Acesso em: 20 mar. 2025.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil (OILPOL)**. Londres: IMO, [s.d.]. Disponível em: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/OilPol.aspx>. Acesso em: 21 mar. 2025.

JAKOBSEN, S. **Environmental indicators**. The Encyclopedia of Earth, 2008. Disponível em: https://editors-eol-org.translate.google.com/earth/wiki/Environmental_indicators?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=wapp#Citation. Acesso em: 10 maio 2023.

JENSEN, M. C.; MECKLING, W. **Theory of the firm: managerial behaviour, agency costs and capital structure**. Journal of Financial Economics, v. 3, p. 305–360, 1976.

JONES, L. P.; TANDON, P.; VOGELSANG, I. **Selling public enterprises: a cost-benefit methodology**. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

LAXE, F. G.; BERMÚDEZ, F. M.; PALMERO, F. M.; NOVO-CORTI, I. **Sustainability and the Spanish port system: analysis of the relationship between economic and environmental indicators**. Marine Pollution Bulletin, v. 113, n. 1-2, p. 232–239, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.022>.

LIAONING PORT CO., LTD. Relatório anual 2021. Dalian: Liaoning Port Co., Ltd., 2022. Disponível em: <https://www1.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2022/0426/2022042600597.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2026.

LIAONING PORT CO., LTD. **Annual report 2022**. Liaoning, 2023.

SCHWARCZ, L. M.; STARLING, H. M. M. **Brasil: uma biografia**. São Paulo: Companhia das Letras, 2015.

LOS ANGELES PORT. **About the Port of Los Angeles**. 2024. Disponível em: <https://www.portoflosangeles.org/about>. Acesso em: 10 jan. 2024.

LOS ANGELES PORT. **Statistics/Tonnage 2022**. Los Angeles, 2024. Disponível em: <https://www.portoflosangeles.org/business/statistics/tonnage-statistics>. Acesso em: 10 jan. 2024.

MALAYSIA. **MINISTRY OF TRANSPORT**. Malaysia Transport Statistics 2022. Putrajaya, 2022. Disponível em: <https://www.mot.gov.my/en/Statistik%20Tahunan%20Pengangkutan/Transport%20Statistics%20Malaysia%202022.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

STOPFORD, M. **Maritime Economics**. 3. ed. Londres: Routledge, 2009.

MARTINS, K. V.; CRUZ, M. M. C. **Eficiência de portos e terminais submetidos a diferentes formas de exploração como subsídio ao planejamento de um porto organizado**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 25., 2011, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte, 2011.

MEZA, L. A.; GOMES, E. G.; NETO, L. B. **Curso de análise de envoltória de dados**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 37., 2005. Anais [...], 2005.

MELLO, J. C. C. B. S.; MEZA, L. A.; GOMES, E. G.; SERAPIÃO, B. P.; LINS, M. P. E. **Análise de envoltória de dados no estudo da eficiência e dos benchmarks para companhias aéreas brasileiras**. Pesquisa Operacional, v. 23, n. 2, p. 325–345, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382003000200005>.

MELLO, J. C. C. B. S.; SENRA, L. F. A. C.; NANJI, L. C.; MEZA, L. A. **Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA**. Pesquisa Operacional, v. 27, n. 2, p. 191–207, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382007000200001>.

MINTZBERG, H. **The structuring of organizations**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

MINISTRY OF TRANSPORT MALAYSIA. **Statistik Pengangkutan Malaysia 2022**. Malaysia, 2022.

MORDOR INTELLIGENCE. **Brazil Bunker Fuel Market – Growth, Trends, and Forecasts (2024–2029)**. Hyderabad: Mordor Intelligence, 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/brazil-bunker-fuel-market>. Acesso em: 19 mar. 2026.

NARASIMHA, P. T.; JENA, P. R.; MAJHI, R. **Sustainability performance assessment framework for major seaports in India**. International Journal of Sustainable Development and Planning, v. 17, n. 2, p. 693–704, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.170235>.

NEIS, B. et al. **Injury and return to work among maritime workers in British Columbia, Canada**. New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy, v. 35, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1177/10482911251316325>.

NEME, I. **A importância dos portos e o grande crescimento de Cingapura.** 2020. Disponível em: <https://uxcomex.com.br/2020/10/a-importancia-dos-portos-e-o-grande-crescimento-de-cingapura/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

NGUYEN, T. L. H.; PARK, S.-H.; KIM, Y.; YEO, G.-T. **An efficiency analysis of container terminals in Southern Vietnam using DEA dynamic efficiency evaluation.** The Asian Journal of Shipping and Logistics, v. 37, n. 4, p. 329–336, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.11.003>.

NICKY ROGGE. **Undesirable specialization in the construction of composite policy indicators: the Environmental Performance Index.** Ecological Indicators, v. 23, p. 143–154, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.020>.

NIKOLAOU, P.; DIMITRIOU, L. **Lessons to be learned from top-50 global container port terminals efficiencies: a multi-period DEA-Tobit approach.** Maritime Transport Research, v. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100032>.

NOTTEBOOM, THEO.; RODRIGUE, J. **Port regionalization: towards a new phase in port development.** Maritime Policy & Management, v. 32, n. 3, p. 297–313, 2005.

NOTTEBOOM, THEO; PALLIS, A.; RODRIGUE, J.-P. **Port economics, management and policy.** New York: Routledge, 2022.

NUNES, R. O.; ALVIM-FERRAZ, M. C. M.; MARTINS, F. G.; SOUSA, S. I. V. **Environmental and social valuation of shipping emissions on four ports of Portugal.** Journal of Environmental Management, v. 235, p. 41–50, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.039>.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA (ONTL); EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA (EPL). **Relatório de transporte aéreo no Brasil.** Brasília: EPL, 2018.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA – ONTL. **Anuário Estatístico de Transportes 2010/2020: siglas e glossário.** 2021. Disponível em: https://ontl.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2021/06/AET-2020_siglas_glossario.pdf. Acesso em: 31 out. 2023.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA – ONTL; EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. – EPL. **Boletim de logística: infraestrutura de transportes no Brasil.** 2021. Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/publicacoes/boletins-de-logistica/>. Acesso em: 31 out. 2023.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA – ONTL; EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. – EPL. **Diagnóstico logístico 2010-2017.** 2022. Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2020/09/diagnostico-logistico2010-2017.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA – ONTL; EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. – EPL. **Diagnóstico logístico 2010-2021.** 2022.

Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2022/09/Diagnostico-Logistico-2010-2021.pdf>. Acesso em: 30 out. 2023.

OLAYA, W. R. C.; ARAÚJO, V. W. S.; OLIVEIRA, R. M. S.; ZANELLA, A. **Avaliação da ecoeficiência no transporte público urbano dos estados brasileiros: um estudo baseado na abordagem Benefit of the Doubt em Data Envelopment Analysis**. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, v. 16, e16002, p. 1–18, 2023.

OLIVEIRA, G. F.; CARIOU, P. **The impact of competition on container port (in)efficiency**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 78, p. 124–133, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.034>.

OLIVEIRA, L. V.; RICUPERO, R. (org.). **A abertura dos portos**. São Paulo: Senac São Paulo, 2007.

OLIVIER, D.; SLACK, B. **Rethinking the port**. Environment and Planning A, v. 38, n. 8, p. 1409–1427, 2006.

PALMOWSKI, T.; TARKOWSKI, M. **Development of sea port in Gdynia**. Baltic Region, n. 3, p. 61–74, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5922/2079-8555-2016-3-4>.

PANAYIDES, P. **Maritime logistics and global supply chains: towards a research agenda**. Maritime Economics & Logistics, v. 8, n. 1, p. 3–18, 2006.

PASTOR, J. T.; RUIZ, J. L.; SIRVENT, I. **A statistical test for nested radial DEA models**. Operations Research, v. 50, n. 4, p. 728–735, 2002.

PELABUHAN TANJUNG PELEPAS SDN BHD. **Our company**. 2024. Disponível em: <https://www.ptp.com.my/about-us/about-ptp>. Acesso em: 11 jan. 2024.

PÉRICO, Ana Elisa; REBELATTO, Daisy Aparecida do Nascimento; SANTANA, Naja Brandão. **Eficiência bancária: os maiores bancos são os mais eficientes? Uma análise por envoltória de dados**. Gestão & Produção, São Carlos, v. 15, n. 2, p. 421–431, maio/ago. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2008000200016>

PÉRICO, A. E.; SILVA, G. R. **Port performance in Brazil: a case study using data envelopment analysis**. Case Studies on Transport Policy, v. 8, n. 1, p. 31–38, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.01.002>.

PETROBRAS. **Óleo diesel: informações técnicas**. 2023. Disponível em: https://petrobras.com.br/documents/2677942/0/Manual%20de%20Diesel_2023.pdf/6764bdc0-af21-737b-745c-5eb9bb4f9ee1?version=1.0&t=1689172109000&download=true. Acesso em: 19 jan. 2023.

PINDER, D.; SLACK, B. **Shipping and ports in the twenty-first century: globalization, technological change and the environment**. London: Routledge, 2004.

PORT KLANG AUTHORITY. **Port Klang performance 2013–2022**. Port Klang, 2023. Disponível em: <https://www.pka.gov.my>. Acesso em: 20 jan. 2024.

PORTNEWS. **Throughput of Port Shanghai (China) in 7M'2023 rose by 11% YoY.** 2023. Disponível em: <https://en.portnews.ru/news/352282/>. Acesso em: 19 jan. 2024.

PORT OF ANTWERP-BRUGES. **Annual figures 2024.** Antwerp, 2025. Disponível em: <https://www.portofantwerpbruges.com>. Acesso em: 8 mar. 2026.

PORT OF ANTWERP-BRUGES. **Yearbook of statistics 2022.** Antwerp, 2022. Disponível em: <https://www.portofantwerpbruges.com>. Acesso em: 4 jan. 2024.

PORT OF ANTWERP-BRUGES. **Annual report 2024.** Antwerp, 2025. Disponível em: <https://www.portofantwerpbruges.com/en/publications>. Acesso em: 19 mar. 2026.

PORT OF HAMBURG. **Welcome to the official website of Germany's biggest seaport.** 2024. Disponível em: <https://www.hafen-hamburg.de/en/homepage/>. Acesso em: 9 jan. 2024.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. **Highlights annual report 2022.** Rotterdam, 2022. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/about-port-authority/finance/annual-reports>. Acesso em: 2 jan. 2024.

PORT TECHNOLOGY INTERNATIONAL. **Port of Antwerp-Bruges reports growth in 2024 cargo volumes.** 2026. Disponível em: <https://www.porttechnology.org/news/port-of-antwerp-bruges-reports-growth/>. Acesso em: 8 mar. 2026.

PORT OF KAOHSIUNG; TAIWAN INTERNATIONAL PORTS CORPORATION. **Annual statistical report 2022.** Taiwan, 2023.

PSA SINGAPORE. **Our story.** 2023. Disponível em: <https://www.singaporepsa.com/about-us/our-story/>. Acesso em: 27 dez. 2023.

PUIG, M.; RAPTIS, S.; WOOLDRIDGE, C.; DARBRA, R. M. **Performance trends of environmental management in European ports.** Marine Pollution Bulletin, v. 160, p. 111686, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111686>.

QINGDAO PORT INTERNATIONAL. **About Qingdao Port.** Qingdao: Qingdao Port International, 2014. Disponível em: <https://www.qingdao-port.com/portal/en/41>. Acesso em: 28 dez. 2023.

RECEITA ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Importação via courier.** 2024. Disponível em: <https://atendimento.receita.rs.gov.br/importacao-via-courier>. Acesso em: 21 jan. 2024.

ROBERTS, T. et al. **Ports in a storm: port-city environmental challenges and responses.** Sustainability, v. 15, n. 12, p. 9722, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129722>.

ROBINSON, R. **Ports as elements in value-driven chain systems: the new paradigm.** Maritime Policy & Management, v. 29, n. 3, p. 241–255, 2002.

RODRIGUES, V.; RUSSO, M.; SORTE, S.; REIS, J.; OLIVEIRA, K.; DIONÍSIO, A. L.; MONTEIRO, A.; LOPES, M. **Harmonizing sustainability assessment in seaports: a**

common framework for reporting environmental performance indicators. Ocean & Coastal Management, v. 202, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105514>.

ROIZ, G. A. **Economia circular e sustentabilidade: proposta de um índice composto sob perspectiva macro.** 2022. Tese (Doutorado em Processos e Gestão de Operações) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2022.tde-31052023-111504>.

ROMANO, G. **Cálculo de frete: o que é e como calcular o frete peso.** Intelipost, 2018. Disponível em: <https://www.intelipost.com.br/blog/frete-peso-como-calcular/>. Acesso em: 11 jan. 2024.

SÃO PAULO (Estado). **Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística – SEMIL.** Plano Diretor da Hidrovia Tietê–Paraná: comboios. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/travessias/wp-content/uploads/sites/10/2021/07/Plano-Diretor-Hidrovia-Tiete-Comboios-jun2021.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2026.

SEIFORD, L. M.; ZHU, J. **Modeling undesirable factors in efficiency evaluation.** European Journal of Operational Research, v. 142, n. 1, p. 16–20, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00293-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00293-4).

SERRANO-CINCA, C.; FUERTES-CALLÉN, Y.; MAR-MOLINERO, C. **Measuring DEA efficiency in Internet companies.** Decision Support Systems, v. 38, n. 4, p. 557–573, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923603001349>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SHIP & BUNKER. **Annual bunker demand change.** 2024. Disponível em: <https://shipandbunker.com/bi/bunker-volumes-2023-q4>. Acesso em: 24 out. 2024.

SHIP & BUNKER. **Bunker volumes increase in Q4 2024.** 2026. Disponível em: <https://shipandbunker.com/bi/bunker-volumes-2024-q4>. Acesso em: 28 fev. 2026.

SOBRE o biodiesel. **BiodieselBR, 2009.** Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/biodiesel/definicao/biodiesel>. Acesso em: 26 fev. 2024.

SONG, S. **Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port.** Atmospheric Environment, v. 82, p. 288–297, 2014.

SONS, W. **Transbordo: as cargas do mundo passam por aqui.** 2024. Disponível em: <https://www.wilsonsons.com.br/pt-br/teconriogrande/servicos/transbordo/>. Acesso em: 4 mar. 2024.

SPRENGER, L. **Incoterm FOB na exportação: saiba como funciona.** Fazcomex, 2023. Disponível em: <https://www.fazcomex.com.br/exportacao/incoterm-fob-na-exportacao/>. Acesso em: 16 jan. 2024.

STEINER, L. V.; SILVEIRA, T.; BUSS, T. **A regulamentação IMO 2020 e seus impactos no setor portuário mundial e nacional.** Portos e Navios, 2021. Disponível em:

<https://www.portosenavios.com.br/artigos/estudo-e-pesquisa/artigo-a-regulamentacao-imo-2020-e-seus-impactos-no-setor-portuario-mundial-e-nacional>. Acesso em: 5 mar. 2024.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics**. 7. ed. Pearson, 2019.

TAIWAN INTERNATIONAL PORTS CORPORATION. **Porto de Kaohsiung**. 2023.

Disponível em: <https://kh.twport.com.tw/en/cp.aspx>. Acesso em: 9 jan. 2023.

TAIWAN INTERNATIONAL PORTS CORPORATION. **Statistical Yearbook of Port of Kaohsiung 2023**. Kaohsiung, 2023.

TALJAARD, S.; SLINGER, J. H.; ARABI, S.; WEERTS, S. P.; VREUGDENHIL, H. **The natural environment in port development: a ‘green handbrake’ or an equal partner?** *Ocean & Coastal Management*, v. 199, p. 105390, 2021.

THE MARITIME EXECUTIVE. **Shanghai continues as largest container port handling 47M TEU in 2022**. 2023. Disponível em: <https://www.maritime-executive.com/article/shanghai-continues-as-largest-container-port-handling-47m-teu-in-2022>. Acesso em: 18 jan. 2023.

TIANJIN PORT DEVELOPMENT HOLDINGS LIMITED. **About Tianjin Port**. Tianjin: Tianjin Port Development Holdings Limited, 2022. Disponível em: <https://www.tianjinportdev.com/en/about-us>. Acesso em: 19 mar. 2026.

TONGZON, J.; HENG, W. **Port privatization, efficiency and competitiveness: some empirical evidence from container ports (terminals)**. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 39, n. 5, p. 405–424, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.02.001>.

TRUJILLO, L.; TOVAR, B. **Efficiency measurement in the port industry: a survey of the empirical evidence**. London: City University London, 2007.

TSOLAKIS, N.; ZISSIS, D.; PAPAEFTHIMIOU, S.; KORFIATIS, N. **Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals**. *International Journal of Production Research*, v. 60, n. 14, p. 4508–4528, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1914355>.

TULL, M. **Port history in the International Journal of Maritime History (1989–2012)**. *International Journal of Maritime History*, v. 26, n. 1, p. 123–129, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1177/0843871413515821>.

TWRDY, E.; ZANNE, M. **Improvement of the sustainability of ports logistics by the development of innovative green infrastructure solutions**. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520302210>. Acesso em: 19 maio 2023.

UNCTAD. **Review of Maritime Transport 2009**. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2009. Disponível em: <https://unctad.org>. Acesso em: 20 mar. 2026.

UNCTAD. **Review of Maritime Transport 2022**. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2022. Disponível em: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2022>. Acesso em: 11 maio 2023.

UNCTAD. **Why ports are at the heart of sustainable development**. 2022. Disponível em: <https://unctad.org/news/why-ports-are-heart-sustainable-development>. Acesso em: 11 maio 2023.

VALENTINE, V. F.; GRAY, R. **The measurement of port efficiency using data envelopment analysis**. In: WORLD CONFERENCE ON TRANSPORT RESEARCH, 9., 2001, Seoul. Proceedings [...]. Seoul: WCTR Society, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277617009_The_measurement_of_port_efficiency_using_data_envelopment_analysis. Acesso em: 8 mar. 2026.

WAN, Z.; ZHANG, Q.; XU, Z.; CHEN, J.; WANG, Q. **Impact of emission control areas on atmospheric pollutant emissions from major ocean-going ships entering the Shanghai Port, China**. Marine Pollution Bulletin, v. 142, p. 525–532, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.053>.

WANG, J. J.; CULLINANE, K.; SONG, D.-W. **Container port production and economic efficiency**. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2005.

WANKE, P. F. **Physical infrastructure and shipment consolidation efficiency drivers in Brazilian ports: a two-stage network-DEA approach**. Transport Policy, v. 29, p. 145–153, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.05.004>.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Competitiveness Report 2019**. Geneva, 2019. Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf. Acesso em: 20 out. 2023.

WORLD SHIPPING COUNCIL. **Top 50 World Container Ports**. Washington, DC: World Shipping Council, 2024. Disponível em: <https://www.worldshipping.org/top-50-ports>. Acesso em: 19 mar. 2026.

WRIGHT, I. **Top 49 maiores e mais movimentados portos de contêineres em 2023**. MoverDB, 13 out. 2023. Disponível em: <https://moverdb.com/pt/top-49-container-portos/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

WU, Y.-C. J.; GOH, M. **Container port efficiency in emerging and more advanced markets**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 46, n. 6, p. 1030–1042, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.01.002>.

XIAMEN PORT DEVELOPMENT CO. **Resumo do relatório anual de 2022**. Xiamen, 2022.

YUEN, A. C.-L.; ZHANG, A.; CHEUNG, W. **Foreign participation and competition: a way to improve the container port efficiency in China?** Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 49, p. 220–231, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.017>.

ZHE JIANG SEA PORT. 2023. **Ningbo Zhoushan Port**. Disponível em: <https://www.zjseaport.com/jtwwen/gywm/gkgk/>. Acesso em: 27 dez. 2023.