



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA E AMBIENTE

VITOR RENATO PEREIRA SANTOS

DESCARBONIZAÇÃO DO PORTO DO ITAQUI: levantamento da estimativa das
emissões de CO₂ pelos navios enquanto atracados entre 2022 e 2024

São Luís
2025

VITOR RENATO PEREIRA SANTOS

DESCARBONIZAÇÃO DO PORTO DO ITAQUI: levantamento da estimativa das emissões de CO₂ pelos navios enquanto atracados entre 2022 e 2024

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do grau de Mestre em energia e ambiente.

Orientadores: Prof. Dr. Clovis Bosco Mendonça
Oliveira
Profa. Dra. Darliane Ribeiro Cunha

São Luís
2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Santos, Vitor Renato Pereira

Descarbonização do Porto do Itaqui: levantamento da
estimativa das emissões de CO₂ pelos navios enquanto
atracados entre 2022 e 2024 / Vitor Renato Pereira
Santos. - 2025.

90 f.: il.

Orientador(a): Clovis Bosco Mendonça Oliveira

Orientador(a): Darliane Ribeiro Cunha

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Energia e Ambiente/CCET, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2025.

1. Descarbonização portuária. 2. Pegada de Carbono. 3.
Onshore Power Supply. 4. Porto do Itaqui. 5. Emissões de
CO₂. I. Oliveira, Clovis Bosco Mendonça. II. Cunha,
Darliane Ribeiro. III. Título

VITOR RENATO PEREIRA SANTOS

DESCARBONIZAÇÃO DO PORTO DO ITAQUI: levantamento da estimativa das
emissões de CO_2 pelos navios enquanto atracados entre 2022 e 2024

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do grau de Mestre em energia e ambiente.

Aprovada em: 28/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Clovis Bosco Mendonça Oliveira (Orientador)
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Maranhão

Profa. Dra. Darliane Ribeiro Cunha (Orientador)
Doutora em Contabilidade e Finanças
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Newton Narciso Pereira (Examinador)
Doutor em Engenharia Naval e Oceânica
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Sergio Sampaio Cutrim (Examinador)
Doutor em Engenharia Naval e Oceânica
Universidade de São Paulo

Msc. Gabriel Fernando Mateucci Cassia (Examinador)
Mestre em Desenvolvimento Socioeconômico,
Universidade Federal do Maranhão

Aos meus mais velhos, cujos passos
abriram caminhos.

Às mulheres pretas da minha família, em
especial Vovó Nicinha e Vovó Stela. Que
sempre incentivaram o estudo como
caminho para sair das condições adversas
que viviam.

Ao meu amado pai (*in memoriam*).

À minha amada mãe.

À minha amada companheira Rayssa.

O qual vosso amor, carinho, compreensão,
cuidado e zelo me suportaram até aqui.

AGRADECIMENTOS

Muitos foram os apoios que tive para chegar até aqui. É uma caminhada árdua o qual várias vezes questionamos a nossa capacidade, porém as pessoas que nos amam, nos levantam em cada queda ou nem deixam cair.

Agradeço à Deus que me proporcionou saúde e botou as pessoas certas no meu caminho. Agradeço à minha mãe Yemanjá, que proporcionou equilíbrio a minha orí nesse processo de escrita e me conduz nesses caminhos portuários. Minha mãe Nossa Senhora de Nazaré que nunca me desamparou e sempre me atende.

Agradeço incondicionalmente aos meus pais, Silva e Marina, que nunca mediram esforços em investir na minha educação, foram muitas parcelas atrasadas, cheques sem fundo e caronas em carrocerias para não me deixar perder um único dia de aula. Nunca deixaram que as adversidades impactassem diretamente em mim, pelo contrário me nutriram com muito amor e carinho. A trajetória de vidas de vocês me encoraja. Eu os amo demais.

À minha noiva Rayssa Edith, agradeço todo apoio nessa caminhada, os diálogos, as risadas, por escutar as minhas angústias e acreditar em mim até mais do que eu. Te amo pretinha.

Agradeço minha família, de São Luís e de Belém. Minha casa de bamba é muito extensa então não tenho como citar nominalmente, mas reforço que os amo demais, família é base e eu não poderia ter outra melhor.

À minha família de axé do Ilê Axé Alagbede Olodumare o qual tem sido importante no resgate da minha ancestralidade e compreensão dos caminhos.

À todes os meus amigxs, cujo bate papo e as resenhas ajudam a aliviar a tensão do cotidiano.

Aos meus companheiros de trabalho que me seguraram muito navio para que eu pudesse comparecer nas aulas, fazer as provas, me ajudaram a coletar informações e compartilharam conhecimento que pude utilizar na escrita.

Aos meus orientadores Clóvis Bosco e Darliane Cunha que foram bem humanos nesse processo, quebrando os estereótipos da orientação acadêmica. Me apoiaram e acreditaram no meu potencial.

Por fim volto a agradecer meu pai que brindou fisicamente comigo minha aprovação no processo seletivo do PPGEA e agora brindará comigo do orum.

“... Sim, vou na igreja festejar meu protetor.
E agradecer por eu ser mais um vencedor.
Nas lutas, nas batalhas
Sim, vou no terreiro pra bater o meu
tambor
Bato cabeça e firmo ponto, sim, senhor
Eu canto para Ogum...”

RESUMO

O setor marítimo é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), especialmente durante a operação dos navios em portos. Dentre essas, as emissões geradas enquanto os navios estão atracados representam uma parte substancial da pegada de carbono portuária. Este estudo tem como objetivo estimar a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitida por embarcações enquanto atracado no Porto do Itaquí, no período de 2022 a 2024, com vistas a subsidiar estratégias de descarbonização, em especial a adoção do sistema de fornecimento de energia elétrica em terra. A metodologia baseou-se nos parâmetros do Fourth IMO GHG Study, utilizando dados operacionais fornecidos pela autoridade portuária. Foram aplicadas equações para estimar o consumo energético dos motores auxiliares, a queima de combustíveis (MGO/MDO e HFO) e as respectivas emissões de CO₂. Os resultados indicam que, no período analisado, as operações portuárias emitiram entre 51,08 kt e 52,29 kt de CO₂. Identificou-se que navios-tanque, devido à maior demanda energética, foram os principais emissores, seguidos por graneleiros. Os berços especializados em graneis líquidos concentraram os maiores volumes de emissões. O estudo reforça a necessidade de políticas públicas e investimentos voltados à modernização da infraestrutura portuária, especialmente por meio da implementação de sistemas OPS, como estratégia viável para a redução das emissões em áreas portuárias brasileiras.

Palavras-chave: descarbonização portuária; pegada de carbono; *onshore power supply*; Porto do Itaquí; emissões de CO₂.

ABSTRACT

The maritime sector is responsible for a significant share of global greenhouse gas (GHG) emissions, particularly during port operations. Among these, emissions produced while ships are berthed account for a substantial portion of the port's carbon footprint. This study aims to estimate the amount of carbon dioxide (CO₂) emitted by vessels during berthing at the Port of Itaqui between 2022 and 2024, with the goal of supporting decarbonisation strategies, particularly the adoption of shore-side electricity supply systems. The methodology was based on the parameters of the Fourth IMO GHG Study, using operational data provided by the port authority. Equations were applied to estimate the energy consumption of auxiliary engines, the burning of marine fuels (MGO/MDO and HFO), and the corresponding CO₂ emissions. The results indicate that, over the analysed period, port operations emitted between 51.08 kt and 52.29 kt of CO₂. Tankers were identified as the main emitters due to their higher energy demand, followed by bulk carriers. Berths dedicated to liquid bulk operations were responsible for the highest emission volumes. The study highlights the urgent need for public policies and investment aimed at modernising port infrastructure, particularly through the implementation of OPS systems as a feasible strategy for reducing emissions in Brazilian port areas.

Keywords: port decarbonization; carbon footprint; onshore power supply; Port of Itaqui; CO₂ emissions.

RÉSUMÉ

Le secteur maritime est responsable d'une part significative des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), en particulier lors des opérations des navires dans les ports. Parmi celles-ci, les émissions générées lorsque les navires sont à quai représentent une part substantielle de l'empreinte carbone portuaire. Cette étude a pour objectif d'estimer la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) émise par les navires à quai dans le Port d'Itaqui, sur la période de 2022 à 2024, afin de soutenir des stratégies de décarbonation, notamment l'adoption du système d'alimentation électrique à quai. La méthodologie s'appuie sur les paramètres du Fourth IMO GHG Study, en utilisant les données opérationnelles fournies par l'autorité portuaire. Des équations ont été appliquées pour estimer la consommation énergétique des moteurs auxiliaires, la combustion des carburants (MGO/MDO et HFO) ainsi que les émissions de CO₂ correspondantes. Les résultats indiquent que, sur la période analysée, les opérations portuaires ont émis entre 51,08 kt et 52,29 kt de CO₂. Il a été constaté que les navires-citernes, en raison de leur forte demande énergétique, étaient les principaux émetteurs, suivis des vraquiers. Les postes à quai spécialisés dans les vrac liquides ont concentré les plus grands volumes d'émissions. L'étude souligne la nécessité de politiques publiques et d'investissements en faveur de la modernisation de l'infrastructure portuaire, notamment à travers la mise en œuvre de systèmes OPS, comme stratégie viable pour la réduction des émissions dans les zones portuaires brésiliennes.

Mots-clés: décarbonation portuaire; empreinte carbone; onshore power supply; Port d'Itaqui; Émissions de CO₂.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação matemáticas da dinâmica meteorológica na região portuária	16
Figura 2 – Ilustração de um modelo de OPS.....	26
Figura 3 – Carta de solicitação de dados	33
Figura 4 – Visita Técnica a bordo de um navio.....	34
Figura 5 – Estrutura Metodológica	36
Figura 6 – Linha do tempo da Construção do Porto do Itaquí	36
Figura 7 – Imagem dos Berços do Porto do Itaquí em 2022	37
Figura 8 – Linha do tempo de uma Operação Portuária.....	40
Figura 9 – Classificação dos navios conforme o tamanho e o tipo.....	42
Figura 10 – Panorama geral de 2022.....	53
Figura 11 – Panorama Geral de 2023	54
Figura 12 – Panorama Geral de 2024	55
Figura 13 – Estimativa de Gastos dos Navios, priorizando gastos mais elevados com combustível e energia elétrica	59
Figura 14 – Estimativa de Gastos dos Navios, priorizando maior tempo de permanência no berço.....	60
Figura 15 – Panorama do Berço 99 em 2024.....	68
Figura 16 – Panorama do Berço 100 em 2024.....	69
Figura 17 – Panorama do Berço 101 em 2024.....	69
Figura 18 – Panorama do Berço 102 em 2024.....	70
Figura 19 – Panorama do Berço 103 em 2024.....	70
Figura 20 – Panorama do Berço 104 em 2024.....	71
Figura 21 – Panorama do Berço 105 em 2024.....	71
Figura 22 – Panorama do Berço 106 em 2024.....	72
Figura 23 – Panorama do Berço 108 em 2024.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo do Guia Verde	24
Quadro 2 – Dados fornecidos pela EMAP	35
Quadro 3 – Potência média dos motores auxiliares para embarcações de menor e maior porte	49
Quadro 4 – Consumo específico do Motor	50
Quadro 5 – Coeficiente de Emissão	50
Quadro 6 – Comparação entre os resultados obtidos por ValênciaPort e Conexão Verde (Universidade Federal do Maranhão – UFMA)	52
Quadro 7 – Fator de Carga Médio.....	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Projeção da Emissão de Carbono pelo transporte marítimo de 2008 até 2050	15
Gráfico 2 –	Fornecimento de energia para embarcações ao longo do tempo, pelos Portos Brasileiros.....	30
Gráfico 3 –	Atracações no Porto do Itaqui por tipo de navio.....	44
Gráfico 4 –	Perfil de consumo de energia ao longo do carregamento	46
Gráfico 5 –	Emissão de CO2 por classe: P. Itaqui x P. Dalian	56
Gráfico 6 –	Estimativa de emissão de CO2 por MDO/MGO por mês ao longo de 2022, 2023 e 2024	57
Gráfico 7 –	Variação da Soma das Potências Estimadas dos Motores Auxiliares no Porto do Itaqui.....	62
Gráfico 8 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 no Berço 99	63
Gráfico 9 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 e 100	64
Gráfico 10 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 101	64
Gráfico 11 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 102	65
Gráfico 12 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 103	65
Gráfico 13 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 104	66
Gráfico 14 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 105	66
Gráfico 15 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 106	67
Gráfico 16 –	Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 108	67

LISTA DE SIGLAS

ABDP	Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CII	<i>Carbon Intensity Indicator</i>
CLRTAP	Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância
CNUDM	Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar
CODOMAR	Companhia Docas do Maranhão
COPI	Companhia Operadora Portuária do Itaqui
DCS	<i>Data Collection System</i>
DWT	<i>Dead-Weight Tonnage</i>
ECA	<i>Emission Control Area</i>
EEDI	<i>Energy Efficiency Design Index</i>
EMAP	Empresa Maranhense de Administração Portuária
e-SIC	Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIZ	<i>Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>
GNL	Gás Natural Liquefeito
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i>
HSFO	<i>High-sulfur Fuel Oil</i>
IDA	Índice de Desempenho Ambiental
IMCO	Organização Consultiva Intergovernamental Marítima
IMO	International Maritime Organization
LSFO	<i>Low-sulfur Fuel Oil</i>
MARPOL	Marine Pollution
MATOPIBA	Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
MCA	Motor de Combustão Auxiliar
MDO	<i>Marine Diesel Oil</i>
MEPC	<i>Marine Environment Protection Committee</i>
MGO	<i>Marine Gas Oil</i>

MP	Motor Principal
NOx	Óxidos de Nitrogênio
ONU	Organização das Nações Unidas
OPS	<i>Onshore Power Supply</i>
Ro-Ro	<i>Roll-on/Roll-off</i>
SEEMP	<i>Ship Energy Efficiency Management Plan</i>
SFOC	<i>Specific Fuel Oil Consumption</i>
SOx	Óxidos de Enxofre
TEGRAM	Terminal de Grãos do Maranhão
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>
TRANSPETRO	Petrobras Transporte S.A.
UFMA	Universidade Federal do Maranhão
VBP	<i>Vessel Boarding Program</i>
VLI	Valor da Logística Integrada
VOCs	<i>Volatile Organic Compounds</i>

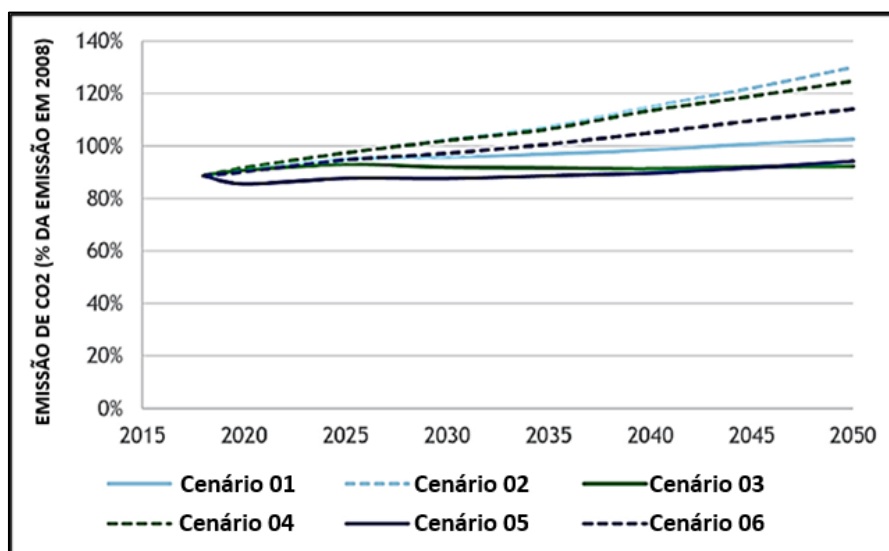
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3	MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂	22
3.1	Descarbonização portuária	22
3.2	<i>Onshore power supply</i> - OPS	25
4	METODOLOGIA	32
4.1	Porto do Itaquí	36
4.2	Estadia do navio no Porto do Itaquí	39
4.3	Embarcações	41
4.3.1	Porte dos navios	41
4.3.2	Tipo de navio	42
4.4	Combustível Consumido pelos navios	44
4.5	Consumo de energia do navio	45
4.6	Estimativa de emissão	47
4.6.1	Potência do Motor Auxiliar (P_{aux})	48
4.6.2	Consumo de Combustível ($FC_{i^{Berth}}$)	49
4.6.3	Coeficiente de emissão	50
5	RESULTADOS	51
5.1	Gráfico geral de 2022	52
5.2	Gráfico geral de 2023	54
5.3	Gráfico geral de 2024	55
5.4	Emissão de CO₂ no Porto do Itaquí	56
5.5	Estimativa de gastos com energia	58
5.6	Comportamento do somatório de potência dos motores auxiliares entre os berços	60
5.7	Gráfico Geral por cada berço em 2024	68
6	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A – ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS DA EMAP EM EXCEL	83
	APÊNDICE B – PROCESSO HISTÓRICO E MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ OFFSHORE	84

1 INTRODUÇÃO

cerca de 3% das emissões antropogênicas de Dióxido de carbono (CO₂) correspondem ao transporte marítimo. Esse percentual parece pequeno, no entanto ao se aprofundar nesses valores os pesquisadores da área constataram a possibilidade de causarem impactos irreversíveis (International Maritime Organization, 2020). Ainda segundo o estudo de gases de efeito estufa (GEE) da International Maritime Organization (IMO), ao analisar seis cenários diferentes, foi estipulada a liberação de CO₂ na atmosfera até 2050, constatando, assim, que haverá o acréscimo entre 90% e 130% em comparação aos valores de 2008 (Gráfico 1). Cada cenário simula o comportamento da sociedade em relação a adoção de medidas mitigatórias de emissão de GEE, no qual os cenários 03 e 05 representam alto grau de consciência da sociedade e cenário 02 aponta total descaso com as questões ambientais.

Gráfico 1 – Projeção da Emissão de Carbono pelo transporte marítimo de 2008 até 2050



Fonte: International Maritime Organization (2020).

No contexto brasileiro, o Relatório de Impactos e Riscos da Mudança do Clima nos Portos Públicos Costeiros Brasileiros, elaborado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), aponta que as mudanças climáticas podem causar danos significativos à infraestrutura portuária, impactar a cadeia de suprimentos do país e gerar perdas econômicas substanciais.

No que se refere especificamente ao Porto do Itaquí, Carvalho e Rodrigues (2024) apresentam cinco diferentes cenários projetados com base nos níveis de emissão de GEE. De acordo com essas projeções, até o ano de 2100, o aumento do nível do mar pode variar entre 0,3 e 1,1 metros, dependendo do cenário analisado. Mesmo no cenário mais otimista, que apresenta menores riscos em comparação aos demais, prevê-se a ocorrência de inundações temporárias durante as marés mais elevadas, o que poderá comprometer o acesso ao porto e suas operações. Além dos impactos operacionais, este cenário também sugere o aumento da salinidade nos manguezais, afetando diretamente a biodiversidade local. Como consequência, comunidades que dependem da pesca e do extrativismo do mangue poderão sofrer impactos socioeconômicos consideráveis.

Ao fazer uma análise sobre o presente, observa-se que a corrente de ar, em algumas situações, desloca as emissões provenientes das operações portuárias em direção à cidade. Essa dinâmica é ilustrada na Figura 1, extraída do Software Mentor, que utiliza modelagens matemáticas para representar a dinâmica meteorológica da região portuária de São Luís. No modelo apresentado, as linhas azuis indicam a direção predominante dos ventos e a trajetória das massas de ar, evidenciando o transporte dos poluentes da área portuária para os centros urbanos. Demonstrando a necessidade de estratégias de adaptação e mitigação para a região.

Figura 1 – Representação matemáticas da dinâmica meteorológica na região portuária



Fonte: Vale (2025).

Observa-se que a preocupação com esse tema no setor marítimo é relativamente nova, uma vez que as regulamentações se intensificaram a partir do Anexo VI da Marine Pollution (MARPOL), último tema a ser anexado na Convenção Internacional para Prevenção da Poluição por Navios, que entrou em vigor a partir de 2005. Desde então, foram proibidas instalações que contivessem hidrofluorcarbonetos, estipulou-se o teor de enxofre nos óleos combustíveis, foram estabelecidas as áreas de controle de emissão, entre outras ações (Convenção [...], 2005).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) endossou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, uma iniciativa estratégica que estabelece 17 objetivos e 169 metas voltados para a promoção de práticas sustentáveis em diversos setores da sociedade. A adoção desta agenda marcou um ponto de inflexão, resultando em um crescimento notável no número de corporações que passaram a divulgar proativamente dados sobre suas iniciativas de Responsabilidade Social Corporativa (Cutrim; Robles, 2022).

Este fenômeno observado em múltiplos setores econômicos também se manifesta no âmbito portuário. As discussões acerca da interação entre portos e o contexto urbano circundante têm evidenciado a influência substancial que os portos exercem sobre o desenvolvimento econômico, social e ambiental local.

Dessa forma, observa-se um maior enfoque na gestão ambiental portuária, por meio da implementação de um conjunto de práticas, ações e políticas voltadas à sustentabilidade. Inicialmente, as iniciativas sustentáveis eram adotadas predominantemente em função das exigências legais. No entanto, verificou-se que investimentos em eficiência energética, gestão de resíduos e otimização do uso de recursos naturais não apenas contribuem para a redução dos impactos ambientais, mas também resultam em ganhos operacionais e redução de custos, tornando-se um diferencial estratégico para os portos (Lemos, 2024).

Neste contexto o presente estudo tem como objetivo apontar aspectos básicos que envolvem as etapas iniciais de um projeto de descarbonização portuária, com ênfase nas embarcações enquanto atracadas nos berços do Porto do Itaqui. Mais especificamente:

- a) Calcular a emissão de CO₂ proveniente dos motores auxiliares dos navios, enquanto atracados.

- b) Elaborar dashboards com os elementos envolvidos na quantificação da pegada de carbono, que permitam visualizar os dados coletados de forma organizada, visando auxiliar futuras análises e tomada de decisão de gestores.

A quantificação da pegada de carbono representa o primeiro passo para o desenvolvimento de um plano de descarbonização, sendo essencial para a definição de estratégias eficazes de mitigação (Botana; Fernández; Feijoo, 2023).

Para alcançar os resultados propostos, este trabalho adota uma abordagem temporal, analisando as principais medidas implementadas ao longo dos anos para a redução das emissões de CO₂ no setor portuário. Além disso, discute-se o cenário atual da descarbonização portuária, com destaque para a tecnologia *Onshore Power Supply* - OPS (ver seção 3.4), que surge como uma das soluções mais promissoras para a mitigação das emissões atmosféricas.

Em seguida, apresentam-se as características do campo de pesquisa, abordando as particularidades operacionais do Porto do Itaquí. Posteriormente, detalha-se a metodologia empregada nos cálculos para estimar as emissões de CO₂ dos navios atracados no período de 2022 a 2024. Por fim, realiza-se a análise dos resultados obtidos, com a interpretação dos gráficos gerados a partir da estimativa das emissões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme anteriormente mencionado os impactos do aquecimento global já são uma realidade, assim como também já foi apontado pela IMO (2020) o potencial de emissão de GEE das operações marítimas para os próximos 25 anos, gráfico 01. Assim, com o intuito de regular o setor, o Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) desempenha um papel fundamental na definição das diretrizes adotadas pelo mercado internacional para o controle das emissões de GEE. As regulamentações estabelecidas pela IMO abrangem, entre outros aspectos, a limitação do teor máximo de enxofre nos combustíveis marítimos, além de outras medidas voltadas à mitigação dos impactos ambientais no setor de transporte marítimo (IMO,2020). Essas diretrizes têm impulsionado a adoção de práticas mais sustentáveis e incentivado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à eficiência energética e à redução das emissões no setor. É nesse contexto que Alamoush, Ballini e Ölçer (2020), Buonomano (2023), Fadiga, Ferreira e Bigotte (2024), Freitas e Gervásio (2024), dentre outros veem na nescarbonização portuária uma prática fundamental para alcançar tais objetivos.

De acordo com a análise do cenário, o emprego de tecnologias se faz imprescindível, Bullock (2023), Krämer e Czernański (2020), Uzun *et al.* (2024) e Wang *et al.* (2024) convergem ao citar o OPS com uma opção que possibilita resultados imediatos. Stolz *et al.* (2021) aponta que a adoção do OPS pode evitar a emissão de até 5Mt de CO₂ por ano, que equivale a 3,7% das emissões marítimas pela União Europeia.

No entanto, umas das barreiras existentes para a popularização da tecnologia, mora no alto custo para implantação (Alamoush *et al.*, 2023). Dessa forma é fundamento o levantamento que Abu Bakar (2023) faz dos aspectos relevantes relacionados à viabilidade da instalação de sistemas de OPS em terminais portuários, comparando, sob a ótica financeira, os custos de geração de energia entre o terminal e o navio. Sabendo-se que este é um investimento de custos elevados Wang (2023) e Masodzadeh *et al.* (2024) defendem que a sua implementação deve ser apoiada pelos estados através de leis e incentivos fiscais. Conforme ocorre na União Européia, em que suas políticas regionais pressionam as instalações portuárias a adotar o OPS (Osipova; Carraro, 2023).

Porém antes da implantação do OPS na estrutura portuária, é necessário compreender o cenário local (Bullock, 2023). Chen *et al.* (2021) coordenou uma pesquisa abrangente no Porto de Dalian, na China, analisando a relação entre as categorias de navios e o volume de CO₂ emitido durante o período de atracação. Os resultados ofereceram uma perspectiva significativa sobre o impacto ambiental de diferentes tipos de embarcações. Observou-se que, tanto no Porto de Dalian quanto no Porto do Itaquí, os navios de granel líquido são os principais responsáveis pela maior parcela das emissões de CO₂.

No caso do presente trabalho, a busca pela compreensão do cenário dar-se através da mensuração do GEE emitido pelos navios enquanto atracados. Akakura (2023) aponta o levantamento da pegada de carbono como um dos primeiros passos para o processo de descarbonização portuária. Medir a emissão é necessária pois nesse processo entende-se qual o perfil dos navios que ali operam e conseqüentemente do porto, a partir de então começa-se a ter insumos para elaboração de projetos de OPS que sejam compatíveis com a instalação portuária (Gore; Rigot-Müller; Coughlan, 2023).

Para realiza a estimativa da emissão de CO₂ oriundas dos motores auxiliares dos navios enquanto atracado, são apresentados diversos caminhos por autores como Botana (2022), Cammin *et al.* (2020), Moreno-Gutiérrez (2015, 2021), Nguyen, Woo e Kim (2022), Shen *et al.* (2025), Yu *et al.* (2024), no entanto, devido os dados disponibilizados pelo Porto do Itaquí, a metodologia que melhor se adapta é a do 4º Greenhouse Gas Study da IMO.

Este relatório desenvolvido pela IMO desempenha um papel essencial ao estabelecer a relação entre a geração de energia elétrica dos motores à combustão e o seu consumo específico de combustível (Specific Fuel Oil Consumption – SFOC). Além disso, esse estudo evidencia que o consumo específico dos motores auxiliares está diretamente relacionado à carga aplicada. Os gráficos de SFOC apresentam um comportamento característico em formato de “U”, indicando que, em baixas rotações, o consumo de combustível é elevado; à medida que a rotação aumenta, o consumo tende a diminuir até atingir um ponto ótimo de eficiência. No entanto, se a rotação continuar a crescer além desse ponto, o consumo volta a se elevar, demonstrando a sensibilidade do motor à variação da carga.

Além disso, Moreno-Gutiérrez *et al.* (2015) e o UK Ship Emission Inventory (Entec, 2010), com base nos dados compilados do Lloyd's MIU, apresentaram informações detalhadas sobre a demanda de potência dos motores auxiliares e os fatores de carga das embarcações por classe. Essas informações são fundamentais para o avanço nos cálculos destinados a estimar a quantidade de energia consumida pelos navios enquanto atracados, contribuindo para uma melhor compreensão do consumo energético em operações portuárias.

Ainda no âmbito do cálculo de estimativa, são relevantes dados sobre os fatores de emissão associados ao Marine Diesel Oil (MDO) e ao Marine Gas Oil (MGO), permitindo estimar o potencial de emissão de carbono com base na quantidade de combustível marítimo consumido durante o período de atracação Moreno-Gutiérrez e Durán-Grados (2021). Esses dados são fundamentais para avaliar o impacto ambiental das operações portuárias e propor soluções mais sustentáveis.

Outro aspecto importante apontado por Vidal (2021) foi o consumo de energia elétrica pelos navios em vários portos do Brasil entre os anos de 2010 e 2020, incluindo o Porto do Itaquí, utilizando como fonte a base de dados da ANTAQ. Este estudo também forneceu subsídios importantes para a estimativa de demanda energética calculada no presente trabalho.

Por fim, conforme destacado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2024), por meio do estudo *Revisão da Experiência Internacional Sobre Redução das Emissões no Transporte Marítimo e nos Portos*, realizado em parceria com a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), ficou evidente a urgência do movimento de descarbonização nos portos brasileiros. O relatório enfatizou a necessidade de adotar práticas e tecnologias sustentáveis nas operações portuárias, com destaque para a implementação de sistemas de OPS e o desenvolvimento de *smart grids* e *micro grids*. Essas iniciativas não apenas contribuem para a redução das emissões de carbono, mas também promovem a modernização, a eficiência energética e a sustentabilidade das infraestruturas portuárias.

3 MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

3.1 Descarbonização portuária

No tange ao processo de descarbonização portuária, nota-se maior enfoque em ações para redução das emissões em relação ao transporte marítimo e pouco foco no que diz a respeito à parte portuária, cuja responsabilidade se restringe a suportar o transporte aquaviário.

Segundo o *Global Warming Potential* (GWP), há outros gases com maior potencial para o aquecimento global, porém o CO₂ corresponde a aproximadamente 76% do GEE emitido em nível global, já no setor portuário essa relação sobe para 99% (The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2019). Considerando estes dados, entende-se a necessidade de atenção no processo de descarbonização portuária.

A partir de então passou-se a questionar qual seria a parcela das operações portuárias na emissão de GEE. Dentro desse contexto, as empresas de logística despontaram no comprometimento em medir e reduzir as emissões. Em paralelo, houve também o movimento de união entre a indústria e os varejistas para apoiar pesquisas acerca da possibilidade para o emprego de combustíveis menos poluentes, como etanol, hidrogênio e Gás Natural Liquefeito (GNL).

Os portos, em sua pluralidade, são compostos por uma cadeia multimodal, dessa forma tornam-se responsáveis por diversas formas de emitir GEE, diretamente ou indiretamente. Pode-se elencar emissões provenientes da superestrutura utilizada para a movimentação de carga, máquinas da linha amarela, trens, caminhões que transportam carga nos pátios e os próprios navios através dos motores de combustão auxiliar e das caldeiras.

Além dos maquinários, a infraestrutura portuária também contribui para a emissão de GEE, tornando sua matriz energética um aspecto fundamental na gestão ambiental. Em alguns casos, edifícios e estruturas operacionais passaram a utilizar gás natural em geradores e a adotar energia elétrica de origem solar, visando a redução do impacto ambiental.

Os portos têm buscado implementar o uso de energia proveniente de fontes renováveis, como eólica, solar e maremotriz. Paralelamente, investimentos estão

sendo realizados na gestão energética por meio de *smart grids* e *microgrids*, sistemas que permitem o ajuste automático da distribuição de energia, promovendo maior eficiência e sustentabilidade.

Assim, nota-se que os portos têm papel crucial no processo de descarbonização da indústria marítima. Pois, com a hibridização das embarcações e adoção de combustíveis alternativos, os portos terão que oferecer condições para o reabastecimento ou recarga das embarcações (EIT Innoenergy, 2022).

Conforme a *Environmental Protection Agency*, dentro da operação portuária como um todo, são cinco as principais fontes de emissão: navio, embarcações de apoio portuário, equipamentos de movimentação de carga, ferrovia e veículos terrestres (Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2024).

Relacionada aos navios, são observadas duas maneiras de mitigar esse processo, uma é a utilização do OPS (ver seção 3.4), a qual estima-se uma redução entre 22% e 37% quando aplicados em terminais voltados para navios de cruzeiros ou container. E a outra opção consiste na otimização da operação, a qual se avalia que a eficiência no carregamento pode gerar uma redução de 7,8% (The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2019).

Apesar de serem responsáveis pela menor parcela de emissões diretas de GEE, as autoridades portuárias têm papel estratégico nesse processo, pois funcionam como os incentivadores da adoção de medidas por parte dos stakeholders, que a partir de então passam a definir suas próprias metas.

A autoridade portuária deve trabalhar em metodologias que primeiro tragam conscientização para as partes envolvidas, em sequência devem atuar na inserção de ferramentas que incentivam a descarbonização, como por exemplo, “descontos verdes”, estipular metas para a utilização dos modais e até mesmo inserção de cláusulas de contratos que exijam medidas mitigatórias por parte do arrendatário ou operador portuário.

Assim, ressalta-se que mesmo com o papel estratégico das autoridades portuárias, o processo de descarbonização somente começa a avançar após os stakeholders assumirem suas responsabilidades.

O objetivo do Guia Verde (European Sea Ports Organisation, 2021), foi desenvolvido por governantes da Europa com o intuito de guiar os portos no caminho

para a descarbonização das suas operações e apresenta os seguintes passos (Quadro 1):

Quadro 1 – Resumo do Guia Verde

Nº	ETAPA	O QUE/COMO FAZER?	COMO PROCEDER
01	Medir	Fazer inventário com o status ambiental do porto.	- Calcular a pegada de carbono. - Identificar principais desafios
02	Priorizar	Identificar desafios e oportunidades ambientais, sustentáveis e climáticas.	- Discutir a etapa anterior em nível técnico. - Envolver a diretoria. - Priorizar os tópicos levantados
03	Definir Metas	Identificar qual o objetivo a ser atingido	- Para cada uma das metas, identificar se há alguma regulamentação em nível internacional ou local. - Estabelecer formas de medir as metas.
04	Ferramentas e Tarefas	Identificar ferramentas, parceiros e medidas.	- Calcular orçamentos e investimentos considerando os ganhos ambientais e sociais. - Identificar ferramentas que levarão ao alcance da meta.
05	Compartilhar	Compartilhar o plano com o objetivo de ser uma premissa do porto.	- Divulgar e explicar a estratégia para os demais atores do porto. - Trabalhar a motivação para abraçarem a causa.
06	Programe-se	Planejar etapas palpáveis.	- Elaborar um plano de trabalho. - Mapear os atores e suas respectivas responsabilidades, com prazo.
07	Monitore	Implementar monitoramento e comunicar internamente os resultados	- Medir o progresso e divulgar. - Discutir oportunidades de melhoria. - Comunicar falhas e gargalos de forma transparente. - Utilizar esses dados para atualizar o projeto.
08	Comunique	Atuar ativamente na comunicação externa.	- Entrar em contato com os <i>stakeholders</i> e adaptar a linguagem dos relatórios para a compreensão de todos. - Comunicar prioridades, ganhos e falhas de forma transparente. - Compartilhar casos práticos de sucesso

Fonte: Adaptada do Guia Verde (European Sea Ports Organisation, 2021).

A IMO também incentiva a descarbonização portuária, porém não com tanto vigor quanto as atividades ligadas a navegação. Os estados são encorajados para submeterem voluntariamente seus Planos de Ação como forma de propagar a movimentação que está havendo e de compartilhar conhecimento. Até o momento, somente o Reino Unido, Cingapura, Noruega e Ilhas Marshall, Japão, Índia e Finlândia se submeteram às referidas orientações. Dentre estes destaca-se a Noruega, que objetiva chegar em 2030 livre de emissões. São oferecidos descontos para navios que adotam medidas sustentáveis e são detentores do maior sistema de OPS da Europa para navios de cruzeiro e determinaram que a partir de 2025 todos os navios dessa categoria deveriam usar o OPS (Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2024).

No que diz respeito ao Brasil, há a Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos (ABDP), criada em março de 2024 e encabeçada pelo Porto do Itaquí, cujo objetivo pretende acelerar a descarbonização dos setores portuário e aquaviário no Brasil, promovendo a troca de experiências, informações e tecnologias entre diversos atores nacionais e internacionais. A iniciativa visa compartilhar conhecimentos e implementar ações estratégicas para reduzir as emissões de GEE nas operações portuárias, alinhando o setor às exigências globais de práticas sustentáveis. Para isso, são realizados encontros on-line periódicos, para favorecer a troca de informações (Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos, 2024).

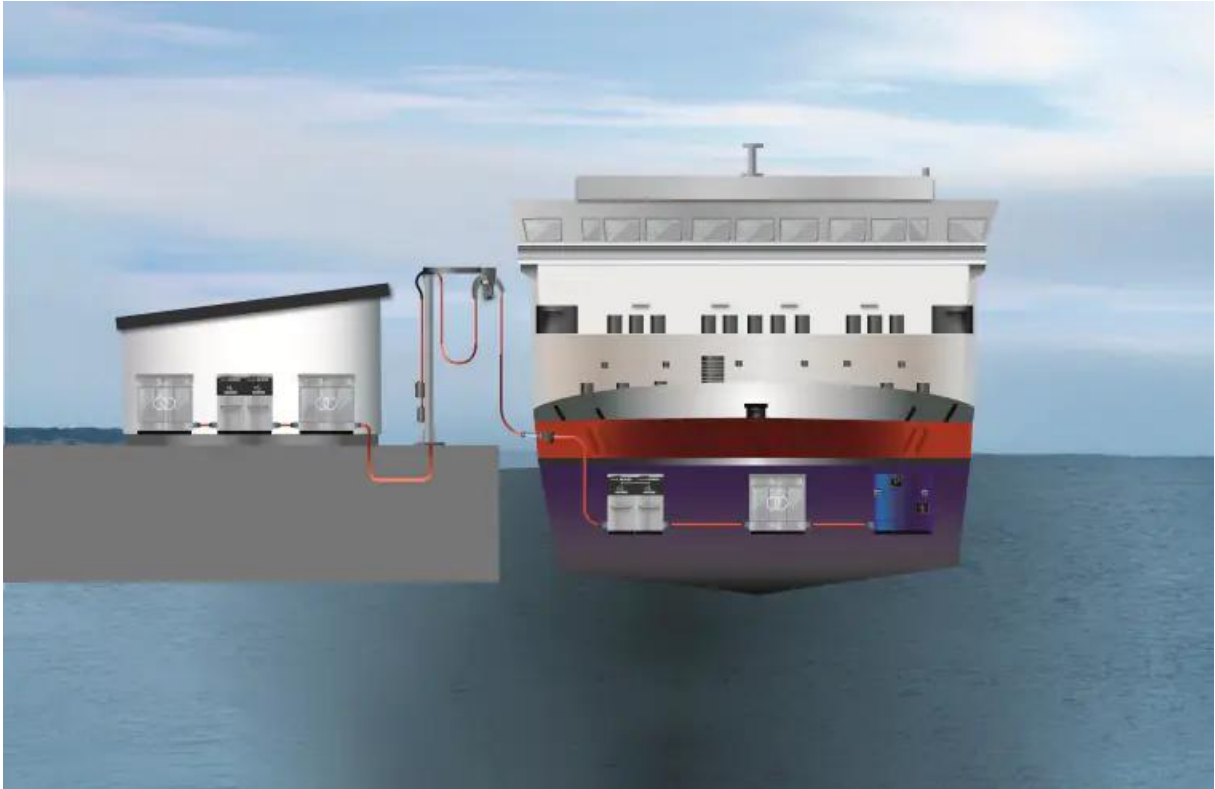
Em novembro de 2024 no Porto de Suape, Pernambuco, a Aliança promoveu o 1º Encontro ABDP, que reuniu especialistas e representantes do setor para debater soluções inovadoras para a sustentabilidade portuária. Dessa forma, a ABDP desempenha um papel fundamental na transição energética do setor portuário brasileiro, fortalecendo seu posicionamento no cenário global e garantindo que o país aproveite plenamente as oportunidades emergentes no campo da sustentabilidade (Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos, 2024).

3.2 Onshore power supply - OPS

Uma das alternativas para mitigar os problemas das emissões atmosféricas em portos e terminais é o uso do OPS (Figura 2). Sabe-se que ao atracar nos portos para realizar as operações de carga e descarga, os navios desligam o motor principal

e ativam os motores auxiliares para gerar energia elétrica e suprir as necessidades da embarcação.

Figura 2 – Ilustração de um modelo de OPS



Fonte: Actemium (2024).

Apesar de os motores auxiliares utilizarem combustível menos poluente que o óleo pesado, ainda assim emitem significativa quantidade de dióxido de carbono na atmosfera. Como alternativa para esse problema tem-se o *OPS*, sistema que se caracteriza pela possibilidade de fornecer energia elétrica de terra via cabo para o navio, este sistema permite que o navio, após sua atracação, desligue seus motores auxiliares (Motor de Combustão Auxiliar – MCA) e se alimente com energia elétrica proveniente de terra.

Segundo a International Maritime Organization (2012), o OPS é uma medida eficaz para a redução da emissão de dióxido de carbono e outros poluentes atmosféricos, contribuindo diretamente para a melhoria da qualidade do ar. Além disso, a adoção dessa tecnologia também resulta na diminuição de vibrações e ruídos,

promovendo um ambiente portuário mais sustentável e menos impactante para as comunidades adjacentes.

Conforme Abu Bakar (2023) e Ericsson (2008), os portos adaptados com esta tecnologia, em geral, possuem a seguinte configuração:

- a) **Subestação de Energia Terrestre:** Recebe, transforma e distribui a eletricidade para as embarcações. Em geral abrigam transformadores, sistemas de proteção e controle.
- b) **Transformadores e Conversores de Frequência:** As embarcações operam em diferentes frequências (50Hz ou 60Hz), dessa forma é necessário um converter a frequência, para compatibilizar o sistema de terra com o de bordo. Os transformadores seguem a mesma linha, ajustando a tensão, conforme os requisitos do navio.
- c) **Cabos e Conectores de Alimentação:** São cabos de alta potência, frequentemente **refrigerados** a ar ou líquido para evitar superaquecimento.
- d) **Painéis de Controle e Proteção:** Controlam e monitoram a distribuição de energia, garantindo a segurança do fornecimento, sistemas de controle remoto, relés de proteção, interfaces de operação, dentre outros.
- e) **Sistema de Gestão e Automação:** Permite o monitoramento em tempo real do consumo de energia, e o gerenciamento da distribuição. Incluem tecnologia IoT para análise preditiva e otimização do desempenho.

O *Onshore Power Supply* apresenta a versatilidade de conexão com diversas fontes de energia, sendo ideal a utilização de fontes renováveis. Conforme ilustrado na Figura 2, o sistema pode ser conectado à rede de distribuição proveniente de hidrelétricas, além disso, considera-se a implementação de EHub (Hub Energético) composto de sistemas híbridos que integram energia eólica, solar, biomassa, dentre outras, aumentando a sustentabilidade do fornecimento (Buonomano *et al.*, 2023).

Observa-se, ainda, que empresas têm desenvolvido soluções mais compactas para o OPS, utilizando contêineres e baterias. Essas inovações visam atender embarcações de menor porte de maneira mais flexível, proporcionando maior abrangência do sistema.

Este sistema é uma das soluções pensadas para auxiliar no processo de descarbonização portuária, e, tem sua eficácia comprovada, ainda que seja

parcialmente utilizado em uma operação. Observa-se este fato na pesquisa de Reusser e Perez (2021) que propuseram um sistema de controle bidimensional que combina o uso simultâneo do OPS com o MCA, o qual levaram ao mínimo o consumo específico de combustível do MCA. A simulação, realizada ao longo de 10 horas de operação em um navio-tanque, demonstrou que o modelo proposto reduz as emissões de CO₂ em 20%, SO_x em 30% e NO_x em 34%, evidenciando a eficácia da abordagem na mitigação dos impactos ambientais do setor marítimo.

No entanto esta ferramenta é acompanhada de alguns entraves, pois o custo representa um dos principais desafios para a sua implementação, uma vez que diversos fatores devem ser considerados, tais como qual tipo de tecnologia a ser empregada no OPS, se haverá necessidade de conversores de frequência, a distância entre as fontes de energia, o dimensionamento do cabeamento, os requisitos de manutenção, se há capacidade estrutural do píer para suportar os equipamentos, entre outros aspectos (Bullock *et al.*, 2023).

Segundo o The Port of Bremen (2023), os custos para a instalação de um sistema de OPS podem variar entre US\$ 1,05 milhão e US\$ 37 milhões, a depender das especificidades do terminal portuário. Considerando as necessidades operacionais do Porto de Bremen, que inclui terminais para navios de cruzeiro, transporte de frutas, embarcações *Roll-on/Roll-off* (Ro-Ro), contêineres e carga geral, o investimento estimado para a implementação do sistema foi de aproximadamente US\$ 36,4 milhões.

Conforme apontado por Kizielewicz (2024), outro desafio para a implementação do OPS é a falta de informações econômicas disponibilizadas pelos armadores sobre os benefícios dessa tecnologia. Além disso, o autor destaca a escassez de publicações que abordem a adaptação de navios em operação tanto para o uso do OPS quanto para a transição para combustíveis menos poluentes.

Uma das publicações que existem nesse contexto é a documentação desenvolvida pela International Association of Ports and Harbors (2010) e pela *World Port Climate Initiative*, que tem como objetivo orientar os Estados na adoção do OPS. Há também, o manual elaborado pela *High Voltage Shore Connection* que apresenta padrões técnicos para a instalação dessa tecnologia, auxiliando na padronização e viabilidade de sua implementação (Kizielewicz, 2024).

A nível mundial, o OPS tem sido utilizado com uma das ferramentas no processo de descarbonização portuária. Segundo Vital (2021), a Europa lidera no quantitativo de instalações portuárias com esta tecnologia, em seguida tem-se a América do Norte, visto que os Estados Unidos adotam esta tecnologia há décadas no âmbito militar, devido ao programa de “Conservação de Energia a Bordo de Navio Incentivado da Marinha” e, por fim encontra-se esta tecnologia também na Ásia. Porém não há registros do seu emprego com grande expressividade na América do Sul e nem no Brasil.

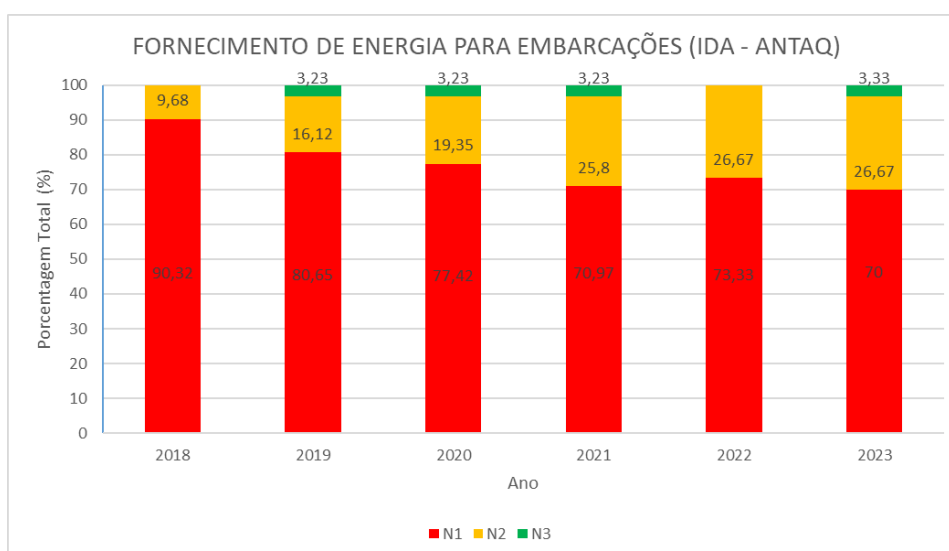
O fato da União Europeia (EU) estar à frente da inserção do OPS nos portos, poder atribuir-se ao fato de estar estruturando a sua regulamentação voltada para o uso dessa tecnologia. Conforme apontado por Wang *et al.* (2024), este movimento tem início com a *Alternative Fuels Infrastructure Directive* (Directive 2014/94/EU) que introduziu diretrizes para o desenvolvimento de infraestrutura de combustíveis alternativos, incluindo o OPS, embora sem caráter obrigatório. Essa lacuna foi superada pela *Alternative Fuels Infrastructure Regulation* (Regulation EU 2023/1804), que estabelece metas vinculantes, exigindo que portos da rede central TEN-T disponibilizem OPS até 2030. Complementarmente, a *FuelEU Maritime Regulation 2023* impõe que navios de passageiros e Ro-Pax com arqueação bruta igual ou superior a 5.000 dtw utilizem essa fonte de energia em pelo menos 90% das escalas em portos da UE, a partir do mesmo ano. Além disso, a inclusão do setor marítimo no *European Union Emissions Trading System* (EU ETS) a partir de 2024 amplia a pressão econômica por soluções de baixo carbono, consolidando o uso do OPS como estratégia prioritária de descarbonização portuária.

Segundo a pesquisa realizada Wang *et al.* (2023), três quartos dos *stakeholders* entrevistados acreditam que a imposição de novos limites de emissão de enxofre estimularia o uso do OPS, provocada por uma reação em cadeia, pois sabe-se que os combustíveis para atender um possível novo padrão não são produzidos em escala para atender a demanda do mercado, desta forma a alta procura aumentaria o valor do combustível, o GNL tampouco se apresentaria como uma alternativa viável, pois também não atenderia a demanda de procura do mercado, fazendo assim que optassem pelo uso do OPS. Bullock, Hoolohan e Larkin (2023) alega que a adesão ao OPS ganha forças quando atrelada a medidas dos governos para estimular o uso da tecnologia.

As iniciativas relacionadas ao OPS no Brasil são mapeadas pela ANTAQ, por meio do Índice de Desempenho Ambiental (IDA), o qual há o indicador “Fornecimento de Energia para Navios”. Este indicador aponta três níveis de desenvolvimento: **N1** – Não possui OPS, **N2** – Realizou estudo de viabilidade para implementação do OPS e **N3** – Dispõem de Sistema OPS (Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2023).

Como é possível ver no relatório extraído da página da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2023) entre 2014 e 2023 houve uma crescente no estudo para a implantação do OPS, tal fato vai ao encontro do movimento feito pela comunidade científica. O Gráfico 2 aponta também que em alguns anos parecem registros de instalações portuárias que dispõem do sistema, no entanto, esta informação deve ser revista, pois em contrapartida, segundo o Diagnóstico de Descarbonização, Infraestrutura e aplicações do Hidrogênio nos Portos (2023) feito pela *Deutsche GIZ*, o qual foi encomendado pelo ANTAQ, aponta que a tecnologia ainda não foi implementada em nenhum TUP ou Porto Público.

Gráfico 2 – Fornecimento de energia para embarcações ao longo do tempo, pelos Portos Brasileiros



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2023).

A pontuação no IDA configura-se como único incentivo para a implementação do OPS no Brasil. No mesmo contexto foi instituída a Portaria Nº 58,

de 24 de janeiro, que consiste na Política de Sustentabilidade do Ministério de Portos e Aeroportos, onde formaliza diretrizes, objetivos, pilares e instrumentos para sustentabilidade e a boa governança ambiental, climática e social nos setores portuário, aquaviário, aeroviário e aeroportuário.

A portaria visa institucionalizar o compromisso do ministério com as práticas sustentáveis e se alinhar aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS, da agenda de 2030. No que concerne o OPS não há nenhuma citação direta, porém elenca a necessidade de promover a agenda de descarbonização no setor portuário e institui o programa “Pacto pela Sustentabilidade” o qual premia corporações que adotam práticas ambientais, sendo um dos eixos voltado para a descarbonização, transição energética e emprego de novas tecnologias.

4 METODOLOGIA

A investigação para a execução deste estudo adotou uma abordagem combinada, integrando pesquisa bibliográfica e pesquisa de campo. Como discutido previamente a revisão bibliográfica, permitiu compreender as metodologias internacionalmente empregadas para estimar o potencial de emissão de CO₂. No entanto, para analisar a aplicação dessas metodologias no contexto local, tornou-se necessária a realização de pesquisas de campo, abrangendo desde profissionais marítimos até gestores portuários.

Em 2023, foram feitas diversas abordagens em navios com foco em compreender a relação entre o consumo de combustível dos motores auxiliares e o fluir da operação de estivagem ou desestivagem, conforme ilustrado na Figura 4.

Durante o processo houve muita dificuldade para levantar essas informações, tendo em vista que são dados sensíveis, pois possuem caráter estratégico para a negociação de contratos de afretamentos. Pontua-se que inicialmente maior parte dos navios visitados não cederam informações, então foi mudada a abordagem com a tripulação, no qual, estrategicamente iniciou-se as conversas com perguntas mais genéricas, leves ou pessoais, criando um ambiente de confiança, para só depois ir afunilando para perguntas mais diretas, essa técnica se mostrou eficaz, porém demanda muito mais tempo.

Para aumentar ainda mais a confiabilidade e a aceitação por parte dos comandantes e, assim, viabilizar a concessão de informações, foram elaboradas duas cartas de compromisso que foram entregues aos navios durante as abordagens. A primeira carta (à esquerda da Figura 3) formaliza o compromisso de que os dados serão utilizados exclusivamente para fins científicos nesta dissertação, assegurando o anonimato do navio. Já a segunda carta solicita informações sobre a geração de energia dos motores auxiliares no período entre atracação e desatracação, além dos valores de consumo de combustível, registrados a cada hora ou sempre que houver uma mudança significativa.

Figura 3 – Carta de solicitação de dados

 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO CENTRO CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE Mestrado Profissional em Energia e Ambiente  LETTER OF DATA REQUISITION I come through this letter to request a help to the vessel, in the construction of my master's dissertation. The cooperation would be through the provision of data relating to the operation in the Port of Ponta da Madeira. The project aims to contribute with the energy transition and port decarbonization process. Which aims to analyze the potential for power generation of auxiliary engines during the operation. This way will be possible to stipulate the amount of electrical energy that ship needs to maintain its active functions. Through this data will be possible to develop projects to supply green energy to ships while moored. Data necessary for research: • Diary of power generation, between berthing and unberthing. • Fuel Oil or Diesel Oil consumption during this time. • If possible, per hour, or in the gap that the vessel collect data, because will be possible to generate graphs. Thank you very much in advance for your attention. São Luís, September 22th, 2023  Documento assinado digitalmente VITOR RENATO PEREIRA SANTOS CPF: 030808580-00 / 03/09/2005 Assinatura em https://lattes.cnpq.br/0000000000000000 Name/Student Signature	 UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO CENTRO CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE Mestrado Profissional em Energia e Ambiente  CONFIDENTIALITY AGREEMENT Vitor Renato Pereira Santos, 33 years, master's degree student at Pós-graduation Program in Energy and Environment at the Federal University of Maranhão (UFMA), I declare that the information provided will be used only for scientific purposes and construction of my dissertation entitled: ANALYSIS OF THE ENERGY DEMAND OF BULK SHIPS DURING THE PERIOD OF OPERATION IN THE PORTS OF ITAQUI AND PONTA DA MADEIRA. I commit to: 1. Keep all research information secure. 2. Do not attribute the name of the ship to the graphics displayed in the dissertation. 3. Make the final dissertation available to the company if requested. São Luís, September 22th, 2023  Documento assinado digitalmente VITOR RENATO PEREIRA SANTOS CPF: 030808580-00 / 03/09/2005 Assinatura em https://lattes.cnpq.br/0000000000000000 Name/Student Signature
---	---

CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO BACANGÁ - PRÉDIO DO CCET
AV. DOS PORTUGUESES, S/N - CEP 66085-880, SÃO LUÍS - MARANHÃO
Fone: (98) 3272-9279, apga@ufma.br

CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO BACANGÁ - PRÉDIO DO CCET
AV. DOS PORTUGUESES, S/N - CEP 66085-880, SÃO LUÍS - MARANHÃO
Fone: (98) 3272-9279, apga@ufma.br

Fonte: O autor, a partir de dados da pesquisa.

Um dos desafios observados durante as abordagens foi a forma de registro dos dados nas embarcações. A maioria dos navios anota manualmente, em seus diários de bordo, apenas os valores agregados de geração de energia e consumo de combustível ao longo do dia, sem segmentação detalhada. Embora essas informações possam ser visualizadas em tempo real, permitindo que a tripulação intervenha imediatamente em caso de anomalias. Os dados segmentados não são armazenados em sistemas computadorizados. A ausência desse registro digital impede análises retrospectivas mais detalhadas e limita a possibilidade de estudos posteriores sobre o desempenho operacional da embarcação (Figura 4).

Figura 4 – Visita Técnica a bordo de um navio



Fonte: O autor, a partir de dados da pesquisa.

Após a realização das visitas na área operacional, iniciou-se o levantamento quantitativo das operações portuárias ocorridas entre 2022 e 2024. Para esse fim, amparado pela Lei nº 10.217, de 23 de março de 2015, que garante o acesso a informações no âmbito do Estado do Maranhão, utilizou-se o Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão (e-SIC). Por meio dessa ferramenta, foi estabelecido contato com a Ouvidoria da Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP), que disponibilizou os dados em um curto período.

Conforme o interesse da pesquisa foram cedidas informações referentes a todas as operações portuárias que houve entre janeiro de 2022 e dezembro de 2024, em específico recebemos o Nº de entrada, que consiste na identificação da operação, o berço de atracação, número IMO do navio, o deadweight (dwt), o horário de atracação e desatracação, a carga movimentada e natureza da carga. Através destes dados foi possível compreender o porte do navio, qual o tipo do navio e o tempo de permanência dele no berço (Quadro 2).

Quadro 2 – Dados fornecidos pela EMAP

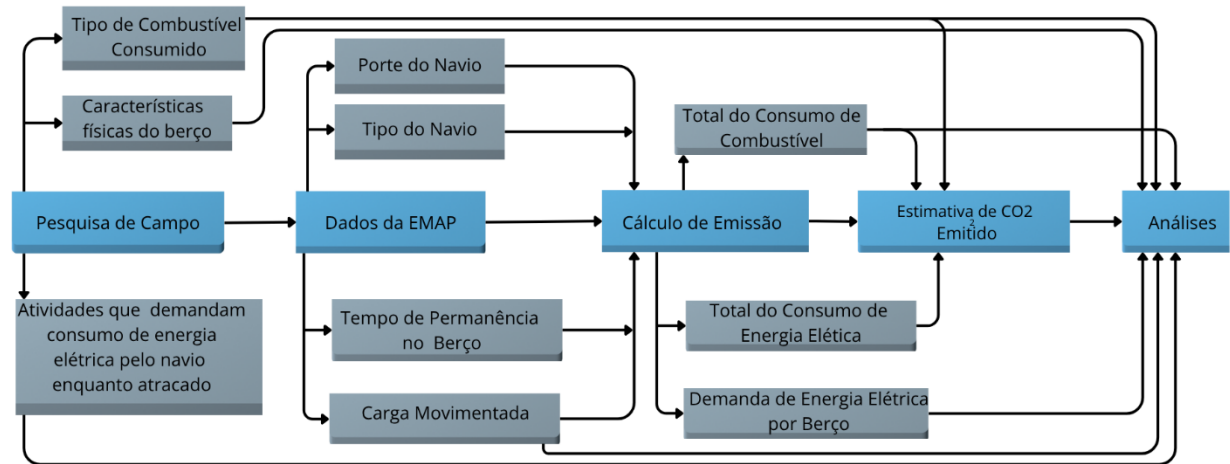
Nº ENTRADA	BERÇO	NAVIO	IMO	DTW	ATRACAÇÃO	DESATRACAÇÃO	CARGA
996	104	ELANDRA PALM	9746267	49990	30/12/2022 21:39	01/01/2023 00:52	GASOLINA
987	108	PS SINGAPORE	9828156	49999	27/12/2022 11:18	01/01/2023 08:20	GASOLINA
995	102	FORTE DE COPACABANA	9268681	8843	30/12/2022 21:27	01/01/2023 13:48	GLP
994	103	SIFNOS	9456379	57050,3	30/12/2022 08:44	02/01/2023 10:26	MILHO
997	106	PACCHA	9512185	50091	31/12/2022 21:55	03/01/2023 10:27	DIESEL
990	99	JAMAICA BAY	9610717	37633,1	27/12/2022 19:26	03/01/2023 14:40	FERTILIZANTE
5	102	GRANDIS	9824980	62353,15	02/01/2023 23:00	03/01/2023 23:25	CELULOSE
993	105	NORDIC OLYMPIC	9727118	76180	30/12/2022 08:28	03/01/2023 23:52	FERRO GUSA

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados da Emap.

Ressalta-se que esta dissertação integra o Projeto Conexão Verde, cujo foco é a redução da emissão de gases de efeito estufa por meio da implementação do *Onshore Power Supply* no Porto do Itaqui. Em razão desse envolvimento, foi possível estabelecer um diálogo com a *Fundación Valenciaport*, instituição de renome internacional responsável pelo plano de descarbonização do Porto do Itaqui. Essa colaboração viabilizou debates sobre a metodologia adotada e a análise dos dados obtidos, contribuindo para a fundamentação e aprimoramento deste estudo.

Ainda no âmbito metodológico, é fundamental compreender as particularidades das operações portuárias no Porto do Itaqui, a fim de aplicar adequadamente a metodologia proposta para estimar as emissões de CO₂ no contexto local e interpretar corretamente os resultados obtidos. Para isso, os tópicos a seguir abordam as características físicas dos berços de atracação, a dinâmica da estadia das embarcações no porto, o consumo de energia em função do porte dos navios e do tipo de carga transportada, bem como o tipo de combustível utilizado pelos motores auxiliares durante o período em que permanecem atracados. Conforme o fluxograma abaixo, é possível observar como essas informações se complementam, seguindo a base metodológica adotada (Figura 5).

Figura 5 – Estrutura Metodológica



Fonte: Dados da pesquisa realizada pelo autor.

4.1 Porto do Itaqui

O Porto do Itaqui, situa-se em São Luís – MA, dentro da Baía de São Marcos. Está classificado entre os principais portos públicos do Brasil, teve sua construção iniciada em 1960. No entanto, sua operação efetiva começou apenas em 1972, após diversas intervenções para solucionar problemas estruturais. Ao longo de seus 52 anos de existência, o porto passou por mudanças significativas em sua gestão. Em 2010, a administração foi transferida da Companhia Docas do Maranhão (CODOMAR) para a EMAP. O Porto do Itaqui conta com nove berços de atracação em plena operação, além do berço 98, que está em construção e tem previsão de conclusão para 2026 (Figura 6) (Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2023a).

Figura 6 – Linha do tempo da Construção do Porto do Itaqui



Fonte: O autor, a partir de dados da pesquisa.

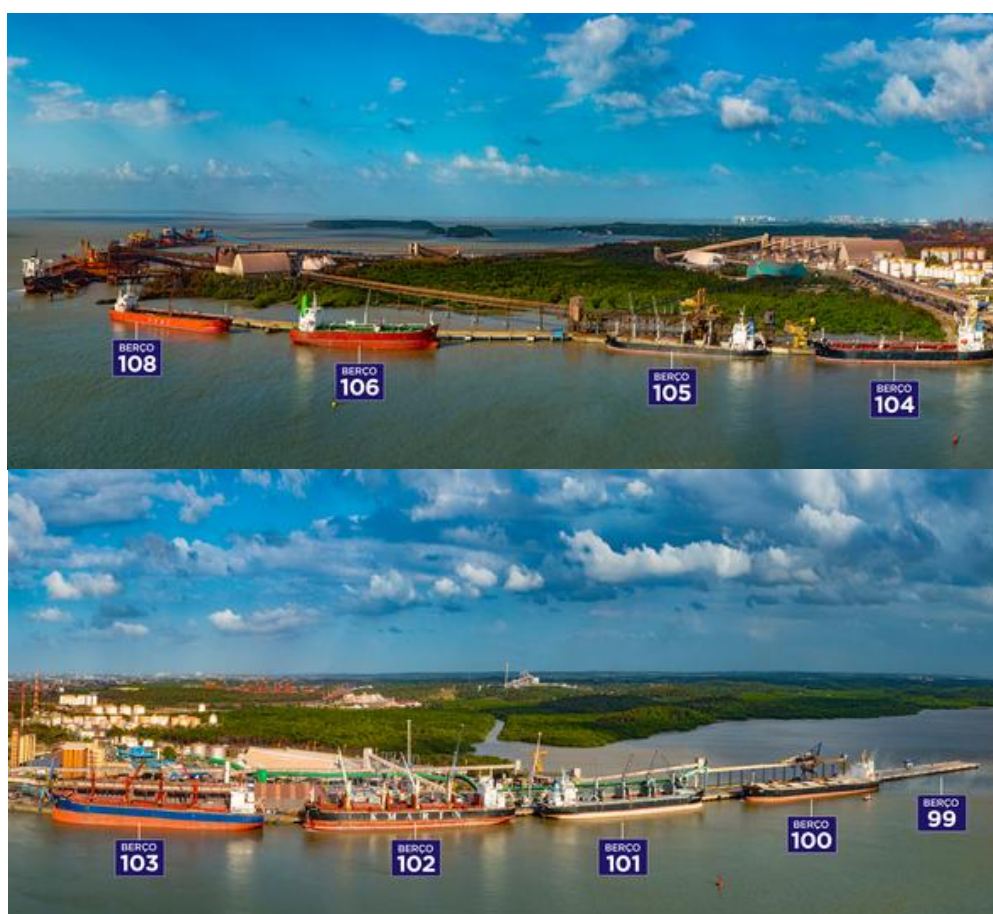
O Porto do Itaqui destaca-se no cenário portuário brasileiro devido à sua posição geográfica estratégica. Em comparação com os portos das regiões Sul e Sudeste do Brasil, as rotas para os portos da Europa e da América do Norte podem ser até seis dias mais rápidas. Além disso, a proximidade com o Canal do Panamá proporciona vantagens adicionais ao atender o mercado asiático (Governo [...], 2024).

O Porto do Itaqui possui conexão rodoviária direta apenas com a BR-135. Entretanto, sua integração ferroviária é mais ampla, abrangendo a Ferrovia

Transnordestina e a Estrada de Ferro Carajás, que, por sua vez, permitem ligação com a Ferrovia Norte-Sul, estendendo o alcance logístico até o Porto de Santos. No que diz respeito à hinterlândia, o Porto do Itaqui não se limita à região do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), mas também alcança estados como Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais e o Distrito Federal, consolidando-se como um importante polo de escoamento de produção agrícola e industrial.

Outro fator relevante que confere vantagem competitiva ao Porto do Itaqui é a profundidade de seus berços, que varia entre 12 e 19 metros na maré baixa. Essa característica permite a atracação de navios com calado de até 18,5 metros e capacidade de carga (*deadweight*) de até 155.000 toneladas. A possibilidade de operar embarcações de grande porte favorece o transporte de maiores volumes de carga por viagem, resultando em uma redução significativa no custo do frete por tonelada, o que reforça sua competitividade no mercado logístico (Figura 7) (Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2023b).

Figura 7 – Imagem dos Berços do Porto do Itaqui em 2022



Fonte: Empresa Maranhense de Administração Portuária (2023b).

O Berço 99, construído pela Suzano e inaugurado em 2022, tem como principal carga a celulose, mas também opera com outros tipos de carga, como fertilizantes, ureia e trigo. Projetado para atender navios graneleiros e de carga geral, o berço possui 264 metros de comprimento e 15 metros de profundidade (Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2023b, 2025).

O Berço 100 conta com uma superestrutura equipada com um sistema de correias transportadoras do Terminal de Grãos do Maranhão (TEGRAM), especificamente projetado para o carregamento de grãos sólidos. Predominantemente, são movimentadas cargas como trigo, arroz, milho e soja. Além disso, o berço também opera com outros produtos, como fertilizantes, celulose e trilhos. Com 320 metros de comprimento e 15 metros de profundidade, o Berço 100 se destaca por sua capacidade de atender demandas logísticas diversificadas e de grande escala (Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2023b, 2025).

De acordo com a *Revista Portos e Navios*, o Berço 101 é equipado com uma correia transportadora que conecta o cais ao armazém da Companhia Operadora Portuária do Itaqui (COPi), sendo especializado na movimentação de fertilizantes. Além disso, conta com guindastes móveis e moegas, que aumentam significativamente sua capacidade operacional. Embora predominantemente dedicado a fertilizantes, operações com outras mercadorias no Berço 101 são raras. A infraestrutura do berço inclui 223 metros de comprimento e 12 metros de profundidade, reforçando sua funcionalidade para cargas específicas (Terminal [...], 2023).

Reformado em 2022, o Berço 102 possui 223 metros de comprimento e 12 metros de profundidade. Destaca-se por sua versatilidade em comparação com outros berços, pois é capaz de operar navios gaseiros, tanques e de carga geral. Contudo, em 2023, mais da metade das operações realizadas no berço foram destinadas a navios graneleiros, que movimentaram cargas como carvão, fertilizantes, clínquer, milho e trigo, entre outros (Emap [...], 2022).

No atual momento é utilizado, prioritariamente pelo consórcio TEGRAM, o Berço 103 está equipado com um carregador de navios com tromba telescópica, projetado especificamente para a movimentação de grãos sólidos. Conta também com um sistema de correias transportadoras que conecta o armazém ao cais, permitindo o transporte eficiente de cargas como farelo de soja, milho e soja. Embora seja especializado em grãos sólidos, também foram registradas operações

ocasionais com locomotivas e fertilizantes. O Berço 103 possui 270 metros de comprimento e 15 metros de profundidade (Emap [...], 2022).

O Berço 104 é operado prioritariamente pela Petrobras Transporte S.A. (TRANSPETRO), que detém exclusividade nas atracações. Embora tenha capacidade para movimentar cargas de projeto, cargas unitizadas e granéis, em 2023 operou exclusivamente granéis líquidos, como GLP, gasolina e diesel. Um marco significativo nesse período foi a primeira movimentação de sebo bovino, realizada pela Granel Química, que investiu em infraestrutura específica para armazenar, transportar e exportar esse produto, conforme reportado pelo Governo do Maranhão (Maranhão, 2024). O berço conta com 200 metros de comprimento e 13 metros de profundidade.

O Berço 105, o segundo mais profundo do Porto do Itaqui, possui 18 metros de profundidade e 280 metros de comprimento. Suas operações atendem predominantemente empresas como VALE, Valor da Logística Integrada (VLI) e Bunge, com a movimentação de cargas como soja, ferro-gusa, cobre e manganês. Além disso, o berço realiza, em menor escala, operações de abastecimento de bunker (Emap [...], 2022).

Os Berços 106 e 108 possuem, respectivamente, 19 metros e 15 metros de profundidade, com comprimentos de 340 metros e 300 metros. Ambos foram projetados exclusivamente para a movimentação de granéis líquidos, com destaque para combustíveis, QAV (querosene de aviação) e soda cáustica, sendo suas estruturas inadequadas para o manuseio de outros tipos de carga. Segundo a EMAP, em julho de 2023, o Berço 106 realizou sua primeira operação de *ship to ship*, coordenada pela TRANSPETRO, com a movimentação de 18 mil toneladas de petróleo (Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2023c).

4.2 Estadia do navio no Porto do Itaqui

A estivagem e desestivagem de cargas em navios é um processo logístico que ocorre por meio do somatório de atividades interligadas que passam por atividades manuais, içamento de carga, arqueação, arrumação da carga nos porões e elaboração das documentações (Rojas, 2014).

As operações portuárias variam conforme o tipo de carga, tipo de navio e superestrutura oferecida pelo terminal, logo, estas características tornam as operações únicas. Ainda que o mesmo navio descarregue sempre a mesma

demurrage e enquanto ocorre toda essa espera, todos os navios da cadeia estão gerando a emissão de CO₂, estando ele atracado ou na área de fundeio.

4.3 Embarcações

O transporte aquaviário é o modal mais utilizado no comércio internacional de mercadorias. Esse predomínio deve-se à sua capacidade de transportar grandes volumes de carga por viagem, fator que impacta positivamente na redução dos custos com frete. Além disso, esse modal apresenta versatilidade, sendo adequado para o transporte de diferentes tipos de mercadorias (Rojas, 2014).

As embarcações são classificadas em diferentes categorias, de acordo com sua finalidade, tais como navios militares, embarcações de apoio marítimo e navios de passageiros. O presente estudo tem como foco os navios mercantes, nomenclatura dada aos que são utilizados para a movimentação comercial de cargas, o qual é a atividade do Porto do Itaquí. Segundo David (2017), existem mais de 50 mil navios mercantes em operação, registrados em mais de 150 países, os quais geram diretamente mais de 1 milhão de empregos. Além da finalidade em relação à atividade, outra classificação fundamental é em relação ao porte e o tipo de carga que transportará.

4.3.1 Porte dos navios

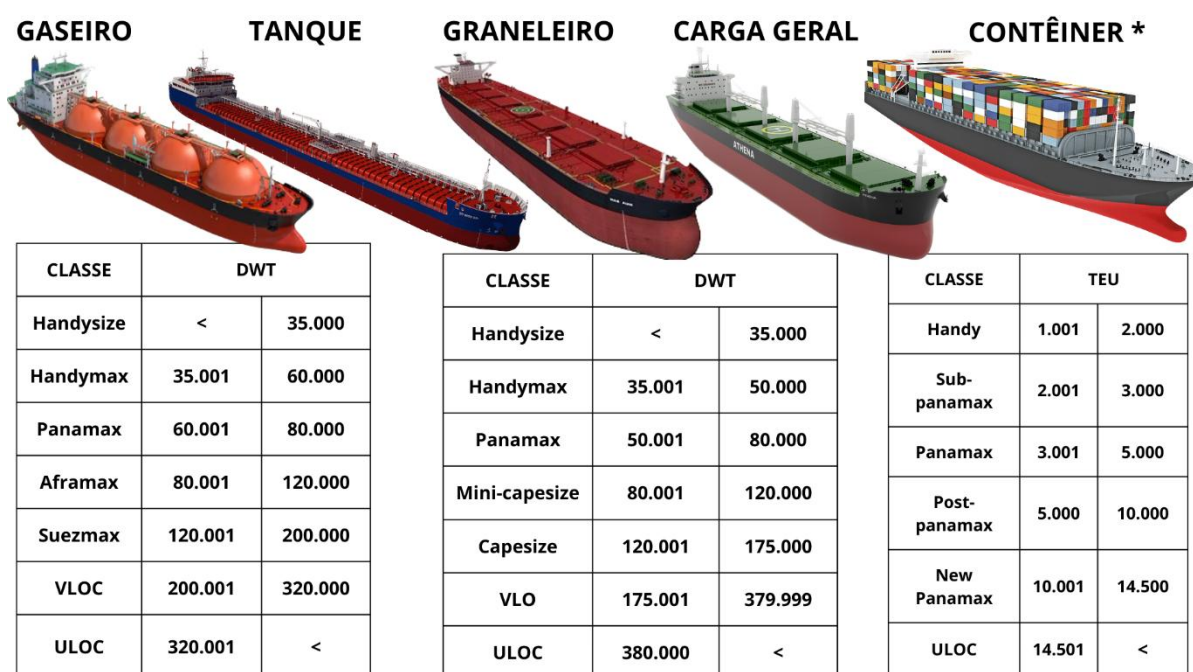
O porte está diretamente ligado à quantidade em volume (m³) ou peso (T) de carga que a embarcação tem a capacidade de transportar, isto porque varia muito a densidade entre as cargas, logo um carregamento de minério de ferro atinge primeiro a capacidade máxima de peso antes do volume, em contrapartida um carregamento de soja alcança primeiro o volume. Este fator impacta na decisão de afretamentos, determinação de rotas comerciais e escala nos portos.

Porém, para padronizar a categorização das embarcações, o comércio marítimo adota o *dead-weight tonnage* (DWT), esta medida é feita a partir da diferença entre o deslocamento de água provocado pelo navio totalmente carregado menos o navio vazio. Dentre as cargas do navio, consideram-se os combustíveis, suprimentos, móveis e a mercadoria do cliente (David, 2017).

Particularmente, para navios destinados ao transporte de contêiner, a classificação se dá a partir da quantidade de contêiner que consegue transportar. Um contêiner padrão possui 20 pés de comprimento e 8 pés de largura e altura, desta forma utiliza-se o *Twenty-foot Equivalent Unit* (TEU) como nomenclatura para classificar estes navios (Descartes Datamyne do Brasil, 2023).

Segundo o *Plano Mestre do Complexo Portuário do Itaquí*, considera-se a seguinte divisão abaixo para classificar os navios que no porto atracam (Brasil; Universidade Federal de Santa Catarina (2018) (Figura 9).

Figura 9 – Classificação dos navios conforme o tamanho e o tipo



Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados da pesquisa.

4.3.2 Tipo de navio

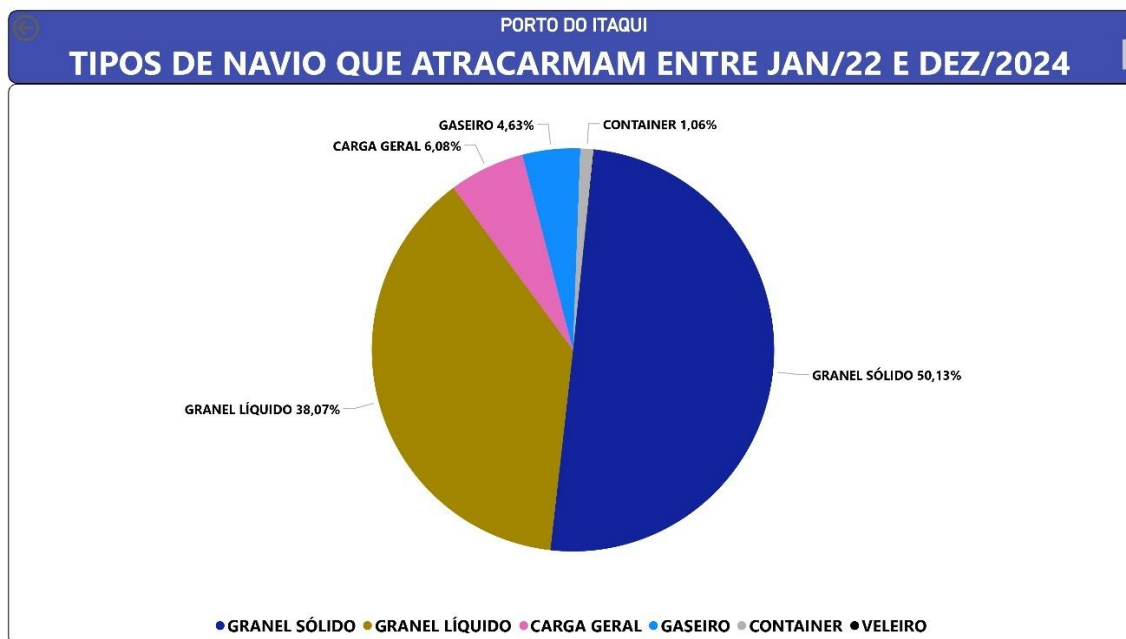
Como é possível ver na Figura 9, além de serem classificados conforme o seu tamanho, os navios também são agrupados de acordo com a carga a qual foram projetados para transportar. A primeira grande diferença está entre navios que carregam cargas secas e líquidas. Dentre os que carregam carga seca, há a diferenciação se a carga é transportada a granel, em lingadas ou em contêineres.

Sob a ótica de Fonseca (2019), na obra Arte Nava, os tipos de navios que operam no Porto do Itaquí são:

- a) **Carga Geral (Cargueiros):** São embarcações versáteis, pois podem carregar diferentes tipos de carga. Em geral são cargas unitizadas, acondicionadas em paletes, sacas, caixotes, bobinas ou lingadas. No entanto, estes navios também são capazes de transportar cargas de projetos, com as mais variadas formas e dimensões. Devido esta pluralidade, em geral, são equipados com pau-de-carga;
- b) **Porta Contêiner (Navios de carga modular):** Como o próprio nome sugere, são navios projetados para o transporte de contêiner, cujo tamanhos são padronizados, podendo ser de 20 ou 40 pés. Majoritariamente transportam produtos industrializados ou que já completaram o ciclo de produção, como: eletrônicos, equipamentos, roupas ou gêneros alimentícios;
- c) **Graneleiros:** São embarcações destinadas para o transporte de carga seca a granel. As cargas são estivadas diretamente nos porões do navio, sem nenhum tipo de embalagem, assim tem como característica porões com fundo reforçado e paredes bem elevadas;
- d) **Navios Tanques e Petroleiro:** São navios utilizados para o transporte de carga líquida a granel. Ao invés de escotilhas são equipados com tanques. Navios petroleiros podem transportar somente petróleo e seus derivados enquanto navios tanques podem transportar óleos, produtos químicos ou outras cargas sensíveis;
- e) **Gaseiros:** São voltados para o transporte de gases liquefeitos. Sua principal característica são tanques em formato arredondado, com o objetivo de distribuir a pressão interna. Estas cargas são transportadas sob alta refrigeração e pressão, podendo chegar até 259°F.

Nos últimos três anos no Porto do Itaquí operaram navios tanques, gaseiros, graneleiros, de carga geral e até 2022 atracaram navios de contêiner. Conforme consta no Gráfico 3, aproximadamente 50% das operações foram voltadas para o transporte de granel sólido, seguido de granel líquido, carga geral, gás e contêiner.

Gráfico 3 – Atracações no Porto do Itaquí por tipo de navio



Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados fornecidos pela EMAP.

Esta proporção se dá devido as características comerciais do Porto do Itaquí, o qual possui três berços voltados para a movimentação de granel líquido e a presença do TEGRAM e VLI que são empresas com forte atuação na movimentação de grãos.

4.4 Combustível Consumido pelos navios

Baseados nas projeções de emissão de GEE apontadas pela comunidade científica, a IMO, determinou que a partir de 1º de janeiro de 2020 os combustíveis utilizados em navegação de longo curso contivessem até 0,5% de teor de enxofre. Levando em conta o novo direcionamento da IMO, os navios são obrigados a adotar combustíveis como o MGO, MDO ou o *Low-sulfur Fuel Oil* (LSFO), porém caso a embarcação ainda persista em utilizar o *Hifh-sulfur Fuel Oil* (HSFO), que contém alto teor de enxofre, deve haver a bordo o sistema de tratamento dos gases (*scrubber*), para conter os poluentes gerados (Sousa *et al.*, 2020).

Segundo o informe técnico de combustíveis marítimos da Petrobras (2021), o HSFO e LSFO são utilizados nos motores voltados para a propulsão enquanto o MGO e MDO são principalmente utilizados nos sistemas auxiliares, direcionados para

a geração de energia, por serem motores de quatro tempos com alta velocidade de rotação.

Conforme Casseres (2018), é necessário diferenciar o MGO do MDO, pois o marine gasoil, é um combustível oriundo exclusivamente de frações destiladas, em contrapartida o marine diesel oil, tem uma qualidade menor por ser uma mistura do MGO e HSFO. Porém, salienta-se que para fins de cálculos estimativos, o 4º GHG Study da IMO consideram ambos com o mesmo coeficiente de emissão e mesma relação no consumo específico no motor auxiliar (a serem apresentados nos Quadros 3 e 4).

4.5 Consumo de energia do navio

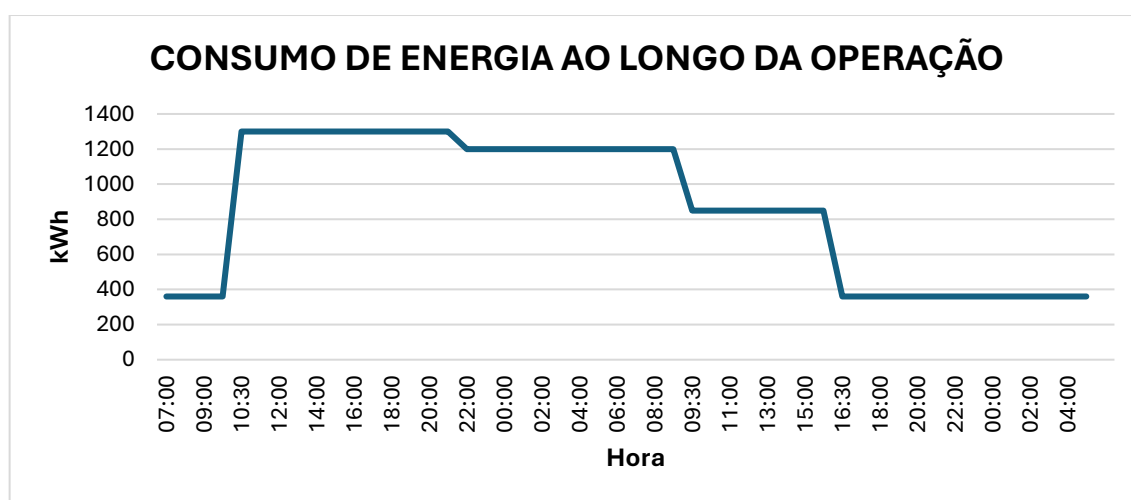
Enquanto ocorre a operação portuária para carga e descarga do navio, concomitante a embarcação necessita manter suas funções internas, que são tanto industriais como de hospedagem para a tripulação e consistem em: controle do lastro, controle das bombas hidráulicas, deixar ativos os equipamentos de emergência, manter em operação os guindastes, bem como a movimentação das tampas dos porões e a tensão nos cabos de amarração, deve-se garantir o funcionamento dos computadores, sistema de comunicação, a refrigeração do ambiente, iluminação, etc. Existe, portanto, uma sistemática que deve ser preservada, uma vez que para entrar em funcionamento, necessita de energia elétrica que é gerada pelo próprio navio.

Conforme Casseres (2018), normalmente a energia elétrica consumida a bordo dos navios é fruto de geradores conectados a motores de combustão interna, que são chamados de motores de combustão auxiliar (MCA), o motor relacionado à propulsão atribui-se o nome de motor principal (MP). Enquanto o navio está atracado, a energia elétrica é suprida pelos MCA e durante a navegação a geração é dividida com o MP.

Ainda que exista uma gama de registros *pela Lloyd's PC Register of Ships* e outros institutos, a maioria ainda não tem publicamente informação sobre os MCA. Dessa forma, a comunidade científica considera a sua potência como uma parcela da potência do motor principal, essa porcentagem irá variar de acordo com o *deadweight* e ao tipo do navio em relação à carga (Vidal, 2021).

No Gráfico 4 é ilustrado o perfil do consumo de energia não acumulado por hora, ou seja, a potência média horária, de um navio visitado durante a pesquisa de campo em uma operação de carregamento de granel sólido entre a atracação e desatracação. O gráfico abaixo foi construído através da cooperação do chefe de máquinas do navio que anotou em um papel a variação da geração de energia dos motores auxiliares a cada hora e a cada momento que houve uma variação significativa. O navio em questão atracou por volta da 07:00h, porém não iniciou o carregamento de imediato, que deu-se por volta das 11:00 horas, momento esse em observa-se um pico no gráfico, provocado pela necessidade de começar o deslastre do navio, que é executado por um conjunto de bombas, assim, conforme o carregamento foi progredindo e o lastro finalizando, menos foi exigido das bombas, até que entre 16:00h e 17:00 horas do dia seguinte o deslastre já foi praticamente finalizado, nesse intervalo, acontece o processo de *stripping*, momento em que as bombas principais não conseguem mais extrair a água e o residual é retirado por uma bomba menor, a mesma que é usada no sistema de refrigeração. Visualiza-se, então, que o consumo de energia é relativo ao progresso da operação.

Gráfico 4 – Perfil de consumo de energia ao longo do carregamento



Fonte: O autor, a partir de dados da pesquisa.

Na situação acima, o fator principal para o consumo de energia elétrica do navio são as bombas de lastro, que têm a função de retirar água dos tanques de lastro com a finalidade de manter a estabilidade e os esforços da estrutura dentro do limite aceitável, enquanto, o navio carrega. Essa é uma característica presente nos navios

de granel sólido, quando são carregados com altos fluxos de tonelada de carga por hora.

Os navios de granel líquido que operam no Porto do Itaquí apresentam características diferentes, pois em geral chegam carregados, então, a maior parte da geração de energia vai para alimentar as bombas que retiram os combustíveis dos tanques, os quais começam as operações com 3 Bar de pressão, podendo chegar até 07 Bar. E os navios de carga geral e de contêiner destinam a maior parte da sua energia para alimentar os guindastes, considerando que em certos contratos o equipamento do navio é poupado e são utilizados os equipamentos do porto.

É fundamental compreender como o navio se comporta durante a operação e em qual categoria se enquadra, conforme o tamanho da embarcação e o tipo de carga movimentada, pois são fatores que irão determinar o consumo de energia e, consequentemente, o potencial de emissão de CO₂ enquanto atracado.

4.6 Estimativa de emissão

Para o desenvolvimento deste trabalho foi elaborado um levantamento bibliográfico elencando pesquisas que abordavam os métodos para estimar a emissão de CO₂ pelos navios enquanto atracados, assim destacamos trabalhos como Abu Bakar (2023), Defra Report (Entec, 2010), Ericsson (2008), *Fourth GHG Study* (International Maritime Organization, 2020), Moreno-Gutiérrez *et al.* (2015), e *Third GHG Study* (International Maritime Organization, 2015). Em todos estes, o ponto convergente está na dificuldade em obter-se informações a respeito da característica dos motores principais e auxiliares, principalmente os dados de potência e perfil de consumo, por se tratar de informações que são estratégicas comercialmente. Porém que são cruciais para estimar o potencial de emissão por embarcação.

Constata-se diversas metodologias para estimar o potencial de emissão, porém neste trabalho foi adotada a do *Fourth GHG Study* (International Maritime Organization, 2020), o fator preponderante para escolha se deve pelo fato de ser um estudo elaborado pela IMO, que é o maior órgão regulamentador internacional em atividades marítimas, dessa forma o trabalho publicado pela IMO é mais abrangente na amostragem de embarcações. Ressalta-se ainda que a partir de janeiro de 2019 a IMO determinou que todas as embarcações com dwt acima de 5.000t deverão fornecer dados de consumo de combustível, distância percorrida e horas de

navegação no *Data Collection System* (DCS). Estes dados são utilizados para calcular o *Carbon Intensity Indicator* (CII) e o SEEMP. Por fim, a IMO é o órgão que consegue reunir o maior número de ferramentas, informações e aponta o direcionamento para as metas de redução de emissão de CO₂ baseado em suas projeções.

Para estimar as emissões de CO₂ o *Fourth GHG Study* (International Maritime Organization, 2020) utiliza o seguinte raciocínio para o intervalo de tempo enquanto atracado: primeiro estima-se o consumo de energia elétrica do navio (Equação 1), em seguida estima a quantidade de combustível que foi consumido pelos motores auxiliares para gerar energia elétrica (Equação 2) e por fim, converte o montante de combustível em potencial de emissão de CO₂ através do fator de emissão do combustível utilizado pelo navio (Equação 3).

$$P_{Ci} = P_{auxi} \times LF \times t_i^{berth} \quad (1)$$

$$FC_i^{berth} = P_{Ci} \times SFOC_i^{aux} \quad (2)$$

$$TE_{\varepsilon i} = \sum FC_i^{berth} \times EC_n^{diesel} \quad (3)$$

i – categoria do navio	P_{aux} – Potência Auxiliar (kW)
PC – Consumo de energia (kWh)	$SFOC_{aux}$ – Consumo específico do motor auxiliar (g/kWh)
LF – Fator de carga (%)	
t_{berth} – Tempo atracado (h)	TE_{ε} - Emissões Liberadas (t)
FC – Consumo de combustível (t)	EC^{diesel} – Coeficiente de emissão do óleo diesel (g CO ₂ /g Combustível)

4.6.1 Potência do Motor Auxiliar (P_{aux})

Como anteriormente mencionado, esta informação é um dos gargalos neste cálculo por serem escassas. A IMO vem de uma longa caminhada até obter os resultados divulgados. Inicialmente no *Second GHG Study* (International Maritime Organization, 2009) baseou-se nos dados obtidos pela companhia IHS. Posteriormente, ainda no *Second GHG Study* foram utilizados dados coletados pelo Starcrest Consulting Group LCC que realizou uma abrangente pesquisa em vários portos do Estados Unidos o qual coletou dados de mais de 1200 navios. Para o *Fourth*

GHG Study (International Maritime Organization, 2020), conforme mencionado pela IMO, foram feitas atualizações baseando-se no terceiro estudo, nos dados do relatório da *Starcrest Vessel Boarding Program* (VBP) com dados entre 2012 e 2018, nas informações de consumo de combustível dos motores auxiliares dos navios da Sociedade Classificadora ClassNK em diferentes modos de funcionamento e contou também com uma banca de pesquisadores para validar os dados.

Dessa forma assume-se as seguintes potências médias, considerando que elas variam conforme o Quadro 3, de acordo com o tipo de navio e o porte (dtw):

Quadro 3 – Potência média dos motores auxiliares para embarcações de menor e maior porte

Tipo de Navio	P. Mínima (kw)	P. Máxima (kw)
Granel Sólido	110	240
Químico	110	790
Carga Geral	90	720
Gaseiro	240	6750
Granel Líquido	250	2500
Container	370	1400

Fonte: Adaptado pelo autor do 4º GHG Study (International Maritime Organization, 2020).

4.6.2 Consumo de Combustível (FC_i^{Berth})

O consumo de combustível enquanto atracado é fruto de uma razão entre Consumo Específico de Combustível (SFOC) e o total de energia elétrica que o navio precisou utilizar para manter a sua operacionalidade no mesmo espaço de tempo.

Por sua vez, o SFOC é obtido através da relação da massa do combustível consumida por hora e a potência desempenhada no mesmo período de tempo. Segundo o terceiro estudo GHG da IMO, o SFOC varia com a carga de trabalho do motor, tanto que o gráfico é no formato de “U”, ou seja, em cargas mais baixas o consumo é elevado, decresce até atingir o mínimo consumo e tende a subir em cargas muito elevadas. Para fins estatísticos, a IMO adota o $SFOC_{Base}$ que seria o ponto mais eficiente no consumo de combustível dentro da curva de carga.

Para os motores auxiliares são adotados os seguintes valores, os quais também variam com o combustível adotado (Quadro 4):

Quadro 4 – Consumo específico do Motor

Motor Auxiliar	HFO	MDO/MGO	LNG
SFOC (G/KWH)	195	185	156

Fonte: Adaptado pelo autor do 4º GHG Study (International Maritime Organization, 2020).

4.6.3 Coeficiente de emissão

O valor do fator de emissão ou Coeficiente de Emissão do Óleo Diesel é um indicativo que relaciona a quantidade de poluente gerado para uma determinada quantidade de combustível consumido na mesma unidade (Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2015).

Pontua-se que segundo a IMO, para fins deste cálculo, é adotada a sigla MDO para referir-se a combustíveis marítimos destilados em geral, desta forma engloba o MGO. Percebe-se, portanto, que o MDO e MGO possuem o mesmo valor para o Coeficiente de Emissão (Quadro 5).

Quadro 5 – Coeficiente de Emissão

Coeficiente de emissão	HFO	MDO/MGO	LNG
(g CO₂/g COMBUSTÍVEL)	3.114	3.206	2.750

Fonte: Adaptado pelo autor do 4º GHG Study (International Maritime Organization, 2020).

5 RESULTADOS

Conforme proposto por Vidal (2021) e pela International Maritime Organization (2020), para a estipulação das emissões de dióxido de carbono deve-se considerar que todos os navios utilizaram MGO/MDO em seus motores auxiliares, tendo em vista que a IMO indica a utilização de combustíveis com baixo teor de enxofre, então, subentende-se que os armadores estão caminhando nessa direção. Assim, optou-se em seguir uma linha de raciocínio semelhante, divergindo no ponto em que neste trabalho também se estipula as emissões considerando a utilização do *Heavy Fuel Oil* (HFO), pois durante a pesquisa de campo notou-se essa prática em algumas embarcações, dessa forma consegue-se elaborar dois cenários, um mais pessimista (HFO) e outro mais otimista (MGO/MDO).

Evidencia-se também que a informação do combustível consumido por cada embarcação ainda não é coletada pela EMAP, o que nos leva a ter que estimar desde a Equação 1, caso contrário, o ponto de partida seria a Equação 3, para somente converter o montante de combustível em potencial de emissão. Porém ter como ponto de partida a Equação 1 nos permite inferir sobre outros aspectos como a potência dos motores auxiliares, tempo de operação, energia elétrica demanda pelos navios, combustível consumido, dentre outros. Estes dados oriundos de cada equação foram estruturados em Excel (Apêndice A), a partir dele foram montados os *dashboards*.

Conforme relatado anteriormente está em estado inicial o interesse dos portos em calcular a pegada de carbono. No que se refere ao Brasil, o primeiro porto a elaborar o Plano de Descarbonização foi o Porto do Itaquí, em parceria com a Fundação ValênciaPort, que é referência internacional na elaboração de relatório e estratégias de descarbonização portuária. Destaca-se que foi um trabalho que abrangeu a emissão de GEE de toda área portuária (fundeio, zona primária e zona secundária), iniciando-se em setembro de 2023 e entregue à comunidade portuária em outubro de 2024. Devido à *expertise* apresentada pela Fundação e a oportunidade de compartilharmos em parte o mesmo campo e tema de pesquisa, tornou-se imprescindível o contato. Contato este que possibilitou a troca de informações e a comparação dos cálculos, o qual conferiu uma validação a mais dos resultados obtidos, conforme mostra o Quadro 6.

Quadro 6 – Comparação entre os resultados obtidos por ValênciaPort e Conexão Verde (Universidade Federal do Maranhão – UFMA)

Instituição / Categoria do Navio	Navios Atracados	Horas Operadas (mil horas)	Combustível Consumido (kt)	CO ₂ emitido pelos motores auxiliares (kt)
ValênciaPort	997	66.19	5.34	16,65
Conexão Verde (UFMA)	998	66.21	5.51	16,76

Fonte: O autor, a partir de dados da pesquisa realizada.

5.1 Gráfico geral de 2022

Após o tratamento dos dados, foram gerados os *dashboards* apresentados neste capítulo. Apontando informações como quantidade de navios atracados, horas em operação no berço de atracação, e as estimativas de energia consumida (kWh), consumo de MGO/MDO e HFO (t) além das respectivas estimativas de emissão de CO₂ (t) para cada combustível. O dashboard também permite estratificar o potencial de emissão por berço e por tipo de navio.

O dashboard apresentado na Figura 9 refere-se a um panorama geral do ano de 2022. Aponta-se que ocorreram 998 operações, abrangendo estivagem, desestivagem e abastecimento de navios. Assim, em valores aproximados, totalizou-se 66,2 mil horas de operação, resultando em um consumo energético de 28,25 GWh.

No que se refere ao consumo de combustível, observa-se um total de 5,23 kt de MDO/MGO ou 5,51 kt de HFO, os quais geraram, respectivamente, 16,76 kt e 17,16 kt de CO₂ emitidos na atmosfera (Figura 9).

Em 2022, quase metade dos navios que atracaram eram de granel sólido, representando aproximadamente 48% do total. Em seguida, os navios de granel líquido, juntamente com os gaseiros, somaram cerca de 44%. Em menor proporção, os navios de carga geral representaram 5,7%, enquanto os navios de contêiner registraram movimentações mais discretas, correspondendo a 3,2% do total (Figura 10).

Figura 10 – Panorama geral de 2022



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Apesar de haver mais operações com navios de granel sólido, observa-se que, segundo as estimativas, os navios de granel líquido lideram na emissão de CO₂. Esse fato ocorre devido à maior necessidade de consumo de energia elétrica para manter suas funções, o que, consequentemente, resulta em um consumo superior de combustível e, proporcionalmente, em uma maior emissão de CO₂ (Abu Bakar, 2023). Esse mesmo fenômeno foi observado no ano seguinte.

Da mesma forma esta característica é notada quando se estratifica as emissões por berço, sendo que os berços 104, 106 e 108 sempre despontarão, pois são voltados para movimentar carga de granel líquido. Na outra ponta da tabela, observa-se que o berço 101 durante os três anos analisados sempre fica como menor emissor de CO₂, o que pode atribuir-se a soma de dois fatores, o primeiro por majoritariamente operarem navios de granel sólido e por ser um dos berços com menor profundidade, 12m, assim o calado máximo por navio limita-se a 11,5m, que culmina na atracação de navios menores. O berço 102 também tem a mesma limitação de profundidade, porém, a estrutura do cais, por ser mais versátil, permite a atracação de navio de contêiner, carga geral, granel sólido e granel líquido, ou seja, navios cuja necessidade energética é maior.

5.2 Gráfico geral de 2023

No dashboard (Figura 10) que em 2023, houve 1.043 atracações, movimentando principalmente graneis sólidos e líquidos, somando o total de 70,91 mil horas de operação.

Possibilita-se identificar que no Porto do Itaquí em 2023 predominaram os navios de granel sólido, contabilizando o total de 549 atracações, aproximadamente 53% do total. Tais navios movimentaram cargas como: milho, soja, fertilizante, cobre e manganês. Em seguida, com aproximadamente 40% das atracações, há os navios tanque, transportando diesel, gasolina, álcool etc. E, em quantidade mais discretas, tem-se os navios de carga geral o qual condizem a 6,23% das operações, transportando cargas como celulose, trilho, fertilizante em big bag, cargas de projeto dentre outras. Durante estas operações, estima-se que foram queimados pelos motores auxiliares cerca de 5,44 kt de MGO/MDO e 5,44 kt de HFO, que resultaram entre 17,44 kt e 17,86 kt de dióxido de carbono (Figura 11).

Figura 11 – Panorama Geral de 2023



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

5.3 Gráfico geral de 2024

A análise dos dados apresentados no dashboard (Figura 12) evidencia a realização de 986 operações ao longo do ano de 2024, abrangendo atividades de carga e descarga de navios. O tempo total de operação registrado foi de aproximadamente 67,28 mil horas, o que resultou em um consumo energético de 28,45 GWh.

No que se refere ao consumo de combustível, verificou-se um total de 4,26 kt de MDO/MGO ou 5,55 kt de HFO, os quais refletem respectivamente, em 16,88 kt e 17,28 kt de CO₂ emitidos na atmosfera (Figura 12).

Observa-se que a emissão de gases poluentes também está diretamente relacionada às horas de operação no berço. De acordo com as estimativas, as operações realizadas em 2024 emitiram uma quantidade inferior de poluentes em comparação ao ano anterior. Esse resultado pode ser atribuído, em grande parte, à redução de aproximadamente 1,25 mil horas de operação dos navios de granel líquido, que representam a maior parcela das emissões.

Em contrapartida, identificou-se um aumento no número de atracações de navios dessa categoria em 2024, em relação aos dois anos anteriores. No entanto, esse aumento não resultou em um crescimento proporcional da carga movimentada.

Figura 12 – Panorama Geral de 2024



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

5.4 Emissão de CO₂ no Porto do Itaqui

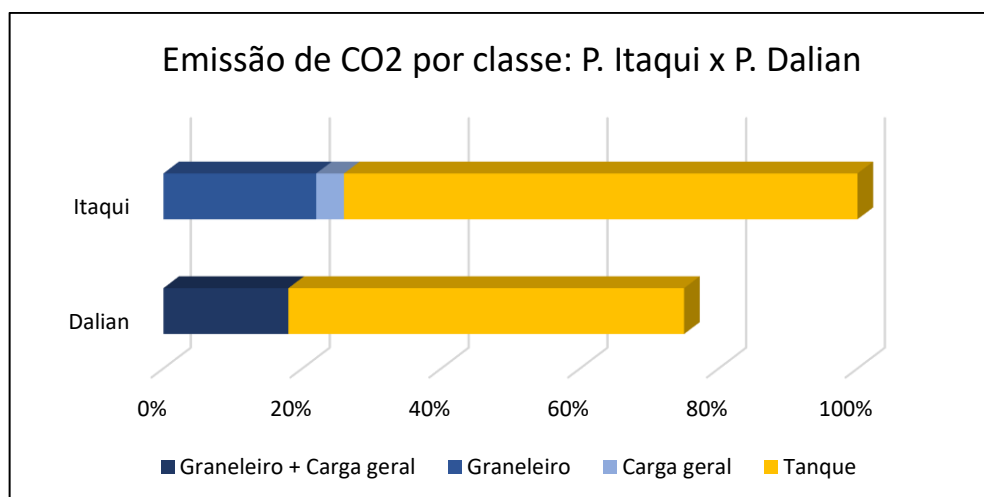
De acordo com a metodologia, se obteve a estimativa de que os navios que operaram no Porto do Itaqui, enquanto atracados entre janeiro de 2022 e dezembro de 2024, emitiram aproximadamente entre 51,08 kt e 52,29kt de dióxido de carbono na atmosfera ludovicense.

Como o fator de emissão é diretamente proporcional à quantidade de combustível queimado, que por sua vez é determinado pela demanda de potência vezes o consumo específico, já era de se esperar que os berços destinados para a movimentação de granel líquido seriam os com maiores estimativas de emissão de CO₂.

Chen *et al.* (2021) realizaram um robusto estudo no Porto de Dalian, localizado no nordeste da China, no qual estipulou a emissão de CO₂ durante o fundeio, manobra de atracação e o tempo atracado. O autor utilizou o *Automatic Identification System* (AIS) como fonte de dados para determinar o tempo de permanência do navio no berço. Semelhante ao Porto do Itaqui, em Dalian a emissão predominou dentre os navios tanque.

Ao comparar a emissão de CO₂ por classe de navio entre os portos de Dalian e Itaqui, observa-se também que os navios de carga geral e graneleiro possuem proporção semelhante. O restante das emissões em Dalian distribuiu-se entre os navios de passageiros, contêineres e rebocadores (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Emissão de CO₂ por classe: P. Itaqui x P. Dalian



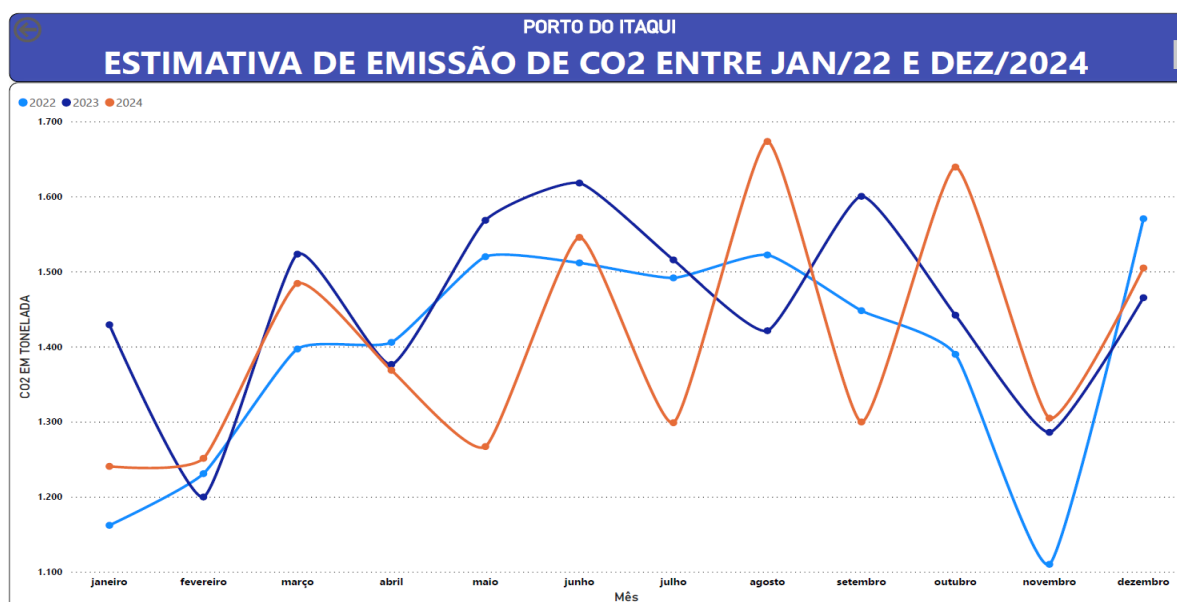
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP e de Chen *et al.* (2021).

Analisando o Porto do Itaqui por berço, o 106 foi campeão, teve 337 navios atracados, e durante as 23,51 mil horas de operação, estima-se que emitiu entre 10,79 kt e 11,06kt de CO₂. Seguindo o rank tem-se os berços 108, 104, 99, 100, 102, 103, 105, e por último o berço 101.

O último colocado é equipado com uma superestrutura voltada para a movimentação de fertilizante. No berço, atracam navios de granel sólido, cuja potência dos motores varia entre 110 kW e 720 kW, segundo a IMO 2020. Nesse mesmo período, avalia-se que foram consumidas cerca de 733 t toneladas de MGO/MDO e 772 t de HFO, que acarretou entre 2,35 kt e 2,41 kt de CO₂, em aproximadamente 23 mil horas de operação.

O Gráfico 6 apresentado ilustra a estimativa de emissão de CO₂ proveniente do consumo de MGO/MDO ao longo dos três anos analisados neste estudo. Optou-se por não incluir os dados referentes ao HFO, uma vez que este apresenta tendência semelhante à representada no gráfico.

Gráfico 6 – Estimativa de emissão de CO₂ por MDO/MGO por mês ao longo de 2022, 2023 e 2024



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Observa-se que não há uma constância nas emissões ao longo dos meses, sendo essa variação influenciada por diversos fatores. Entre eles, destacam-se as condições do mercado, a demanda sazonal por determinados produtos, a cotação do

dólar — que impacta tanto a aquisição de combustível quanto a comercialização de grãos — e a disponibilidade operacional dos píeres, que pode ser afetada por períodos de manutenção.

5.5 Estimativa de gastos com energia

Segundo Rojas (2014), um dos maiores custos envolvidos na precificação do frete marítimo está nas despesas com combustível. Conforme a Revista Eletrônica *Ship & Bunker*, o preço médio no dia 24/03/2025 no Porto de Santos estava cotado para R\$/t 4.652,76 (MGO/MDO) e R\$/t 3.071,28 (HFO). Este valor em real é relativo à cotação do dólar para a mesma data que, segundo o Banco Central do Brasil, estava valendo R\$ 5,73. Através da Equação 2 que permite estimar a quantidade de combustível consumido durante o período atracado, e preço fornecido é possível ter uma ideia do que cada embarcação gasta para manter suas atividades no berço.

Para efeitos comparativos, como a Equação 1 estima o consumo de energia elétrica da embarcação, possibilita a dedução sobre o valor aproximado do que seria gasto pela embarcação, caso optasse em utilizar energia elétrica proveniente de terra, como não se trata de um estudo de viabilidade econômica, foram desconsideradas possíveis taxas sob a distribuição de energia, que eventualmente seria cobrado pelo porto. Para obter valor médio do kWh, considerou-se a Resolução Normativa nº1000 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece a tarifação sazonal de acordo com os horários de maior e menor consumo de energia em determinada região. Foi considerado também o preço cobrado pela Equatorial para distribuição de energia para a indústria, o qual varia entre R\$ 1,57 kWh para o horário de ponta e R\$ 0,56 kWh para o horário fora de ponta. Dessa forma, foi obtido um preço médio de R\$ 0,774 kWh (Brasil, 2021).

Baseado nas estimativas realizadas, foi elaborada a seguinte tabela abaixo, que traz o Nº da Entrada que consiste no número de registro da operação no porto. Optou-se por usar essa identificação para garantir a privacidade do navio, na sequência é apontada a carga operada, os possíveis gastos com compra de combustível, a estipulação do que seria gasto com a compra de energia elétrica e o tempo de permanência da embarcação no berço.

Na Figura 13, classificou-se do maior para o menor em relação a estimativa de gasto com a compra de combustível, proporcionalmente a estimativa de gasto com

energia elétrica segue o mesmo fluxo. Desse modo, observa-se que os maiores valores investidos foram em navios que movimentaram diesel e celulose. Foi constatado que todos tiveram alto tempo de permanência no porto, acima de 14 dias atracados e são navios que exigem altas demandas dos motores auxiliares.

Figura 13 – Estimativa de Gastos dos Navios, priorizando gastos mais elevados com combustível e energia elétrica

ESTIMATIVA DE GASTOS					
Nº ENTRADA	CARGA	MGO/MDO (R\$)	HFO (R\$)	ENERGIA ELÉTRICA (R\$)	HORAS EM OPERAÇÃO (h)
559	DIESEL	456.947,10	317.934,44	410.888,99	301,45
708	DIESEL	420.994,57	292.919,40	378.560,30	295,82
487	DIESEL	388.445,48	270.272,41	349.292,01	275,58
729	DIESEL	363.184,45	252.696,30	326.577,17	228,08
152	CELULOSE	249.469,08	173.575,48	224.323,78	457,53
899	DIESEL	246.436,91	171.465,75	221.597,23	376,00
964	CELULOSE	241.698,13	168.168,61	217.336,10	397,38
514	CELULOSE	237.277,27	165.092,66	213.360,84	532,38
425	CARGA DE PROJETO	235.962,02	164.177,55	212.178,17	422,85
76	DIESEL	230.853,70	160.623,28	207.584,74	398,70
502	ABASTECIMENTO	228.738,52	159.151,58	205.682,76	369,08
756	DIESEL	212.315,21	147.724,58	190.914,84	349,80
63	CELULOSE	206.022,48	143.346,22	185.256,38	315,63
279	CELULOSE	198.477,34	138.096,47	178.471,76	370,43
179	CELULOSE	197.782,13	137.612,75	177.846,62	319,13
447	DIESEL	185.267,82	128.905,55	166.593,70	335,07
541	CELULOSE	184.046,54	128.055,81	165.495,52	345,12

Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Em seguida, na Figura 14, optou-se em classificar do maior para o menor tempo de permanência atracado. A partir de então, enfatiza-se na necessidade de otimizar as operações, tendo em vista que operações mais eficientes são menos poluentes.

Verificou-se que há uma maior variação de cargas em relação a tabela anterior, porém percebe-se que, em sua maioria, são cargas que não operam sob chuva ou tempo nublado, assim essa variável foge do controle operacional, inviabilizando a redução de tempo da operação, assim, evidencia-se mais ainda a importância do OPS nesses casos.

Figura 14 – Estimativa de Gastos dos Navios, priorizando maior tempo de permanência no berço

ESTIMATIVA DE GASTOS					
Nº ENTRADA	CARGA	MGO/MDO (R\$)	HFO (R\$)	ENERGIA ELÉTRICA (R\$)	HORAS EM OPERAÇÃO (h)
514	CELULOSE	237.277,27	165.092,66	213.360,84	532,38
598	DIESEL	107.101,86	74.519,28	96.306,50	480,43
83	CARVÃO	78.390,76	54.542,68	70.489,34	466,83
45	ANTRACITA	138.473,14	96.346,78	124.515,70	460,22
152	CELULOSE	249.469,08	173.575,48	224.323,78	457,53
728	CELULOSE	141.554,66	98.490,84	127.286,62	444,08
235	DIESEL	146.974,30	102.261,71	132.159,98	425,23
425	CARGA DE PROJETO	235.962,02	164.177,55	212.178,17	422,85
691	CELULOSE	165.520,82	115.166,00	148.837,10	422,63
972	CELULOSE	126.848,14	88.258,34	114.062,45	420,85
682	DIESEL	106.709,35	74.246,18	95.953,55	418,92
116	FERTILIZANTE	84.054,99	58.483,74	75.582,65	406,88
195	CARVÃO	156.746,23	109.060,81	140.946,95	405,18
536	FERRO GUSA	77.500,30	53.923,12	69.688,64	399,02

Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Em ambos os casos observa-se que a estimativa de gasto com energia elétrica se torna mais econômica do que o consumo de MGO/MDO pelo navio e o consumo de HFO aparece menos dispendioso em relação às outras duas fontes, para a conjuntura econômica do dia 24/03/2025. Porém esse cenário varia conforme a precificação do petróleo e do dólar, pois, em outros cenários, analisados em meses anteriores, o consumo de energia elétrica apresentou-se mais vantajoso. Reforça-se que este não é um trabalho que visa estudar a viabilidade econômica, pois muitos fatores não foram considerados. No entanto tem como objetivo dar a luz a possíveis cenários o qual mostram que a eletrificação das operações portuárias pode ser viável.

5.6 Comportamento do somatório de potência dos motores auxiliares entre os berços

De acordo com alusão feita anteriormente, a emissão de CO₂ é diretamente proporcional à quantidade de energia elétrica que o navio precisa para manter suas atividades operacionais durante o processo de movimentação de carga (Abu Bakar, 2023).

Compreende-se que durante a operação portuária o navio não necessita utilizar 100% da capacidade dos motores auxiliares, assim o fator de carga vai variar conforme o tipo de produto transportado, tipo de operação, se está em viagem, manobra ou atracado. É atribuído o fator de 1.0 para o navio que utilizar o máximo de

sua capacidade, Abu Bakar (2023). Foram analisadas centenas de embarcações, *UK Ship Emission Inventory* (Entec, 2010), através do qual foi possível levantar a demanda dos motores auxiliares por categoria de embarcação, que por sua vez utilizaram a base de dados da Lloyd's MIU, que abrange cerca de 36% da frota marítima (Quadro 7).

Quadro 7 – Fator de Carga Médio

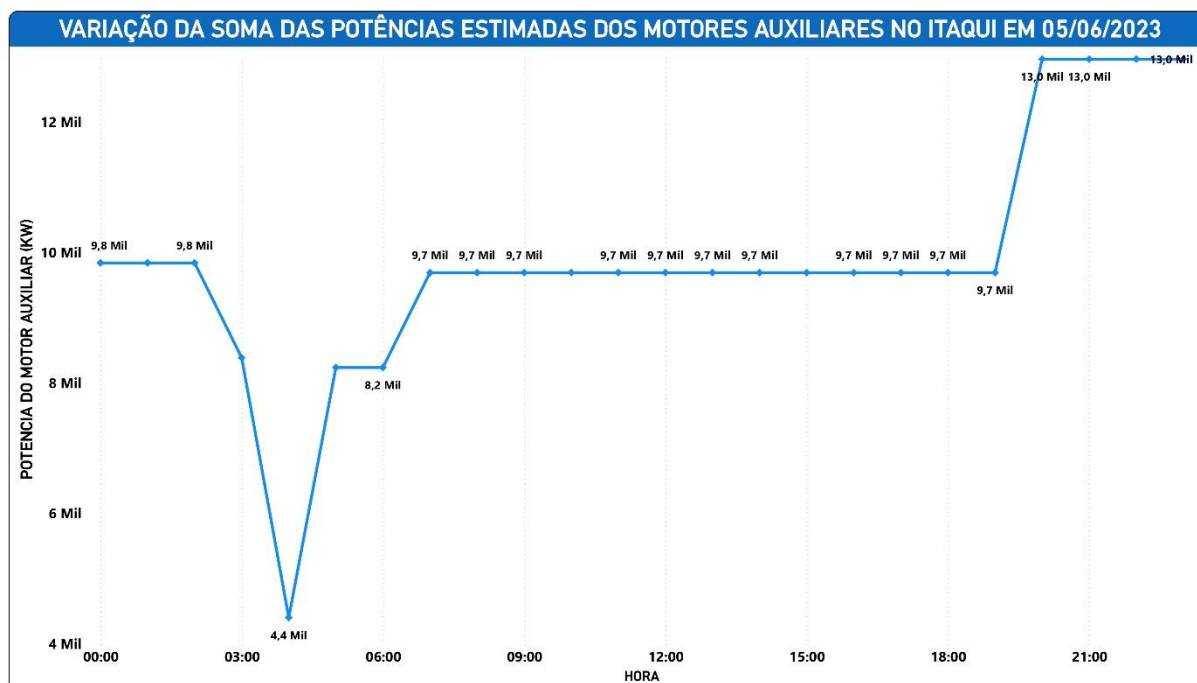
Categoria	LF
Granel Sólido	0,22
Container	0,17
Carga Geral	0,22
Granel Líquido / Gaseiro	0,67

Fonte: Abu Bakar (2023), Moreno-Gutiérrez *et al.* (2015) e UK Ship Emission Inventory (2010).

Na subseção 4.2 foi apresentado como se dá a estadia do navio no porto, demonstrou-se uma representação da linha do tempo, contemplando paradas operacionais e manobras de atracação e desatracação. Essa sucessão de eventos reflete no comportamento do consumo de energia elétrica de cada navio. É de suma importância ter conhecimento dessa dinâmica ao longo de sua estadia, pois permite estimar qual seria a capacidade mínima para a rede elétrica do porto, no intuito de estudar a viabilidade da implementação de OPS, considerando ser esse o direcionamento atual dos portos, rumo a descarbonização.

Desse modo, contabilizou-se a soma das potências estimadas dos motores auxiliares dos navios presentes e cada berço, seguindo a indicação da International Maritime Organization (2020) no 4º *GHG Study*, relatando ao longo do dia 05/06/2023 manobras de atracação, desatracação e a categoria dos navios atracados (Gráfico 7).

Gráfico 7 – Variação da Soma das Potências Estimadas dos Motores Auxiliares no Porto do Itaqui



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

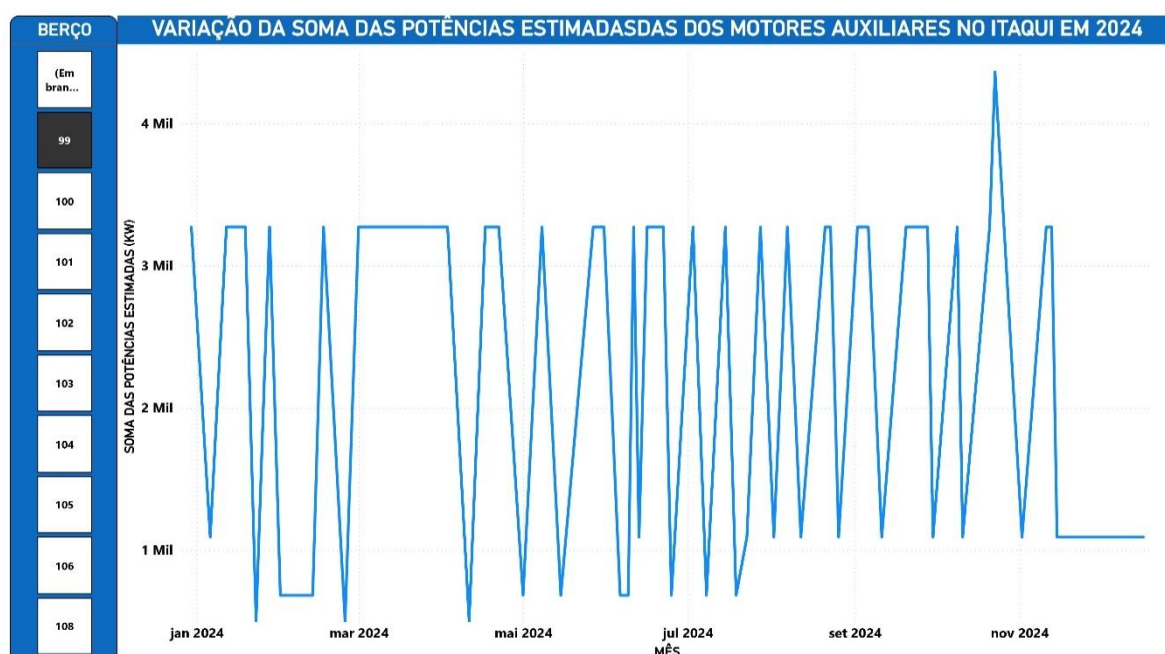
A da soma das potências estimadas variam conforme haja presença de navio no berço, logo abaixo através da descrição das manobras de atracação e desatracação em casa berço para a data escolhida, é possível ver este comportamento no gráfico.

- Berço 99: esteve sem navio desde o dia 03 e atracou um Panamax de carga geral dia 05/06 às 20h;
- Berço 100: às 02h:42 desatracou um navio de granel sólido e atracou outro às 4h50, ambos os navios eram Panamax;
- Berço 101: atracou um navio de granel sólido dia 01/06 às 4h:42 desatracou 07/06 às 7h:11, ambos Panamax;
- Berço 102: atracou um Handsize de granel sólido dia 01/06 às 4h:12 e desatracou somente 09/06 às 7h:11;
- Berço 103: atracou dia 02/06 às 5h:35, desatracou 05/06 às 3h, em sequência atracou outro às 4h:45 que desatracou dia 07 às 6h:41. Ambos os navios eram Mini-cape de granel sólido;

- f) Berço 104: atracou um Handmax de granel líquido dia 03/06 às 15h:06 e desatracou dia 05/06 às 02h:45. Em sequência, atracou um Panamax às 05/06 4h41 e permaneceu às 17h26 08/06;
- g) Berço 105: atracou um Mini-cape de granel sólido, dia 03/0 às 21h53 e desatracou às 2h26 05/06. Na sequência às 7h21 atracou um Panamax que desatracou somente 08/06 às 4h53;
- h) Berço 106: atracou um Aframax às 01h17 02/06 e desatracou 2h56 07/06;
- i) Berço 108: anteriormente estava sem navio devido manutenção, até que dia 04/06 às 2h12 atracou um Handmax e desatracou 05/06 às 19h59. Em seguida, houve a entrada de um Handmax às 21h55 05/06.

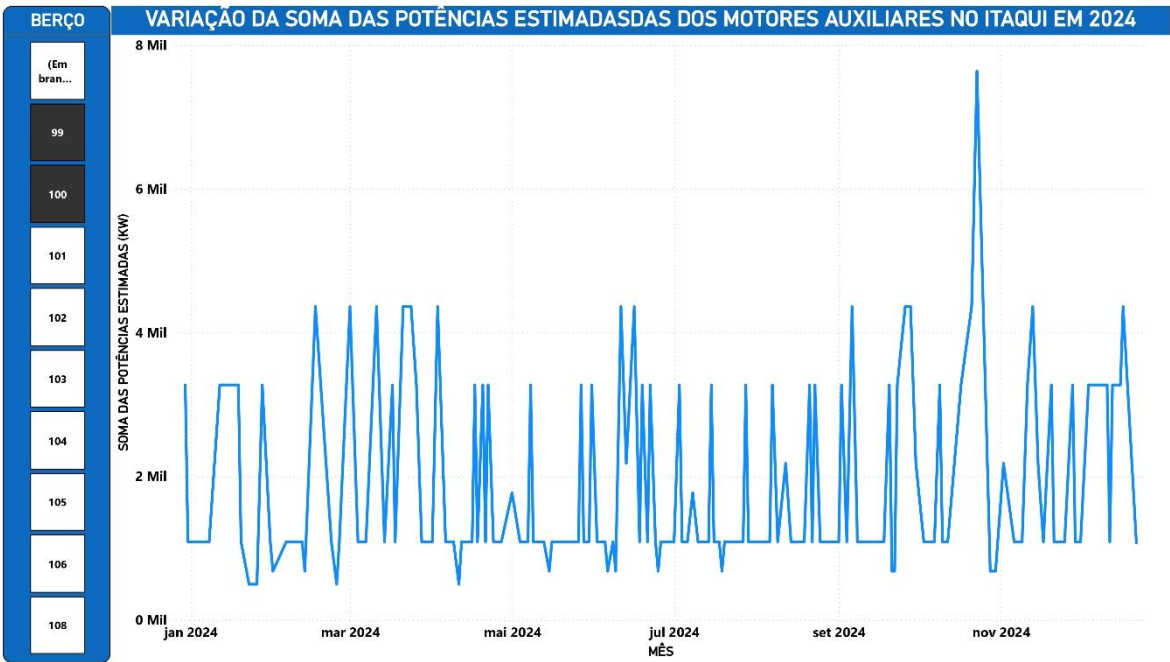
Após a compreensão de como se dá o comportamento do consumo de energia ao longo de um dia no porto, parte-se para uma observação macro, conforme pode-se ver na sequência do Gráficos 8 a 16 que ilustram a variação da soma das potências dos motores auxiliares no Porto do Itaqui ao longo de 2024, a cada gráfico é acrescentado um píer, até que o último representa o somatório de todos.

Gráfico 8 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 no Berço 99



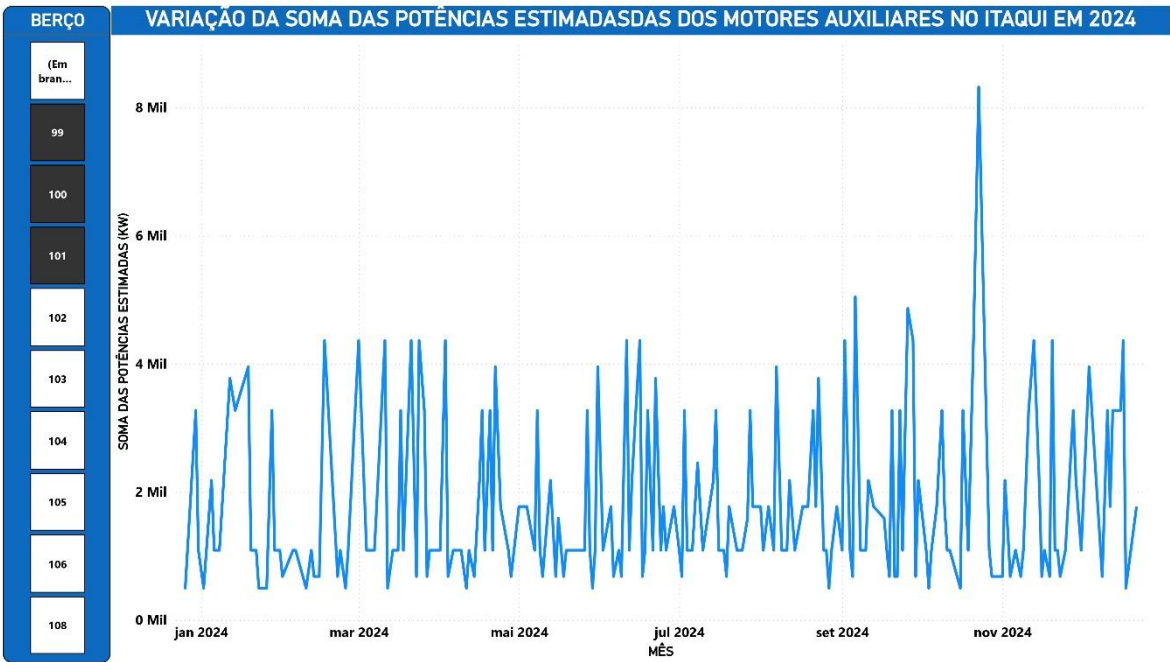
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 9 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 e 100



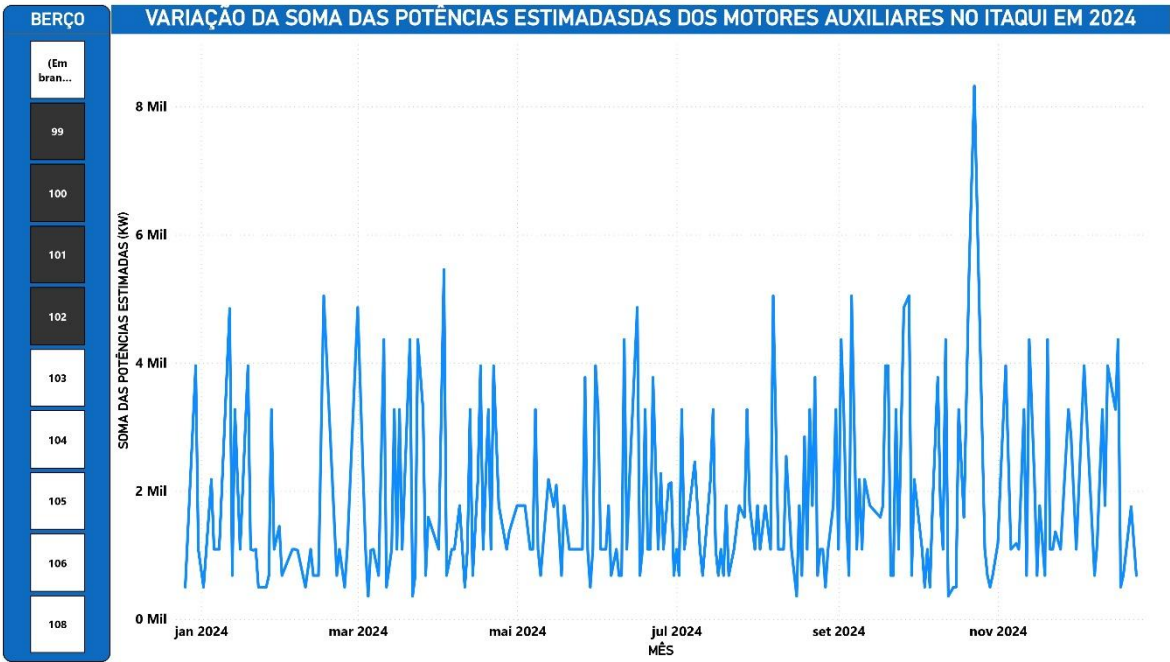
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 10 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 101



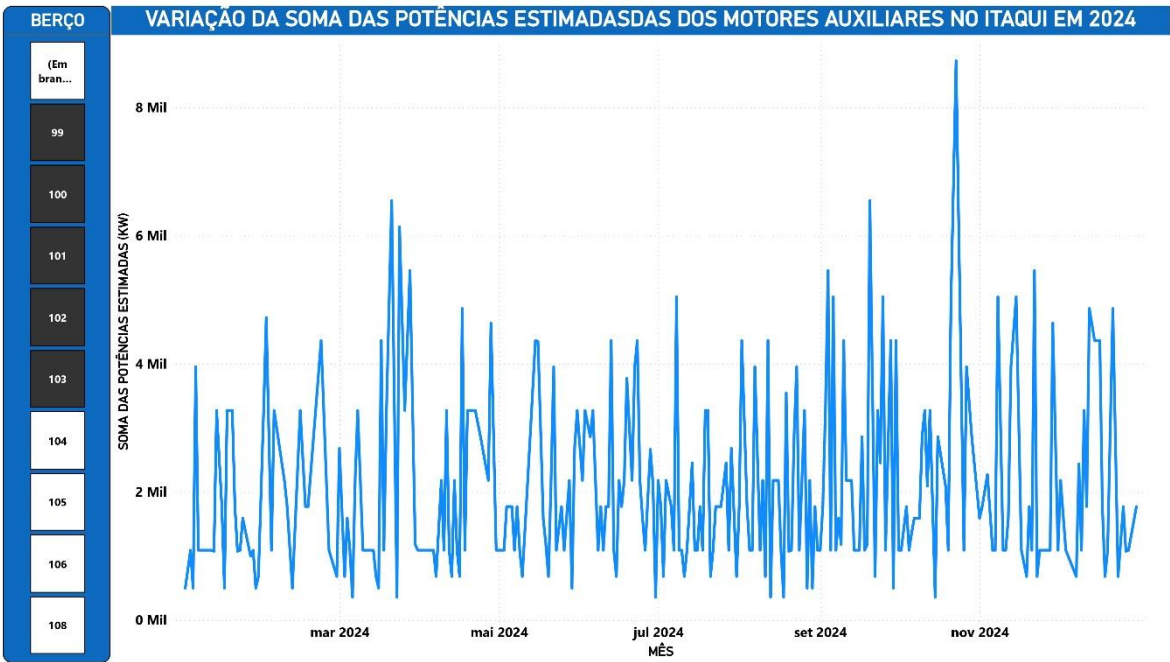
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 11 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 102



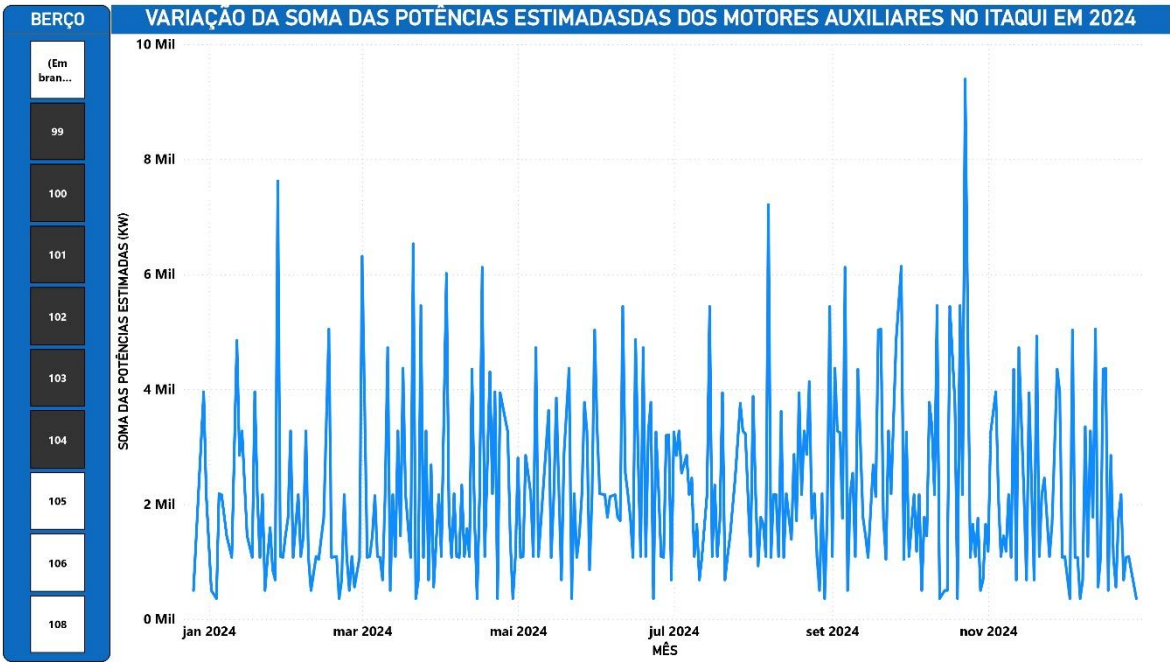
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 12 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 103



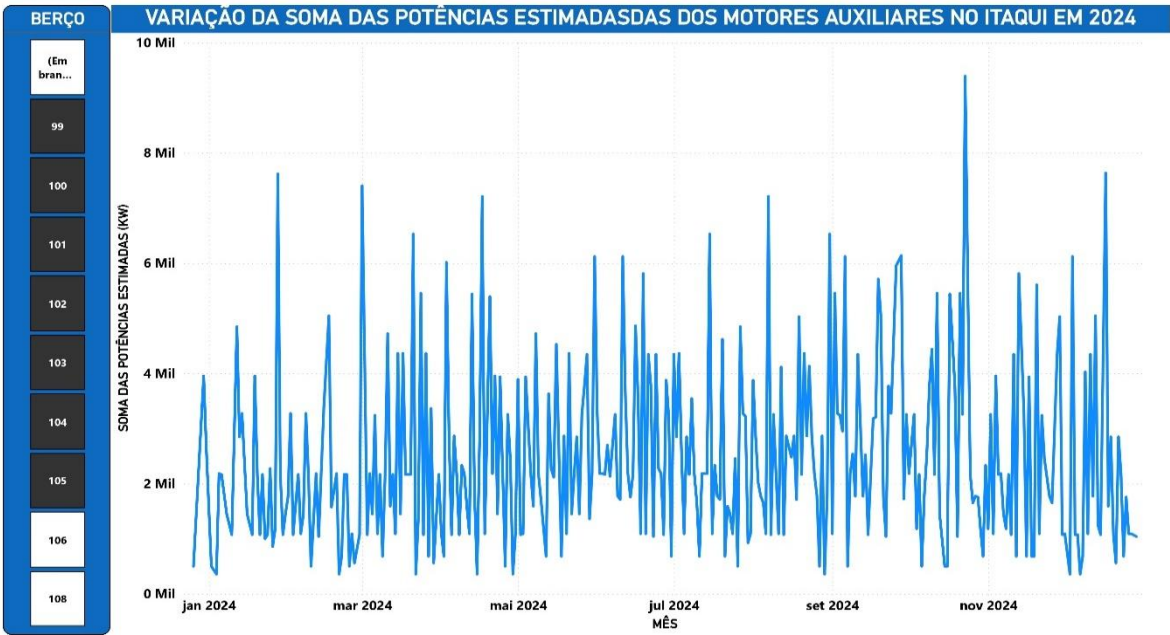
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 13 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 104



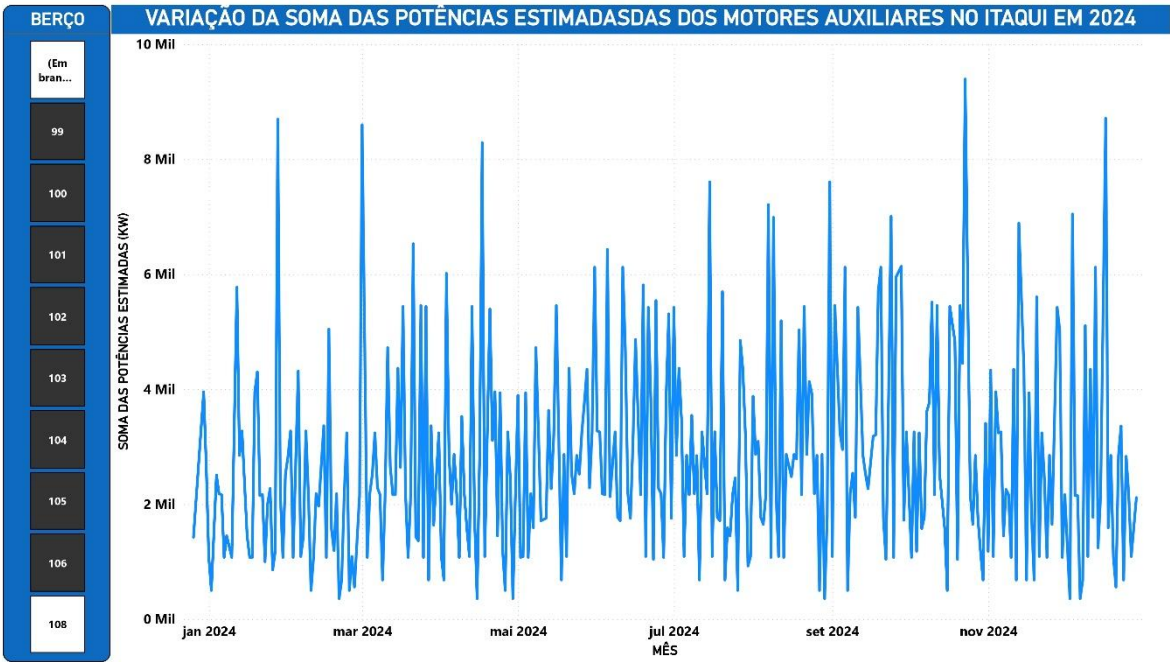
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 14 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 105



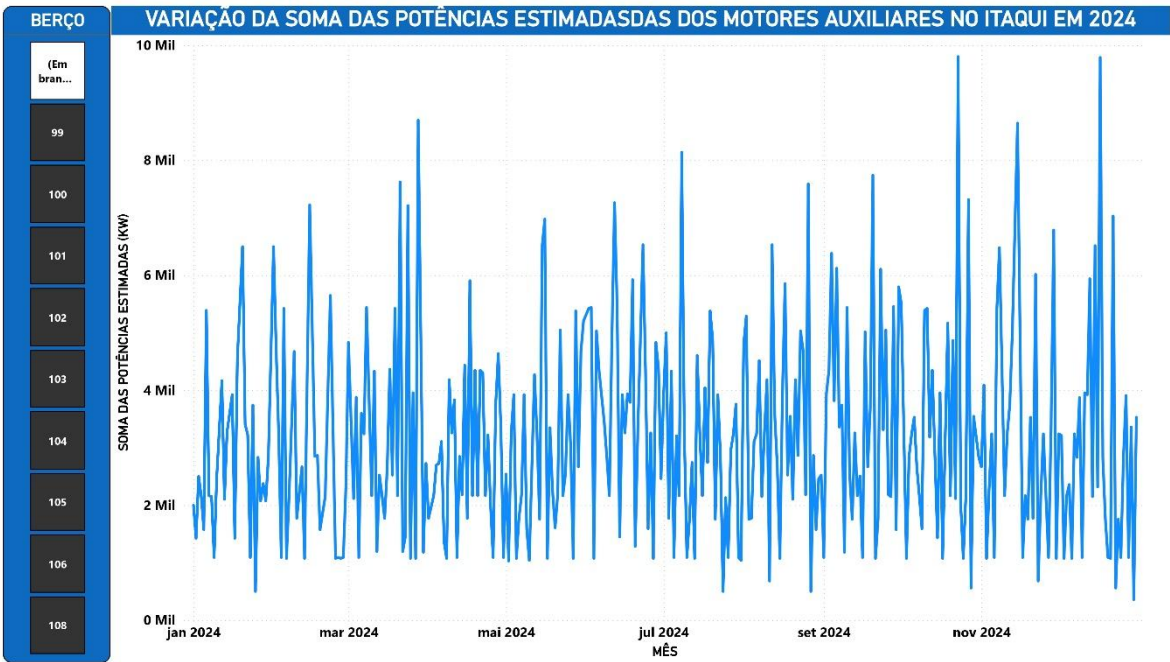
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 15 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 106



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Gráfico 16 – Soma das Potências dos Motores Auxiliares em 2024 do Berço 99 ao 108



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Mapear o consumo de energia das embarcações é extremamente importante para sejam pensadas ações de descarbonização, como, por exemplo, a instalação de OPS no píer. Para isso é necessário compreender qual píer tem maior gasto de energia, em seguida é preciso ver se esse berço tem estrutura física para instalar o sistema. Outro ponto importante que foge do controle da autoridade portuária é saber se os navios que ali atracam estão preparados para o OPS.

5.7 Gráfico Geral por cada berço em 2024

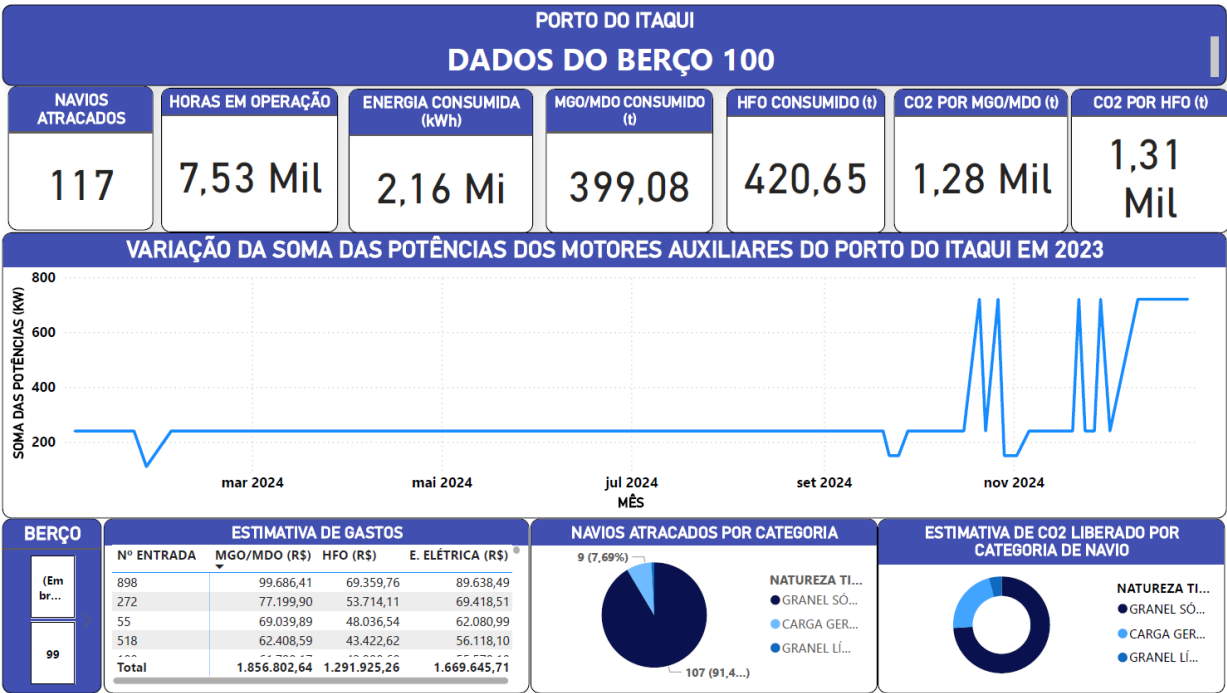
Após a compreensão dos fatores citados acima, segue a visualização geral de cada berço do Porto do Itaquí baseado no cenário de 2024 (Figuras 15 a 23).

Figura 15 – Panorama do Berço 99 em 2024



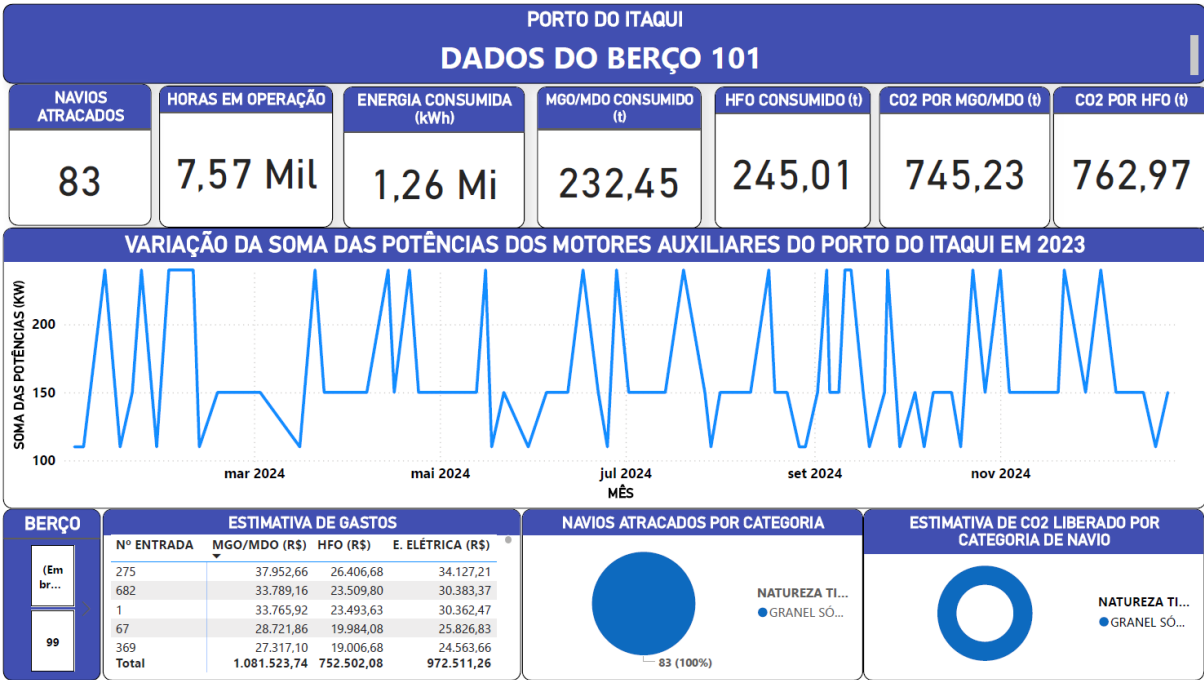
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 16 – Panorama do Berço 100 em 2024



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 17 – Panorama do Berço 101 em 2024



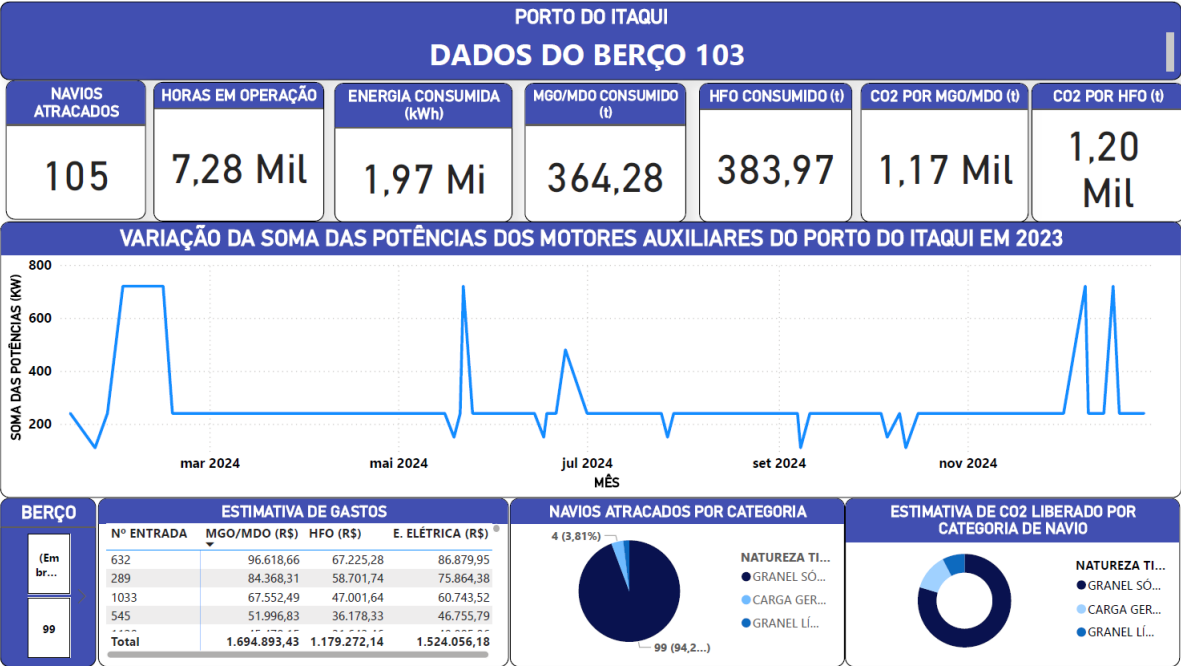
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 18 – Panorama do Berço 102 em 2024



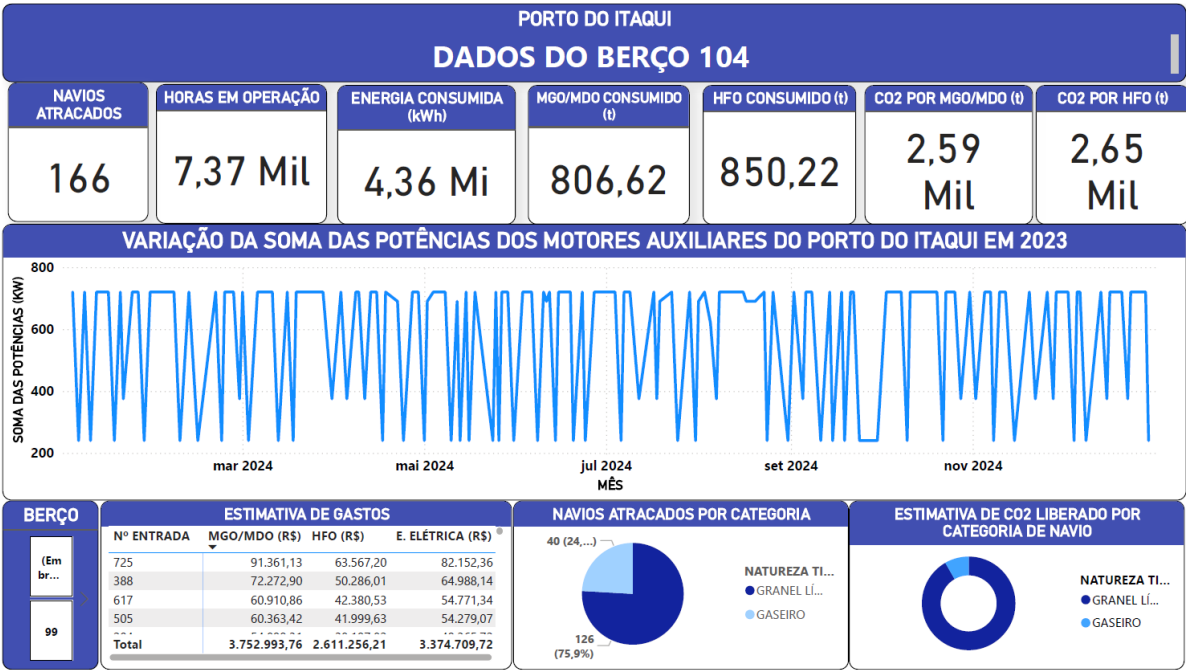
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 19 – Panorama do Berço 103 em 2024



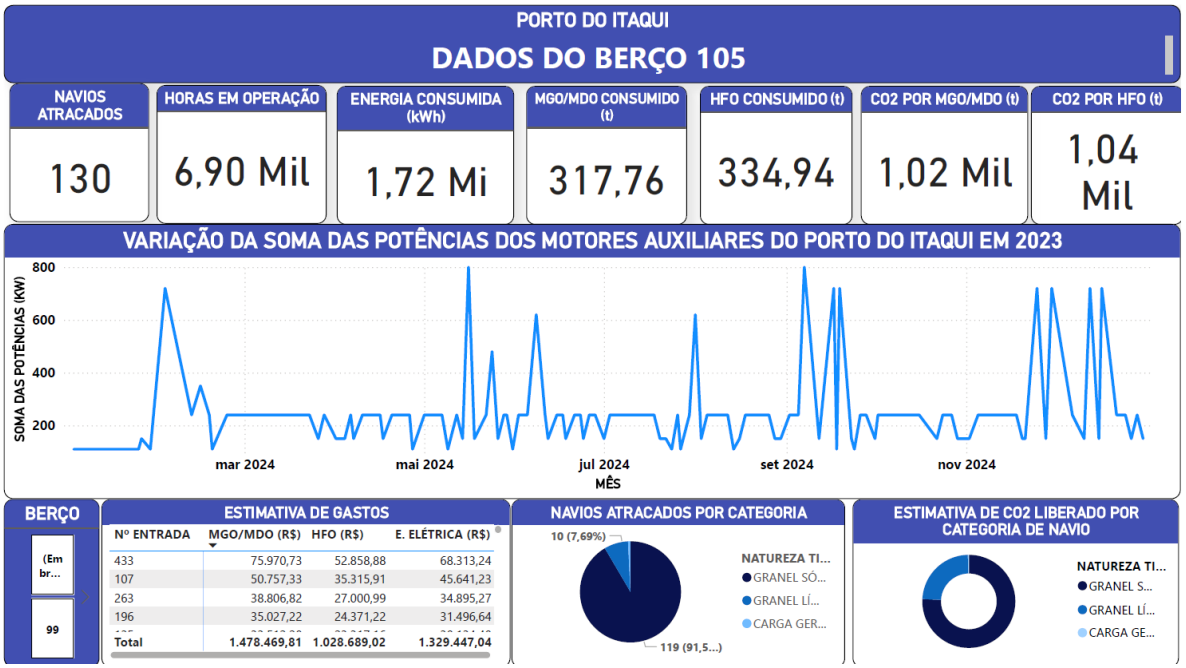
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 20 – Panorama do Berço 104 em 2024



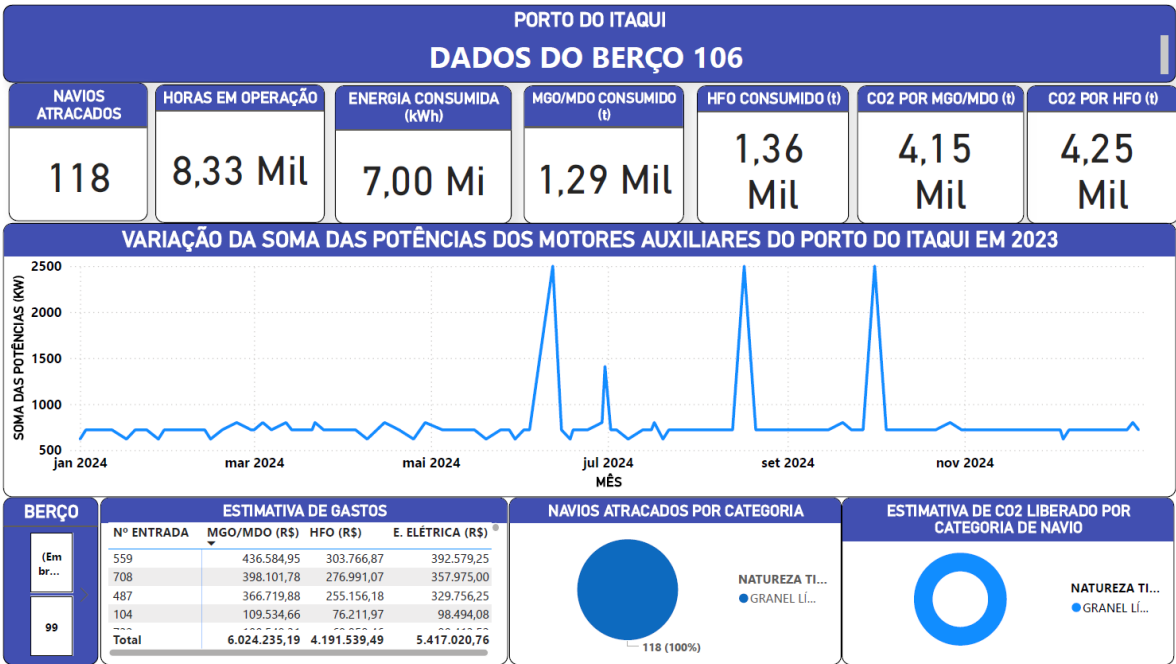
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 21 – Panorama do Berço 105 em 2024



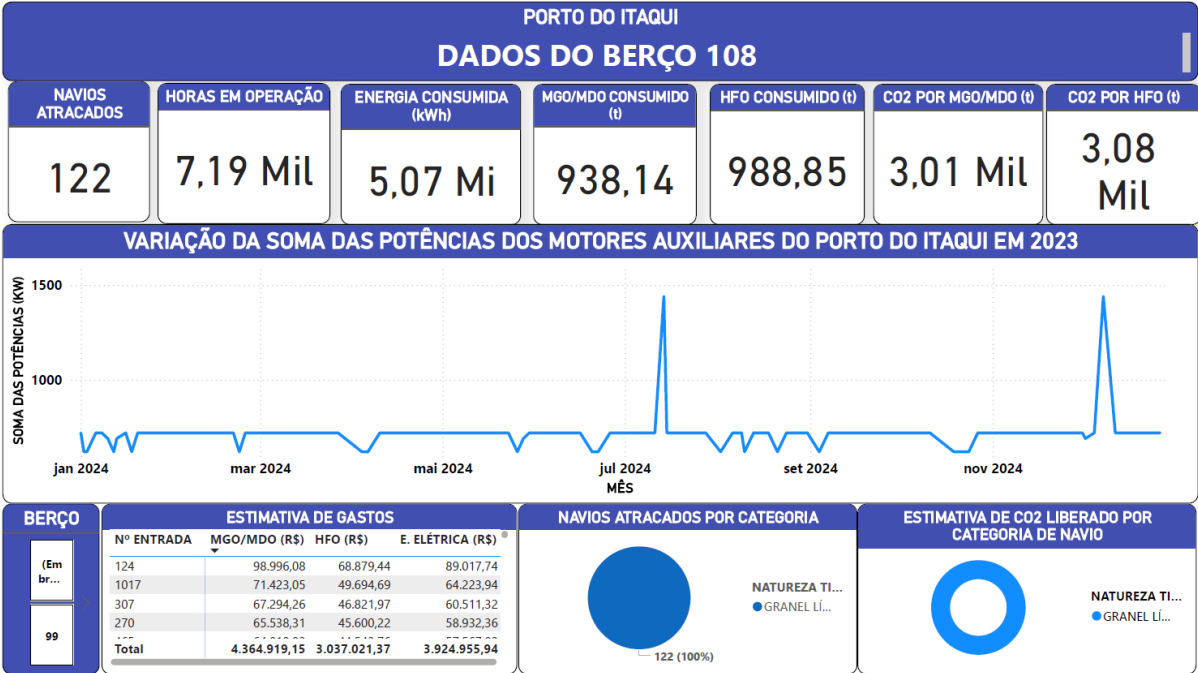
Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 22 – Panorama do Berço 106 em 2024



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

Figura 23 – Panorama do Berço 108 em 2024



Fonte: O autor, a partir de dados recebidos da EMAP, durante a pesquisa de campo.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa apresentada acima integra o “Projeto Conexão Verde”, que visa estudar a viabilidade e fornecer um acervo técnico para a implementação do OPS no Porto do Itaquí, considerando que esta tecnologia é eficaz para mitigar a emissão de GEE nos portos.

Porém antes de partir para implantação do sistema é fundamental que haja conhecimento do montante de GEE emitido pelos navios enquanto atracados, para que entenda-se qual a sua parcela no impacto ambiental e então seja justificável a adoção da tecnologia. Assim o presente estudo teve como objetivo estimar o potencial de emissão de CO₂ proveniente dos motores auxiliares dos navios atracados no Porto do Itaquí, no período compreendido entre janeiro de 2022 e dezembro de 2024.

Os resultados indicam que o Porto do Itaquí apresenta um potencial emissivo significativo durante as operações de movimentação de carga, totalizando entre 51,08 kt e 52,29 kt de CO₂ no triênio analisado. Verificou-se que navios de granel líquido, particularmente os navios-tanque, foram os principais emissores, devido à maior demanda energética em operação contínua nos berços especializados. Além disso, identificou-se que os berços 104, 106 e 108 concentram os maiores volumes de emissão, enquanto berços com menor profundidade e operação de navios de carga geral, como o berço 101, apresentaram os menores índices.

Para a construção deste estudo, foi realizada uma análise contextual abrangendo o cenário global, seguida de um recorte para o contexto local. Inicialmente, foram identificadas as principais iniciativas voltadas à mitigação da emissão de GEE, com destaque para as ações promovidas pela IMO. Observou-se um redirecionamento estratégico dessas ações a partir da assinatura do Acordo de Paris e da implementação do Anexo VI da Convenção MARPOL.

Após essa contextualização, o estudo avançou para a investigação do cenário local por meio de pesquisa de campo, possibilitando a compreensão das especificidades das operações portuárias no Porto do Itaquí. Nesse momento foi perceptível a dificuldade para coletar informações diretamente com os navios, observou-se também a que não há comunicação direta entre os *players* (armadores, autoridades portuárias, afretadores, operadores portuários, etc), evidenciando as

ações para mitigar emissões ainda são isoladas ou inexistente. Em seguida, buscou-se compreender a metodologia adotada pela IMO para a estimativa das emissões, a fim de aplicá-la ao contexto local, utilizando dados fornecidos pela EMAP.

Conforme discutido ao longo deste estudo, o primeiro passo para a descarbonização portuária consiste na mensuração das emissões, permitindo a compreensão do cenário atual. A partir desse diagnóstico, torna-se possível a formulação e implementação de um plano estratégico de descarbonização, que deve abranger não apenas a adoção do OPS, mas também outras medidas complementares. Entre essas iniciativas, destacam-se a conscientização dos operadores portuários, a substituição de combustíveis fósseis por alternativas mais sustentáveis, a implantação de políticas tarifárias diferenciadas, incentivando operações ambientalmente responsáveis.

A implementação de tais estratégias devem ser acompanhada por incentivos regulatórios, planejamento energético adequado e investimentos em infraestrutura, de modo a alinhar os portos brasileiros às diretrizes internacionais de sustentabilidade e à transição para uma economia de baixo carbono.

Apesar da relevância dos achados, este estudo apresenta algumas limitações. A principal delas refere-se à indisponibilidade de dados técnicos específicos de cada embarcação (como a potência exata dos motores auxiliares e o consumo real de combustível), o que demandou o uso de médias por categoria de navio baseadas em estudos internacionais. Além disso, a análise concentrou-se exclusivamente no modo operacional de enquanto atracado, não contemplando emissões durante manobras, fundeio ou deslocamento nas áreas de aproximação portuária e nem as emissões oriundas das caldeiras.

Como recomendações para pesquisas futuras, sugere-se: estudos comparativos com outros portos nacionais e internacionais a avaliação do custo-benefício da implementação de OPS no contexto brasileiro, considerando aspectos técnicos, regulatórios e econômicos, pois este trabalho não teve foco em viabilidade econômica. Esses avanços são fundamentais para consolidar uma base científica que oriente políticas públicas voltadas à descarbonização do setor portuário.

Por fim, reforça-se a relevância deste estudo para o desenvolvimento sustentável do setor portuário, tanto em nível local quanto nacional, uma vez que a metodologia adotada apresenta potencial de replicação para outros portos, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais das atividades portuárias.

REFERÊNCIAS

ABU BAKAR, Nur Najihah *et al.* Electrification of onshore power systems in maritime transportation towards decarbonization of ports: A review of the cold ironing technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 178, p. 113243, maio 2023.

ACTEMIUM. **Onshore power supply**. Contagem, 1º jul. 2024. Disponível em: <https://www.actemium.com.br/ofertas/onshore-power-supply/onshore-power-supply/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **IDA**. Brasília, DF: Antaq, 2023. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/ResultadosIda/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Revisão da experiência internacional sobre redução das emissões no transporte marítimo e nos portos**. Brasília, DF: Antaq, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/RelatrioEixo1diagramado.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

AKAKURA, Y. Analysis of offshore waiting at world container terminals and estimation of CO2 emissions from waiting ships. **Asian Transport Studies**, [S. l.], v. 9, p. 100-111, 2023.

ALAMOUSH, A. S. *et al.* Consolidating port decarbonisation implementation: concept, pathways, barriers, solutions, and opportunities. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 19, p. 14185, 2023.

ALAMOUSH, A. S.; BALLINI, F.; ÖLÇER, A. I. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: a review. **Marine Pollution Bulletin**, [S. l.], v. 160, p. 111, 2020.

ALIANÇA BRASILEIRA PARA DESCARBONIZAÇÃO DE PORTOS. **Encontro 2024 da Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos**. Cabo de Santo Agostinho, 2024. Disponível em: <https://www.descarbonizacaoportos.com.br/event-details/encontro-2024-da-alianca-brasileira-para-descarbonizacao-de-portos>. Acesso em: 15 dez. 2024.

ALIANÇA BRASILEIRA PARA DESCARBONIZAÇÃO DE PORTOS. **Sobre**. Sumaré: ABDP, 2024. Disponível em: <https://www.descarbonizacaoportos.com.br/about>. Acesso em: 18 mar. 2025.

BOTANA, C.; FERNÁNDEZ, E.; FEIJOO, G. Towards a Green Port strategy: The decarbonisation of the Port of Vigo (NW Spain). **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 856, p. 159198, 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Brasília, DF: Aneel, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Plano mestre do complexo portuário do Itaqui**: objeto 1 – suporte no planejamento do setor portuário nacional: fase 1 – atualização dos planos mestres. [S. l.], 2018. Disponível em: https://www.portodoitaqui.com/_files/arquivos/plano-mestre.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

BULLOCK, S. *et al.* Improving shore power project economics at the port of aberdeen. **Marine Policy**, Netherlands, v. 152, p. 2-9, 2023.

BULLOCK, S.; HOLOHAN, C.; LARKIN, A. Accelerating shipping decarbonisation: A case study on UK shore power. **Heliyon**, [S. l.], v. 9, p. e17475, 2023.

BUONOMANO, A. *et al.* Future pathways for decarbonization and energy efficiency of ports: Modelling and optimization as sustainable energy hubs. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 420, p. 138389, 2023.

CAMMIN, P. *et al.* Monitoring of air emissions in maritime ports. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 87, p. 102479, 2020.

CARVALHO, Ana Carolina Coutinho; RODRIGUES, Taíssa Caroline Silva. Impactos das mudanças climáticas na bacia hidrográfica do itaqui: avaliação do aumento do nível do mar. **IOSR Journal of Business and Management**, New York, v. 26, n. 10, p. 36-43, 2024. Disponível em: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol26-issue10/Ser-11/F2610113643.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2025.

CASSERES, Eduardo Miranda Müller Drumond. **Potencial de mitigação das emissões de CO₂ do transporte marítimo internacional**: uma análise baseada em cenários para o caso dos navios-tanque de petróleo bruto. 2018. 185 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12263/1/EduardoMirandaMullerDrumondCasseres-min.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

CHEN, Shukai *et al.* An operational-mode-based method for estimating ship emissions in port waters. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 101, p. 103080, Dez. 2021.

CONVENÇÃO Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios. [S. l.], 2005. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/ccaimo/marpol#:~:text=A%20Convenção%20Internacional>

l%20para%20a,daquelas%20substâncias%20no%20ar%20e. Acesso em: 12 nov. 2024.

CUTRIM, Sérgio Sampaio; ROBLES, Leo Tadeu (org.). **Manifesto: ESG** portuário. São Luís: Editora da UFMA, 2022. *E-book*.

DAVID, Pierre A. **Logística internacional**. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

DESCARTES DATAMYNE DO BRASIL. **Unidade equivalente a vinte pés**: o que é um TEU no transporte marítimo? Vinhedo, 2023. Disponível em: <https://www.datamyne.com.br/nossos-produtos/dados-comerciais-globais/what-is-a-teu-in-shipping/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

EIT INNOENERGY. **A practical guide to decarbonising ports**: catalogue of innovative solutions. Eindhoven: Eit Innoenergy, 2022. Disponível em: https://eit.europa.eu/sites/default/files/decarbonising_ports-catalogue_of_innovative_solutions_f.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

EMAP entrega berço 102 do Porto do Itaqui. **Imirante**, São Luís, 27 mar. 2022. Disponível em: <https://imirante.com/noticias/maranhao/2010/08/31/emap-entrega-berco-102-do-porto-do-itaqui>. Acesso em: 17 dez. 2024.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui. **Histórico**. São Luís, 2023a. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/historico>. Acesso em: 17 dez. 2024.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui. **Infraestrutura**. São Luís, 2023b. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/infraestrutura>. Acesso em: 10 mar. 2024.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui. **Painel de carga**. São Luís, 2025. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/operacoes-portuarias/painel-de-carga>. Acesso em: 10 mar. 2025.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui. **Porto do Itaqui realiza 1º teste de ship to ship para combustíveis**. São Luís, 13 jul. 2023c. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/imprensa/noticia/porto-do-itaqui-realiza-1-teste-de-ship-to-ship-para-combustiveis>. Acesso em: 10 set. 2024.

ENTEC. **UK Ship Emission Inventory**: final report. [S. l.], 2010. Disponível em: https://uk-air.defra.gov.uk/reports/cat15/1012131459_21897_Final_Report_291110.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

ERICSSON, Patrik. **Shore-side power supply**: a feasibility study and a technical solution for an on-shore electrical infrastructure to supply vessels with electric power while in port. 2008. 180 f. Thesis (Master of Science) – Chalmers University of

Technology, Göteborg, 2008. Disponível em: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174062/174062.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

EUROPEAN SEA PORTS ORGANISATION. **ESPO green guide 2021**: a manual for European ports towards a green future. Brussel: ESPO, 2021. Disponível em: <https://www.espo.be/media/ESPO%20Green%20Guide%202021%20-%20FINAL.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

FADIGA, A.; FERREIRA, L. M. D. F.; BIGOTTE, J. F. Decarbonising maritime ports: a systematic review of the literature and insights for new research opportunities. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 452, p. 142-209, 2024.

FERREIRA, Laís Raysa Lopes. **Gestão ambiental sustentável do modal marítimo**: uma análise das emissões de dióxido de carbono de navios porta-contêineres. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

FONSECA, Maurílio Magalhães. **Arte naval**. 8. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2019.

FREITAS, D.; GERVÁSIO, H. The challenge of benchmarking carbon emissions in maritime ports. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 363, p. 125-170, 2024.

GORE, K.; RIGOT-MÜLLER, P.; COUGHLAN, J. Cost-benefit assessment of shore side electricity: an Irish perspective. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 326, p. 116755, 2023.

GOVERNO ressalta posição estratégica do Porto do Itaqui para exportação de grãos no Brasil durante 5º Diálogo Brasil-Japão. **O Imparcial**, São Luís, 10 set. 2024. Disponível em: <https://oimparcial.com.br/noticias/2024/09/governo-ressalta-posicao-estrategica-do-porto-do-itaqui-para-exportacao-de-graos-no-brasil-durante-5o-dialogo-brasil-japao/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

HARRISON, James. Recent developments and continuing challenges in the regulation of greenhouse gas emissions from international shipping. **Edinburgh School of Law Research Paper**. [S. l.], n. 12, p. 1-28, 2012. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2037038. Acesso em: 10 mar. 2024.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PORTS AND HARBORS. **Onshore power supply**. [S. l.], 2010. Disponível em: <https://sustainableworldports.org/project/iaph-onshore-power-supply>. Acesso em: 10 dez. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Fourth Greenhouse Gas Study 2020**. London: IMO, 2020. Disponível em: <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>. Acesso em: 10 set. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Second IMO GHG study 2009**. London: IMO, 2009. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **On-shore power supply**. Albert Embankment: IMO, 9 Oct. 2012. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Circ.794.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Third IMO greenhouse gas study 2014**: executive summary and final report. London: IMO, 2015. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/ThirdIMOGreenhouseGasStudy/GHG3%20ExecutiveSummaryand%20Report.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.

KIZIELEWICZ, Joanna. Onshore power supply: trends in research studies. **Frontiers Energy Research**, Lausanne, v. 12, 12 mar. 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1383142/full>. Acesso em: 10 dez. 2024.

KRÄMER, I.; CZERMAŃSKI, E. Onshore power one option to reduce air emissions in ports. **Springer Nature**, [S. l.], v. 28 p. 13-20, 2020.

LE MOS, Luane. **Manual de gestão ambiental portuária**. 2. ed. Curitiba: Editora Appris, 2024.

MARANHÃO. Governo do Estado. **Porto do Itaqui comemora o melhor ano de sua história**. São Luís, 14 jan. 2024. Disponível em: <https://www.ma.gov.br/noticias/porto-do-itaqui-comemora-o-melhor-ano-de-sua-historia>. Acesso em: 17 dez. 2024.

MASODZADEH, P. G. *et al.* The contribution of ports to shipping decarbonization: an analysis of port incentive programmes and the executive role of port state control. **Transport Economics and Management**, [S. l.], v. 2, p. 191-202, 2024.

MORENO-GUTIÉRREZ, Juan *et al.* Methodologies for estimating shipping emissions and energy consumption: a comparative analysis of current methods. **Energy**, [S. l.], v. 86, p. 603-616, 2015.

MORENO-GUTIÉRREZ, Juan; DURÁN-GRADOS, Vanessa. Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: towards zero uncertainties. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 750, p. 141471, Jan. 2021.

NGUYEN, P-N.; WOO, S-H.; KIM, H. Ship emissions in hotelling phase and loading/unloading in Southeast Asia ports. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 105, p. 103223, 2022.

OSIPOVA, L.; CARRARO, C. Shore power needs and CO₂ emissions reductions of ships in European Union ports: meeting the ambitions of the FuelEU Maritime and AFIR. *In*: INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION, 2023, Washington, DC. **Working Paper** [...]. Washington, DC: ICCT, 2023. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Shore-power-ships-EU-Fit-for-55-working-paper-24-v3.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PETROBRAS. **Combustíveis marítimos**: informações técnicas. [Rio de Janeiro]: Petrobras, 2021.

REUSSER, Carlos A.; PÉREZ, Joel R. Evaluation of the emission impact of cold-ironing power systems, using a bi-directional power flow control strategy. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 1, p. 334, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/334>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ROJAS, Pablo. **Introdução à logística portuária e noções de comércio exterior**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

SHEN, J. *et al.* Sources, calculation methods, and reduction strategies for GHG emissions at ports: current status and future trends. **Frontiers in Marine Science**, Lousanne, v. 12, Feb. 2025.

SOUSA Cláudia *et al.* Distribuição de combustíveis marítimos no brasil, em conformidade com o imo 2020: oportunidades e desafios para o brasil. **FGV Energia**, Rio de Janeiro, p. 1-18, 2020. Disponível em <https://repositorio.fgv.br/bitstreams/b59393f7-5388-4e72-a168-9c36defe5055/download>. Acesso em: 10 abr. 2024.

STOLZ, B. *et al.* The CO₂ reduction potential of shore-side electricity in Europe. **Applied Energy**, [S. l.], v. 285, p. 116425, 2021.

TERMINAL de fertilizantes começa a operar no Porto do Itaquí. **Portos e Navios**, Rio de Janeiro, 22 nov. 2023. Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/terminal-de-fertilizantes-comeca-a-operar-no-porto-do-itaqui>. Acesso em: 17 dez. 2024.

THE PORT OF BREMEN. **Cruise Terminal, modern, secure, purpose-built**. Bremerhaven, 2023. Disponível em: <https://www.bremenports.de/en/ports/bremerhaven>. Acesso em: 10 dez. 2024.

THE WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE. **Carbon Management for Port and Navigation Infrastructure**. Simon Bolivarlaan: PIANC, 2019. (EnviCom WG Report, 188). Disponível em: <https://www.pianc.org/publication/carbon-management-for-port-and-navigation-infrastructure/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

URDAHL, Kristin. **Watch out for new emission control areas**. [S. l.]: Gard, 24 Jan. 2024. Disponível em: <https://gard.no/insights/watch-out-for-new-emission-control-areas/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

UZUN, D. *et al.* Port energy demand model for implementing onshore power supply and alternative fuels. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 136, p. 104432, 2024.

VALE. **Tenha o tempo como seu aliado**: Mentor eficiência com o tempo. São Luís, 2025. Disponível em: <https://mentorporto.attotechnology.com.br/user/sign-in?next=/map>. Acesso em: 10 fev. 2025.

VIDAL, Leonardo de Carvalho. **Análise de viabilidade econômica e ambiental da utilização de energia elétrica com sistema Shore Power em um contexto para instalações portuárias Brasileiras**. 2021. 119 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3330/1/Tese_2022026.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

WANG, J. *et al.* Energia de costa para redução de emissões de navios em portos: uma análise bibliométrica. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, [S. l.], v. 188, p. 103639, 2024.

WANG, J. *et al.* Identifying industry-related opinions on shore power from a survey in China. **Transport Policy**, [S. l.], v. 134, p. 65-81, 2023.

YU, H. *et al.* Carbon footprints: Uncovering spatiotemporal dynamics of global container ship emissions during 2015-2021. **Marine Pollution Bulletin**, [S. l.], v. 209, p. 117165, 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS DA EMAP EM EXCEL

Nº ENTRADA	BERÇ	P. MOTOR AUX (kW)	ENERGIA CONSUMIDA (kWh)	MGO/MDO CONSUMIDO (T)	CO2 LIBERADO (T)	COMPRA DE MGO/MDO	ENERGIA ELÉTRICA
996	104	720	19.596,00	3,62526	11,62	R\$ 16.867,46	R\$ 15.167,30
987	108	720	84.264,00	15,58884	49,98	R\$ 72.531,13	R\$ 65.220,34
995	102	240	9.684,00	1,79154	5,74	R\$ 8.335,61	R\$ 7.495,42
994	103	150	11.055,00	2,045175	6,56	R\$ 9.515,71	R\$ 8.556,57
997	106	720	43.584,00	8,06304	25,85	R\$ 37.515,39	R\$ 33.734,02
990	99	150	24.485,00	4,529725	14,52	R\$ 21.075,72	R\$ 18.951,39
5	102	720	17.580,00	3,2523	10,43	R\$ 15.132,17	R\$ 13.606,92
993	105	240	26.736,00	4,94616	15,86	R\$ 23.013,30	R\$ 20.693,66
1	104	720	53.052,00	9,81462	31,47	R\$ 45.665,07	R\$ 41.062,25
2	108	720	52.824,00	9,77244	31,33	R\$ 45.468,82	R\$ 40.885,78
3	100	110	5.327,67	0,985618333	3,16	R\$ 4.585,85	R\$ 4.123,61
4	103	240	14.588,00	2,69878	8,65	R\$ 12.556,78	R\$ 11.291,11
10	104	720	20.940,00	3,8739	12,42	R\$ 18.024,33	R\$ 16.207,56
14	104	720	26.292,00	4,86402	15,59	R\$ 22.631,12	R\$ 20.350,01
7	106	620	60.171,00	11,131635	35,69	R\$ 51.792,83	R\$ 46.572,35
13	103	150	9.032,50	1,6710125	5,36	R\$ 7.774,82	R\$ 6.991,16
8	99	720	72.480,00	13,4088	42,99	R\$ 62.387,93	R\$ 56.099,52
11	108	720	77.652,00	14,36562	46,06	R\$ 66.839,78	R\$ 60.102,65
16	106	720	25.452,00	4,70862	15,10	R\$ 21.908,08	R\$ 19.699,85
15	104	720	34.332,00	6,35142	20,36	R\$ 29.551,63	R\$ 26.572,97
6	101	150	23.825,00	4,407625	14,13	R\$ 20.507,62	R\$ 18.440,55
17	103	150	9.030,00	1,67055	5,36	R\$ 7.772,67	R\$ 6.989,22
23	105	720	10.500,00	1,9425	6,23	R\$ 9.037,99	R\$ 8.127,00

APÊNDICE B – PROCESSO HISTÓRICO E MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ OFFSHORE

Até o final do século XIX, a poluição atmosférica causada por navios não era abordada de forma explícita nos debates ou regulamentações. Contudo, o tema estava implicitamente contemplado em algumas normativas, o que deixava suas interpretações sujeitas às perspectivas e interesses das partes envolvidas.

Em 1979, foi estabelecida a Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância (CLRTAP), abrangendo apenas 51 Estados-membros localizados na América do Norte, Europa e Ásia, todos do hemisfério norte. Embora voltada para o controle da poluição atmosférica, a convenção apresenta lacunas significativas: não estabelece medidas claras, limites quantitativos, metas específicas ou métodos padronizados para controle. O texto é pouco incisivo, recomendando apenas que os Estados-membros se empenhem em mitigar a poluição atmosférica transfronteiriça. No contexto do transporte marítimo, a convenção considera que as embarcações estão sujeitas à jurisdição do Estado cuja bandeira ostentam. Dessa forma, os navios podem ser classificados como potenciais fontes de poluição transfronteiriça (Zanella, 2018).

Em 1982, foi promulgada a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM). Embora também não apresente regras específicas para o combate à poluição atmosférica gerada por navios, a convenção estabelece a proibição de poluição do mar, incluindo aquelas provenientes da emissão de poluentes atmosféricos. O texto enfatiza que o desequilíbrio atmosférico pode impactar negativamente o ambiente marinho, contribuindo para fenômenos como acidificação, eutrofização e aquecimento dos oceanos (Brasil, 1990).

Conforme Zanella (2018), o principal objetivo da convenção é proteger o meio marinho, e, ao reconhecer que a atmosfera pode atuar como veículo de poluição, impõe-se a necessidade de controle. Para esse fim, a CNUDM contém disposições que obrigam os estados a estabelecerem legislações que regulamentem os espaços aéreos sob sua soberania, visando prevenir e mitigar a poluição atmosférica com potencial de afetar os oceanos.

Sob a perspectiva jurídica, a ausência de regras claras dificulta a atribuição de responsabilidade e culpa aos navios em relação à poluição atmosférica. A inexistência de limites e metas específicas enfraquece o compromisso por parte dos

armadores para adequação aos padrões ambientais, resultando em prejuízos significativos ao meio ambiente. Essa lacuna normativa evidencia a necessidade de regulamentações mais objetivas e rigorosas, o que culminou na criação do Anexo VI da Convenção MARPOL.

1.1 MARPOL Anexo VI

Após uma série de acidentes envolvendo embarcações e recorrentes práticas operacionais inadequadas, que resultaram em graves impactos ambientais, emergiu a necessidade de a comunidade marítima estabelecer regras e medidas para regulamentar a navegação e cessar esses acontecimentos. Nesse contexto, em 1973, ocorreu a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL), colegiada pela Organização Consultiva Intergovernamental Marítima (IMCO), que posteriormente passou a ser conhecida como IMO.

A convenção deu origem a um conjunto de normas específicas para regulamentar as operações marítimas comerciais, as quais entraram em vigor somente em 1978, sob o título de MARPOL 73/78. Esse marco regulatório representou um avanço significativo na governança ambiental do transporte marítimo.

A MARPOL, é dividida em 6 áreas, que correspondem aos maiores impactos ambientais causados pela navegação. São elas (Convenção [...], 2005):

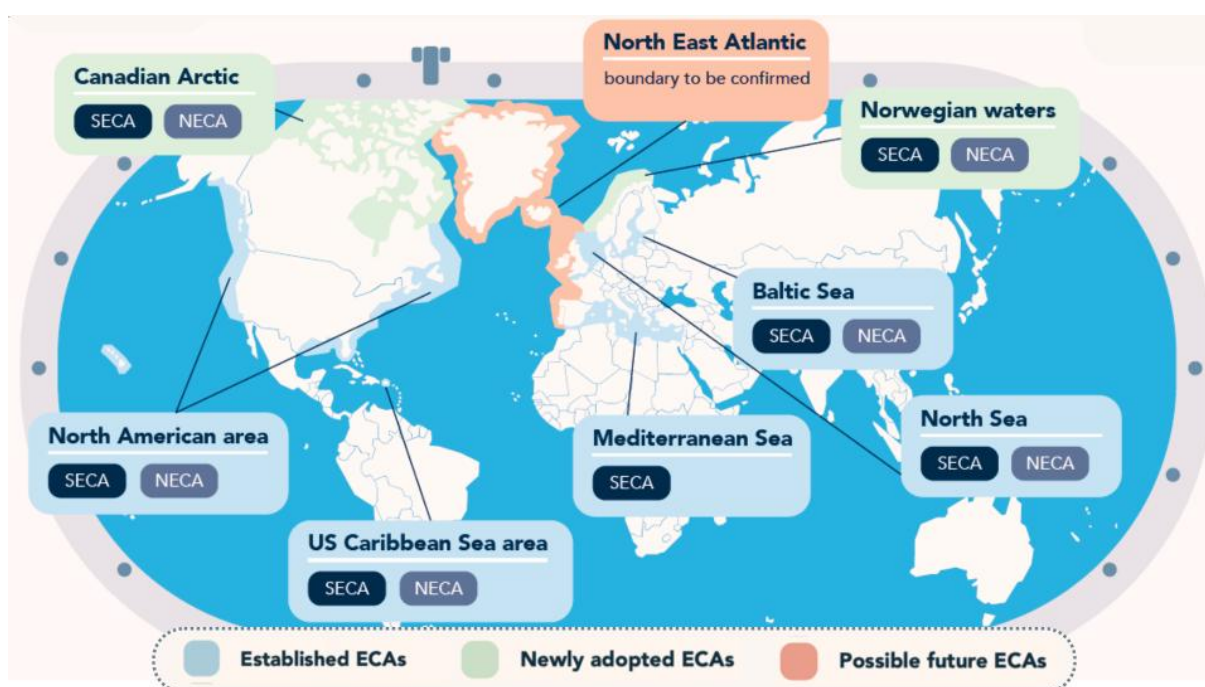
- a) Anexo I: Regulação para Prevenção de Poluição por Óleo Combustível;
- b) Anexo II: Regulação para Prevenção de Poluição por Carga líquida nociva transportada a granel;
- c) Anexo III: Regulação para Prevenção de Poluição por Substâncias Nocivas Carregadas em Embalagens;
- d) Anexo IV: Regulação para Prevenção de Poluição por Esgoto;
- e) Anexo V: Regulação para Descarte de Lixo dos Navios;
- f) Anexo VI: Prevenção de Poluição do Ar.

O Anexo IV começou a ser debatido em 1997, durante uma conferência em Londres sobre Poluição Atmosférica, e foi implementado apenas em 2005. Contudo, o longo intervalo entre sua elaboração e vigência revelou uma defasagem regulatória, dado o avanço tecnológico ocorrido nesse período de oito anos. Esse progresso permitiu que os limites estabelecidos fossem revisados e tornados mais rigorosos. Como resultado, em 2010, novos limites ajustados entraram em vigor (Freire, 2020).

O anexo foi desenvolvido com o objetivo principal de estabelecer, de forma clara e objetiva, limites para a emissão de poluentes atmosféricos por navios. Esses poluentes incluem aqueles que representam riscos à saúde humana, ao meio marinho, à camada de ozônio e que contribuem para o aumento do efeito estufa. Entre os principais compostos regulados estão os óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx), CO₂ e material particulado (Convenção [...], 2005).

De acordo com Ferreira (2019), o Anexo VI da MARPOL define as Áreas de Controle de Emissões (*Emission Control Area – ECA*), que são regiões sujeitas a um controle mais rigoroso sobre o combustível utilizado pelas embarcações. Nessas áreas, são estabelecidos limites mais restritivos para a emissão de SOx e NOx. As ECAs estão localizadas no Mar Báltico, Mar do Norte, parte da América do Norte, incluindo a costa dos Estados Unidos, e na região do Caribe. Conforme Urdahl (2024), a partir de maio de 2024, após reunião do *Marine Environment Protection Committee* (MEPC) 81 em abril de 2024 entrará em vigor as áreas do Ártico Canadense e das Águas Norueguesas e será discutida a inserção do Oceano Atlântico Nordeste, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Atuais e futuras Áreas de Controle de Emissão



Fonte: Clean Arctic Alliance (2023).

O anexo proíbe a instalação de equipamentos que contenham substâncias redutoras da camada de ozônio e, além disso, estabelece que navios construídos a partir de 2020 não podem utilizar hidrofluorcarbonetos (MARPOL 73/78) (Convenção [...], 2005).

Em relação às emissões de NO_x, a MARPOL 73/78 estabelece normas progressivas que limitam a emissão desses compostos com base em uma correlação entre o ano de construção do navio, o peso equivalente de dióxido de nitrogênio (NO₂) e a velocidade nominal do motor (Convenção [...], 2005).

Para as emissões de SO_x, foram estabelecidos limites progressivos, culminando, em 2019, na exigência de que nenhum combustível utilizado a bordo contenha um teor de enxofre superior a 0,5% m/m. Nas ECAs, o limite é ainda mais restritivo, sendo estabelecido em 0,1% m/m desde 2015 (Convenção [...], 2005). Além do uso de combustíveis com menor teor de enxofre, o anexo permite, em alguns casos, a adoção de tecnologias secundárias para redução de emissões, como o Sistema de Tratamento de Gases de Exaustão (*Exhaust Gas Cleaning System – EGCS*), comumente conhecidos como scrubbers.

De acordo com Ferreira (2019), em relação aos Compostos Orgânicos Voláteis (*Volatile Organic Compounds – VOCs*), o anexo não define limites específicos para suas emissões, delegando aos Estados a responsabilidade de estabelecer normas próprias. No entanto, os Estados devem comprovar junto à IMO que possuem regulamentações específicas e mecanismos de controle para os VOCs. O anexo também exige que as embarcações possuam o Certificado Internacional de Prevenção da Poluição Atmosférica, emitido durante a vistoria inicial e renovado periodicamente. Além disso, determina que os navios devem manter a bordo um Plano de Gerenciamento de VOCs. Por fim, o anexo estipula que, além do Estado de registro da embarcação, os Estados-portos são responsáveis por realizar inspeções, quando necessário.

1.1.1 Medidas para controle da emissão de dióxido de carbono por navios

De acordo com Freire (2020), durante o Protocolo de Quioto, em 1997, a IMO foi instada a estabelecer limites para as emissões de GEE, considerando que também é sua responsabilidade controlar e reduzir essas emissões provenientes do

setor marítimo. Em resposta, em 2003, entrou em vigor a Resolução A.963, intitulada Políticas e Práticas da IMO em Matéria de Redução de Gases de Efeito Estufa.

Seguindo a estratégia delineada pela resolução, em 2005, a IMO incentivou os armadores a adotarem diretrizes voluntárias, promovendo a colaboração dessas empresas na coleta de dados essenciais, como a distância percorrida, carga transportada, tipo e quantidade de combustível consumido durante as viagens, e a estimativa das emissões de carbono. Posteriormente, tornou-se obrigatório para os navios manterem o *Oil Record Book*, um registro sistemático dessas informações. Inicialmente esses dados permitiram que os armadores estabelecessem objetivos e estratégias para otimizar a eficiência energética de suas embarcações, considerando as particularidades de suas operações. Além disso, tais informações foram fundamentais para a IMO na formulação do Índice de Gases de Efeito Estufa (Harrison, 2012).

Conforme Freire (2020), em 2006 a IMO lança o “Plano de Trabalho para Identificar e Desenvolver os Mecanismos Necessários para Alcançar Limitação ou Reduzir as Emissões de CO₂ do Transporte Marítimo Internacional”. Como fruto desse plano é criado o Índice de Eficiência Energética voltado para o CO₂.

De acordo com Freire (2020), em 2006 a IMO lançou o *Plano de Trabalho para Identificar e Desenvolver os Mecanismos Necessários para Alcançar a Limitação ou Redução das Emissões de CO₂ do Transporte Marítimo Internacional*. Como resultado dessa iniciativa, foi desenvolvido o Índice de Eficiência Energética, voltado especificamente para a mitigação das emissões de CO₂ no setor marítimo.

Em 2011, a Resolução MEPC 203(62) introduziu o Capítulo de Regras sobre Eficiência Energética para Navios, estabelecendo como meta a redução de 30% no consumo de energia dos navios até 2025. Essa regulamentação aplica-se a embarcações com porte bruto superior a 400 toneladas, construídas a partir de 2013. Entre as principais iniciativas dessa regulamentação, destacam-se a criação do Índice de Eficiência Energética do Projeto (*Energy Efficiency Design Index – EEDI*) e do Plano de Gestão de Eficiência Energética do Navio (*Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP*) (International Maritime Organization, 2011).

O Índice de Eficiência Energética do Projeto (EEDI) concentra-se exclusivamente em novos projetos de embarcações, com o objetivo de otimizar o desempenho global desde a fase de concepção. Essa otimização abrange aspectos como a eficiência do motor, o desempenho das hélices e a hidrodinâmica da

embarcação, promovendo a redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões de gases de efeito estufa.

O Plano de Gestão de Eficiência Energética do Navio (SEEMP) atua como um guia estratégico de boas práticas operacionais e de manutenção, com o objetivo de aprimorar o monitoramento e a redução das emissões de CO₂. Entre as estratégias recomendadas pelo SEEMP estão o planejamento eficiente de rotas, a análise da velocidade de navegação, a limpeza regular dos cascos, o cumprimento rigoroso dos planos de manutenção dos motores e a adoção de combustíveis alternativos mais limpos.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Decreto nº 99.165, de 12 de março de 1990**. Promulga a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar. Brasília, DF: Presidência da República, 1990. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1990/decreto-99165-12-marco-1990-328535-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 10 dez. 2025.

CLEAN ARCTIC ALLIANCE. **Infographic**: emission control areas – reducing air pollution from shipping. [S. l.], 28 jun. 2023. Disponível em: <https://cleanarctic.org/2023/06/28/infographic-emission-control-areas-reducing-air-pollution-from-shipping/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

CONVENÇÃO Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios. [S. l.], 2005. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/ccaimo/marpol#:~:text=A%20Convenção%20Internacional%20para%20a,daquelas%20substâncias%20no%20ar%20e>. Acesso em: 12 nov. 2024.

FREIRE, Tânia Sofia Martinho. **Emissões gasosas de navios de cruzeiro**: impactes das águas de lavagem dos scrubbers no meio marinho. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Qualidade e Ambiente) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2020.

HARRISON, James. Recent developments and continuing challenges in the regulation of greenhouse gas emissions from international shipping. **Edinburgh School of Law Research Paper**. [S. l.], n. 12, p. 1-28, 2012. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2037038. Acesso em: 10 mar. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Resolution MEPC.203(62), on 15 July 2011**. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution From Ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto. [S. l.], 2011. Disponível em: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.203\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.203(62).pdf). Acesso em: 10 set. 2024.

ZANELLA, Tiago Vinicius. Navios e poluição do ar: um estudo sobre a regulação das emissões atmosféricas por embarcações. **Revista da Escola de Guerra Naval**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 1-15, 2018.