



Entrega 3: Plano de Descarbonização do Porto de Itaquí

Abril/2025

ÍNDICE

RESUMO EXECUTIVO	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. CONTEXTO DO PORTO DO ITAQUI	12
2.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS	12
2.2. SITUAÇÃO ATUAL	16
2.3. MOTIVAÇÕES	19
3. METODOLOGIA	21
3.1. ALINHAMENTO AO SBTI	22
3.2. METAS DE DESCARBONIZAÇÃO	22
3.3. ANO-ALVO	23
3.4. PREÇO CARBONO	24
4. SITUAÇÃO FUTURA	25
4.1. PROJEÇÃO DE NAVIOS E REBOCADORES	27
4.2. PROJEÇÃO DA EMAP E TERMINAIS	28
4.3. PROJEÇÃO DE CAMINHÕES E FERROVIAS	29
4.4. PROJEÇÃO GLOBAL	30
5. TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	32
5.1. NAVIOS	32
5.2. REBOCADORES	35
5.3. TERMINAIS	36
5.4. CAMINHÕES	41
5.5. FERROVIAS	43
5.6. ESTUDO DE POTENCIAL FOTOVOLTAICO E ARMAZENAMENTO	44
5.6.1. POTENCIAL SOLAR	44
5.6.2. NECESSIDADE DE ARMAZENAMENTO	48
5.7. HIDROGÊNIO RENOVÁVEL	52
5.8. COMPENSAÇÃO	53
6. PLANO DE AÇÃO	55
6.1. AÇÕES IDENTIFICADAS EMAP	55
6.2. NAVIOS	56
6.3. REBOCADORES	60
6.4. TERMINAIS	61
6.5. CAMINHÕES	63
6.6. FERROVIAS	65

6.7. CENÁRIOS	66
6.7.1. CENÁRIO CONSERVADOR	67
6.7.2. CENÁRIO OTIMISTA	69
6.7.3. COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS	71
6.7.4. VPL	72
6.8. COMPENSAÇÃO	75
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS	78
ANEXO I – DETALHE DAS MEDIDAS PROPOSTAS	80
ANEXO II - ESTUDO DO POTENCIAL SOLAR, NECESSIDADE DE ARMAZENAMENTO E PRODUÇÃO LOCAL DE HIDROGÊNIO NO PORTO DO ITAQUI	91
1. INTRODUÇÃO	91
2. SUBTAREFA 1: POTENCIAL SOLAR	93
2.1. METODOLOGIA	93
2.2. IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM POTENCIAL PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	94
2.3. PROPOSTA INICIAL: ÁREAS INTERNAS	94
2.4. ABORDAGEM AMPLIADA: ÁREAS EXTERNAS À POLIGONAL PORTUÁRIA	96
2.5. CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS	99
2.6. INVESTIMENTO INICIAL	100
2.7. ECONOMIA ANUAL ESTIMADA	101
2.8. PERÍODO DE RETORNO DO INVESTIMENTO (ROI)	101
2.9. CUSTOS DE MANUTENÇÃO	102
2.10. PERFIS ANUAIS DE GERAÇÃO COM GRANULARIDADE HORÁRIA	102
3. SUBTAREFA 2: NECESSIDADE DE ARMAZENAMENTO	105
3.1. AVALIAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ARMAZENAMENTO ENERGÉTICO	105
3.2. ESTUDO TÉCNICO SOBRE O POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO (CENÁRIOS)	107
4. SUBTAREFA 3: PRODUÇÃO LOCAL DE HIDROGÊNIO	111
4.1. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO NO PORTO	111
4.2. CAPACIDADE PROPOSTA PARA A PLANTA DE ELETRÓLISE	112
4.3. TECNOLOGIAS PROPOSTAS PARA O ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	114
4.4. DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO	115
4.5. CÁLCULO DO LCOH – CUSTO NIVELADO DO HIDROGÊNIO NO PORTO DE ITAQUI	116
4.6. INTEGRAÇÃO COM A GERAÇÃO RENOVÁVEL DO PORTO	117
5. CONCLUSÃO	119
6. REFERÊNCIAS	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Porto do Itaqui.	12
Figura 2 - Acessos intermodais no Porto de Itaqui.	13
Figura 3 - Conexões rodoviárias e ferroviárias do Porto do Itaqui com a hinterlândia.	14
Figura 4 - Localização das subestações elétricas dentro do porto.	15
Figura 5 - Distribuição do volume de cargas movimentadas no Porto do Itaqui em 2022, por tipo e produto.	15
Figura 6 – Emissões incluídas no Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui	16
Figura 7 - Registro de escalas em 2022, por tipo de carga, berços de atracação e comprimento das embarcações.	17
Figura 8 - Emissões dos navios em atracação, por tipo de carga e berço.	17
Figura 9 - Emissões da carga transportada por caminhão.	18
Figura 10 - Emissões da carga transportada por ferrovia.	19
Figura 11 - Benefícios estratégicos da descarbonização para a competitividade portuária.	20
Figura 12 - Metodologia adotada para a elaboração do Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui.	21
Figura 13 - Elementos para definição de metas baseadas na ciência.	22
Figura 14 - Trajetórias de emissões para o setor marítimo.	23
Figura 15 - Definição do ano-meta para o Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui.	23
Figura 16 - Estimativa futura USD tCO ₂	24
Figura 17 - Previsões de carga (toneladas)	25
Figura 18 - Ampliação da infraestrutura portuária do Porto do Itaqui: previsão de novos berços até 2035.	26
Figura 19 - Áreas arrendadas e plano de expansão da Santos Brasil para terminais de combustíveis no Porto do Itaqui.	27
Figura 20 - Projeção de Navios e Rebocadores.	28
Figura 21 - Projeções anuais de emissões da EMAP e dos terminais até 2050.	29
Figura 22 - Projeções anuais de emissões de caminhões e ferrovias até 2050.	30
Figura 23 - Projeções anuais de emissões do Porto do Itaqui até 2050.	31
Figura 24 - Instalação de sistema OPS em média tensão para navios de cruzeiro, Terminal de Altona, Hamburgo.	32
Figura 25 - Exemplo de combustível alternativo de baixa emissão (amônia) (a), e propulsão híbrida com baterias (Ro-Ro, Grimaldi) (b).	33
Figura 26 - Imagem conceitual da solução BlueBARGE.	33
Figura 27 - Solução Elemanta (Hydrogen power Barge).	34
Figura 28 - Solução Stillstrom.	34
Figura 29 - Guindastes móveis elétricos de cais.	38
Figura 30 - Empilhadeira elétrica Hyster.	38
Figura 31 - Reach Stacker elétrica de Kalmar.	39

Figura 32 - Pá carregadeira elétrica de Volvo.	39
Figura 33 - Mini retroescavadeira de hidrogênio de JCB.	40
Figura 34 - Caminhão elétrico de Terberg.	40
Figura 35 - Caminhão de biometano de Scania.	41
Figura 36 - Programa francês Objectif CO2.....	42
Figura 37 - Iniciativas de descarbonização com GNL.	43
Figura 38 - Irradiação considerada para o Porto de Itaquí Itaquí.	45
Figura 39 - Área disponível em zonas sob controle	46
Figura 40 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 1).	50
Figura 41 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 2).	51
Figura 42 - Hidrogeradora do projeto H2Ports localizada no Porto de Valência.....	52
Figura 43 - Principais ações sugeridas para a descarbonização do Porto de Itaquí.	55
Figura 44 - Esquema geral de conexão OPS em média tensão.	56
Figura 45 - Esquema simplificado de infraestrutura elétrica para fornecimento de OPS aos berços 104, 106 e 108.	57
Figura 46 - Exemplo de instalação OPS para navios tanque: Projeto The Green Cable para navios tanque no Porto de Gotemburgo.....	58
Figura 47 - Comunidade portuária colaborativa para a descarbonização do porto.	62
Figura 48 - Mapa da Hinterlândia do Porto do Itaquí.	64
Figura 49 - Caminhão a GNL da Virtu GNL em operação no Porto do Itaquí.....	64
Figura 50 - Mapa de eletrificação de ferrovias no Brasil.	65
Figura 51 - Locomotivas híbridas ZTR.	66
Figura 52 - Emissões evitadas por medida no cenário conservador.....	68
Figura 53 - Investimentos previstos por medida no cenário conservador.	68
Figura 54 - Emissões anuais do Porto do Itaquí no cenário conservador.	69
Figura 55 - Emissões evitadas por medida no cenário otimista.	69
Figura 56 - Investimentos previstos por medida no cenário otimista.	70
Figura 57 - Emissões anuais do Porto do Itaquí no cenário otimista.....	70
Figura 58 - Emissões do Porto do Itaquí até 2050 conforme o cenário.....	71
Figura 59 - Emissões específicas do Porto do Itaquí até 2050 conforme o cenário.	72
Figura 60 - VPL Conservador.	74
Figura 61 - VPL Otimista.	75
Figura 62 - Irradiação considerada para o Porto de Itaquí.	93
Figura 63 - Áreas disponíveis para instalação de painéis fotovoltaicos em zonas controladas pela EMAP.	94
Figura 64 - Pannel de média tensão da EMAP [6].	97

Figura 65 - Produção e irradiação solar mensal calculadas pelo software PVGIS.	103
Figura 66 - Perfil horário de geração diária (janeiro).....	103
Figura 67 - Perfil horário de geração semanal (agosto).....	103
Figura 68 - Geração horária anual - ano de referência.	104
Figura 69 - Parâmetros técnico-econômicos da otimização da	108
Figura 70 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 1).	109
Figura 71 - Parâmetros técnico-econômicos da otimização da	110
Figura 72 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 2).	111
Figura 73 - Eletrolisador Alcalino Atmosférico Nel Hydrogen.....	113
Figura 74 - Eletrolisador PEM ITM de 1 MW.....	113
Figura 75 - Hidrogeneradora do projeto H ₂ Ports localizada no Porto de Valência.	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da pegada de carbono do Porto do Itaqui em 2022.....	16
Tabela 2 - Parâmetros Técnicos da Produção de Hidrogênio	53
Tabela 3 - Papéis de uma autoridade portuária na compensação de emissões.....	54
<i>Tabela 4 - Dados dos navios de granel líquido que fizeram escala nos berços 104, 106 e 108 no ano de 2022.</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 5 - Lista de ações para navios.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 6 - Ação proposta para navios na área de fundeio.</i>	<i>59</i>
Tabela 7 - Estimativa de Manobras/Rebocador.....	61
Tabela 8 - Estimativa de Consumo com Rebocadores Elétricos.	61
Tabela 9 - Ações Propostas para a Descarbonização do Setor	61
Tabela 10 - Ações propostas para operadores portuários.....	63
Tabela 11 - Ações propostas para descarbonização do transporte terrestre associado ao Porto do Itaqui.....	65
Tabela 12 - Ação proposta para descarbonização das operações ferroviárias no Porto do Itaqui.	66
Tabela 13 - Medidas de descarbonização propostas para o Porto do Itaqui com seus cenários.	67
Tabela 14 - Redução de emissões do Porto do Itaqui por cenário.	71
Tabela 15 - VPL Positivo.	73
Tabela 16 - Superfícies identificadas no terreno da EMAP.....	95
Tabela 17 - Superfícies necessárias para a geração fotovoltaica.....	99
Tabela 18 - Características técnicas das instalações previstas.	99
Tabela 19 - Componentes do custo da eletricidade estimáveis para o Porto de Itaqui.	100
Tabela 20 - Custo por tipo de instalação.....	101
Tabela 21 - Parâmetros de entrada no PVGIS.....	102
Tabela 22 - Estimativa de custos por bloco funcional para sistema de hidrogênio verde.	116

LISTA DE TERMOS

SIGLA	DESCRIÇÃO
BaU	Tendencial, ou Sem Ações de Mitigação (<i>Business as Usual</i>)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
Bio-GNL	Biogás Liquefeito Natural (<i>Liquefied Natural Gas</i>)
BlueBARGE	Unidade flutuante de fornecimento de energia (<i>Energy Barge Solution</i>)
BT	Baixa Tensão
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	Equivalente de Dióxido de Carbono
Drop-in	Combustível alternativo compatível com motores existentes
EIA/RIMA	Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental
EMAP	Empresa Maranhense de Administração Portuária
Fuel Cells	Células a combustível
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNC	Gás Natural Comprimido
H ₂	Hidrogênio
H ₂ PORTS	Projeto de uso de hidrogênio nos portos
HVO	Óleo Vegetal Hidrotratado (<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>)
Hz	Unidade de frequência (Hertz)
IFC	Corporação Financeira Internacional (do Banco Mundial) (<i>International Finance Corporation (World Bank Group)</i>)
IMO	Organização Marítima Internacional (<i>International Maritime Organization</i>)
ISP	Índice de Sustentabilidade Portuária
kg	Quilograma
kgCO ₂ /t	Quilograma de CO ₂ por tonelada transportada
kVA	Quilovolt-Ampere (potência aparente)
kW	Quilowatt (potência ativa)
kWh	Quilowatt-hora (energia elétrica consumida)
kWp	Quilowatt-pico (potência solar instalada)
k€	Mil Euros
M€	Milhão de Euros
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
MVA	Megavolt-Ampere (potência elétrica aparente)
m ²	Metro quadrado
OPS	Fornecimento de Energia em Terra (<i>Onshore Power Supply</i>)

SIGLA	DESCRIÇÃO
RTG	Pórtico sobre Pneus (<i>Rubber-Tired Gantry</i>)
SBTi	Iniciativa de Metas Baseadas na Ciência (<i>Science Based Targets initiative</i>)
SCC	Custo Social do Carbono (<i>Social Cost of Carbon</i>)
Stillstrom	Solução flutuante para fornecimento de energia para navios ancorados
TGL	Terminal Graneleiro do Maranhão
TEQUIMAR	Terminal Químico de Aratu
tCO ₂ eq	Tonelada de Equivalente de Dióxido de Carbono
US\$	Dólares Americanos
V	Volt
VPL	Valor Presente Líquido
VTMIS	Sistema de Gerenciamento do Tráfego Marítimo (<i>Vessel Traffic Management Information System</i>)
W	Watt
°C	Graus Celsius

RESUMO EXECUTIVO

O presente documento apresenta o Plano de Descarbonização do Porto do Itaquí, uma rota estratégica elaborada para reduzir progressivamente as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas às suas atividades. O plano está inserido no contexto do compromisso global de enfrentamento das mudanças climáticas e está alinhado com iniciativas internacionais, propondo ações concretas para a descarbonização do Porto do Itaquí até 2050.

O Plano de Descarbonização tem como base o cálculo da pegada de carbono realizado para o Porto do Itaquí, com ano base de 2022. Para isso, foi analisado o contexto específico do porto atual e futuro, considerando as características operacionais, expansões previstas e as tendências de transição energética no setor portuário. A metodologia adotada combina uma abordagem técnica com um processo participativo, contando com a colaboração direta da EMAP. O plano foi construído com base em análises quantitativas que permitem estimar o impacto de diversas medidas na redução de emissões, apoiadas por modelos específicos e em dados de tráfego portuário atuais e projetados.

Essas informações, juntamente com a definição do ano-meta do plano e o preço estimado do carbono, permitiram a avaliação de cenários futuros para o Porto do Itaquí, com o objetivo de orientar a tomada de decisão em direção a uma transição energética realista e eficaz.

O Plano estabelece metas de descarbonização com base no perfil atual e projetado de emissões, e apresenta uma análise detalhada das tecnologias disponíveis para os diferentes modais e atores do ecossistema portuário: embarcações, rebocadores, terminais portuários, caminhões, ferrovias, além de soluções energéticas como geração fotovoltaica e hidrogênio renovável. A partir dessa base, é proposto um plano de ação estruturado, com medidas específicas para cada ator envolvido, apresentando seu respectivo potencial de redução de emissões e o custo estimado de implementação. São analisados dois cenários de implementação — conservador e otimista — que permitem avaliar diferentes trajetórias de descarbonização conforme o grau de adoção das medidas propostas. A comparação entre os dois cenários demonstra que é possível alcançar uma redução significativa das emissões, chegando a apenas 12 kt ou até 9 kt de CO₂eq emitidos em 2050, dependendo do nível de ambição adotado.

Por fim, o documento inclui estimativas de custos associados à compensação das emissões residuais que não possam ser eliminadas, dadas as atividades portuárias, bem como uma análise econômica geral do plano.

1. Introdução

A mudança climática é um dos principais desafios do século XXI. De acordo com os registros climáticos, cada uma das últimas quatro décadas foi progressivamente mais quente do que qualquer década anterior desde 1850. O aquecimento global causado pela atividade humana é inegável, e cada tonelada de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) contribui para esse fenômeno, provocando mudanças rápidas e generalizadas na atmosfera, oceanos, criosfera e biosfera.

Em escala global, os esforços pela descarbonização têm se intensificado em resposta à crescente urgência de mitigar os impactos da mudança climática. Acordos internacionais, como o Acordo de Paris, estabeleceram metas claras para atingir o pico global de emissões de GEE o mais breve possível, com reduções rápidas baseadas nas melhores evidências científicas disponíveis. No Brasil as políticas de mudança climática têm incentivado a transição para fontes energéticas renováveis, a eletrificação de setores estratégicos e a descarbonização da logística e dos transportes. Em particular, o país busca fortalecer iniciativas nos portos, promovendo práticas mais sustentáveis para reduzir as emissões associadas às operações marítimas e terrestres.

Os portos são infraestruturas essenciais para o comércio global, viabilizando o transporte de mercadorias. No entanto, suas atividades também geram uma quantidade significativa de emissões de GEE. As operações de carga e descarga, o transporte terrestre, a navegação e o uso de equipamentos e maquinários no ambiente portuário, juntamente com a própria infraestrutura e a crescente demanda por serviços logísticos, ainda dependem fortemente de combustíveis fósseis, contribuindo de forma relevante para a mudança do clima e elevando a pegada de carbono do setor.

Nesse contexto, calcular a pegada de carbono de um porto é o primeiro passo para identificar e quantificar as fontes de emissões de GEE associadas às suas operações. Esse levantamento permite que a autoridade portuária compreenda o alcance de seu impacto ambiental e estabeleça estratégias específicas para reduzi-lo. Com base nessas informações, a implementação de planos de descarbonização torna-se uma ferramenta fundamental para promover a transição para um modelo operacional mais sustentável.

Ao reduzir as emissões de GEE e otimizar o uso dos recursos, os portos contribuem efetivamente para o enfrentamento da crise climática, ao mesmo tempo em que aumentam sua eficiência operacional e competitividade no mercado global.

Este relatório parte do cálculo da pegada de carbono do Porto do Itaqui, realizado com ano base de 2022, e define um plano de descarbonização com o objetivo de promover uma transição para operações mais sustentáveis, alinhadas aos compromissos globais de redução de emissões e à melhoria da eficiência portuária.

2. Contexto do Porto do Itaqui

2.1. Localização e características gerais

O Porto do Itaqui está localizado em São Luís, Maranhão, Brasil, e é um dos principais portos do país para a movimentação de grãos sólidos e líquidos. Sua posição estratégica na costa atlântica facilita a conexão com mercados nacionais e internacionais, tornando-se um hub logístico essencial para o agronegócio, a mineração e os combustíveis.

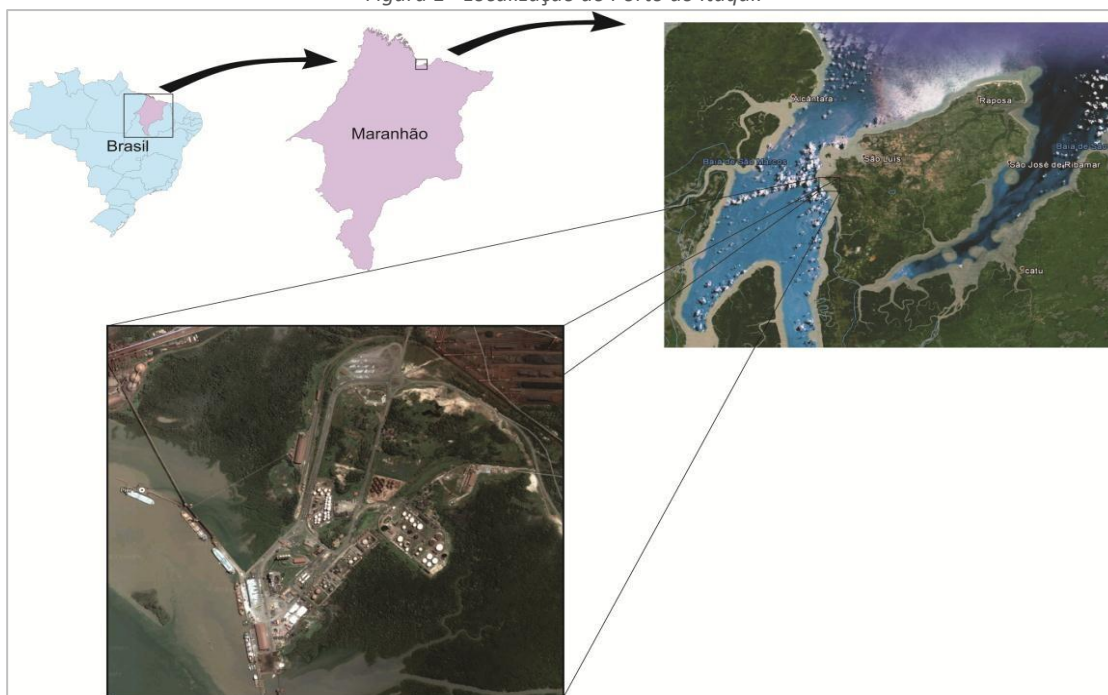
1. Cais e Terminais

O porto conta com nove berços operacionais, projetados para a movimentação de diversos tipos de carga, incluindo:

- Granel Sólido Vegetal (grão de soja, milho e farelo de soja, trigo, arroz);
- Granel Sólido Mineral (fertilizantes, Ferro-Gusa, Carvão Mineral, Escória, clínquer e calcário, concentrado de cobre);
- Granel Líquido-combustíveis e químicos (derivados de petróleo-combustível e GLP);
- Carga geral (celulose).

Sua infraestrutura moderna permite o atracamento de **embarcações de grande porte**, otimizando as operações portuárias e garantindo alta eficiência logística.

Figura 1 - Localização do Porto do Itaqui.



Fonte: EMAP.

2. Acessos e Conectividade

O Porto do Itaquí conta com acessos intermodais que garantem um transporte eficiente e integrado:

- **Ferrovias:** conectado à Ferrovia Norte-Sul, o que permite o transporte da produção agrícola e mineral a partir do interior do Brasil.
- **Rodovia:** interligado às principais rodovias federais, facilitando o transporte terrestre de cargas.
- **Marítimo:** canal de acesso com profundidade adequada para a recepção de navios de grande calado.

Figura 2 - Acessos intermodais no Porto de Itaquí.



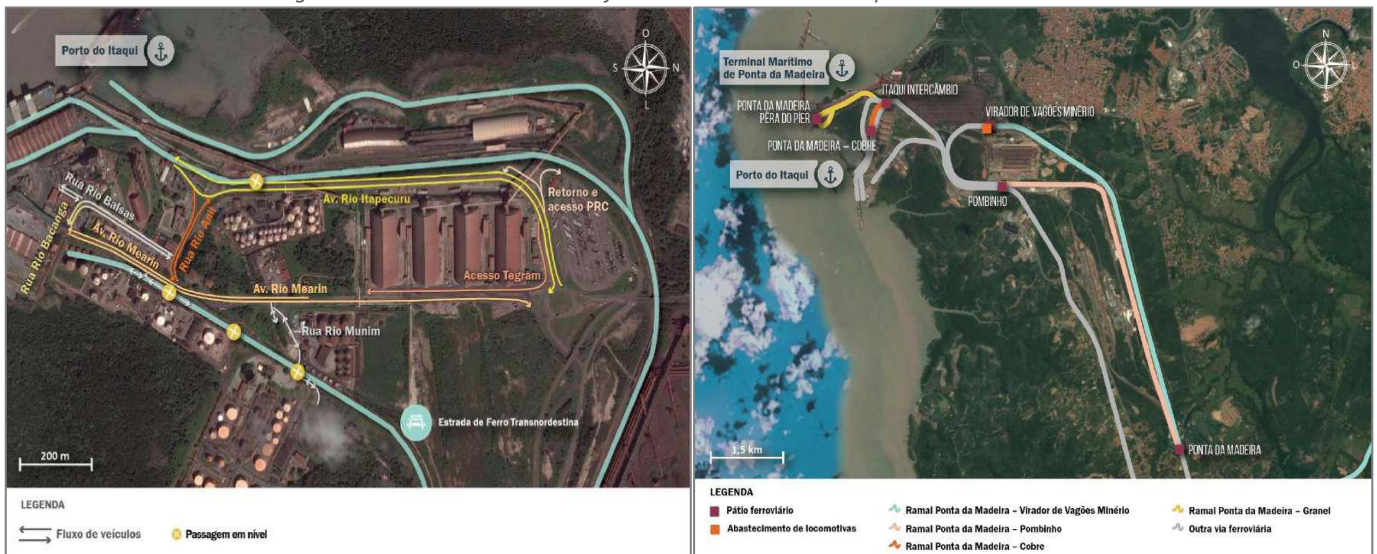
Fonte: EMAP

3. Conexão com o Hinterlândia

O Porto do Itaquí está conectado com sua hinterlândia por meio das rodovias BR-135 e BR-222, além das vias ferroviárias.

- **Caminhões:** com acesso ao porto pela Av. dos Portugueses ou pela Av. Eng. Emiliano Macieira, os caminhões se dirigem aos terminais Tegram, VLI, Ultracargo, Eneva, Moinhos, DATA, COPI, Pedreiras e Transpetro.
- **Ferrovias:** com um ramal de entrada e outro de saída, os trens atendem os terminais VALE, Tegram, Granel Química Ltda., Petrobras, Ultracargo e Itacel.

Figura 3 - Conexões rodoviárias e ferroviárias do Porto do Itaqui com a hinterlândia.



Fonte: EMAP

A rede elétrica de média tensão (13.800 V) que abastece o Porto do Itaqui é de propriedade da Concessionária de Energia local (Equatorial Energia) até o limite de propriedade da Autoridade Portuária. A partir desse ponto, a rede continua subterrânea até a subestação receptora, sendo essa seção de propriedade da Autoridade Portuária. A demanda contratada da área portuária (área primária do porto) com a concessionária é de 400 kW.

Os berços são alimentados com rede de Baixa Tensão (BT). Existe rede de média tensão até as subestações existentes: a SE receptora, localizada próximo ao castelo d'água; a SE-01 (eletrocentro), nas proximidades dos berços 101/102, a SE-02(eletrocentro), nas proximidades do berço 103/104 e a SE-03, nas proximidades do Berço 105. O valor da tensão da rede é de **13.800V**.

Potências Nominais:

- **Subestação Receptora:** 500 kVA
- **Subestação 01:** 500 kVA (iluminação e força)/300 kVA (sistema de combate a incêndio)
- **Subestação 02:** 500 kVA
- **Subestação 03:** 500 kVA (iluminação e força)/300 kVA (sistema de combate a incêndio)

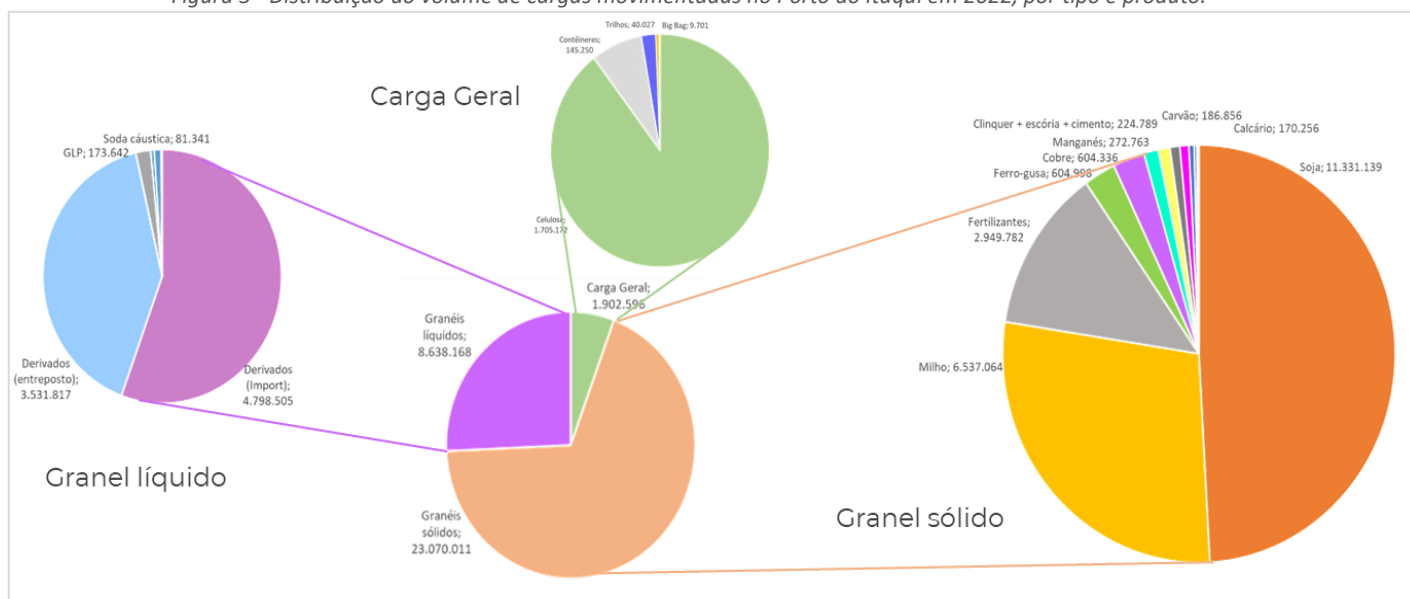
Figura 4 - Localização das subestações elétricas dentro do porto.



Fonte: EMAP.

Em 2022, foram movimentadas no porto cerca de 34 milhões de toneladas, sendo que o principal tipo de carga foi granel sólido (69%), seguido por granel líquido (26%) e carga geral (5%). O tráfego de granel sólido é dominado por soja (33% de todo o tráfego do porto), milho (20%) e fertilizantes (9%). A principal mercadoria de granel líquido são os derivados de petróleo para importação (14%), seguidos por hidrocarbonetos para transbordo (10%). O tráfego de celulose representa 5% do total movimentado no porto.

Figura 5 - Distribuição do volume de cargas movimentadas no Porto do Itaquí em 2022, por tipo e produto.



Fonte: Fundación Valenciaport.

2.2. Situação atual

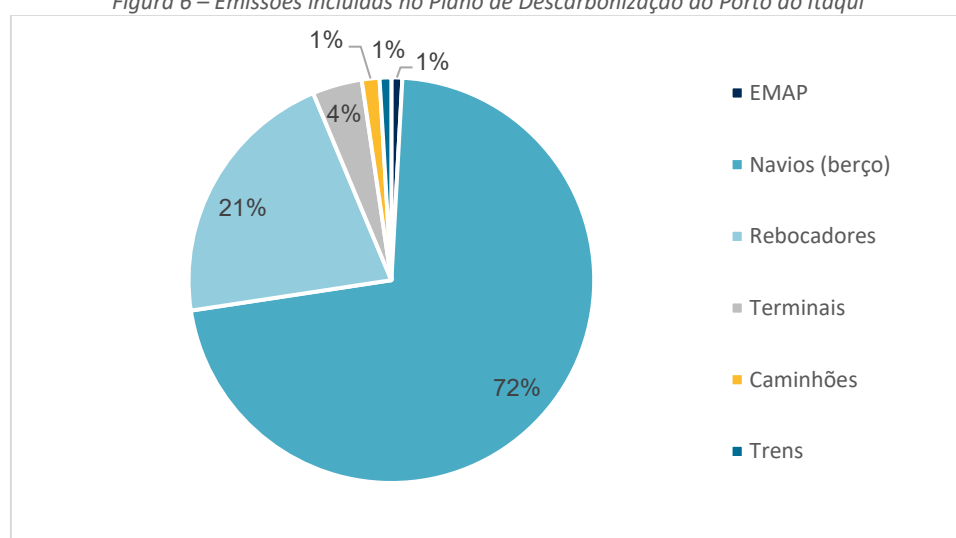
No Porto do Itaqui foram emitidas 189 ktCO₂ em 2022, das quais 82 ktCO₂ são atribuídas à atividade portuária propriamente dita, incluindo a permanência dos navios atracados (em berço), enquanto 107 ktCO₂ correspondem exclusivamente às operações de navegação, fundeio e manobras das embarcações. Em termos relativos, a atividade portuária apresenta uma intensidade de emissão de 5,63 kgCO₂ por tonelada de carga movimentada.

Tabela 1 - Resultados da pegada de carbono do Porto do Itaqui em 2022.

Escopo	Área	Emissões (tCO ₂ eq)
Escopo 1	Fontes fixas	67,33
	Fontes móveis	96,94
	Gases refrigerantes	437,05
	Extintores	0,22
	Total	601,54
Escopo 2	Eletricidade nas instalações EMAP	110,83
	Total	110,83
Escopo 3	Navios (navegação)	5.948,91
	Navios (manobra)	5.529,55
	Navios (fundeio)	95.790,91
	Navios (berço)	58.789,68
	Rebocadores	17.289,50
	Terminais	3.243,92
	Caminhões	1.156,57
	Trens	763,98
	Total	188.513,02
Total do Porto		189.225,39
Total do Porto (navios apenas berço)		81.956,01

Fonte: Fundación Valenciaport.

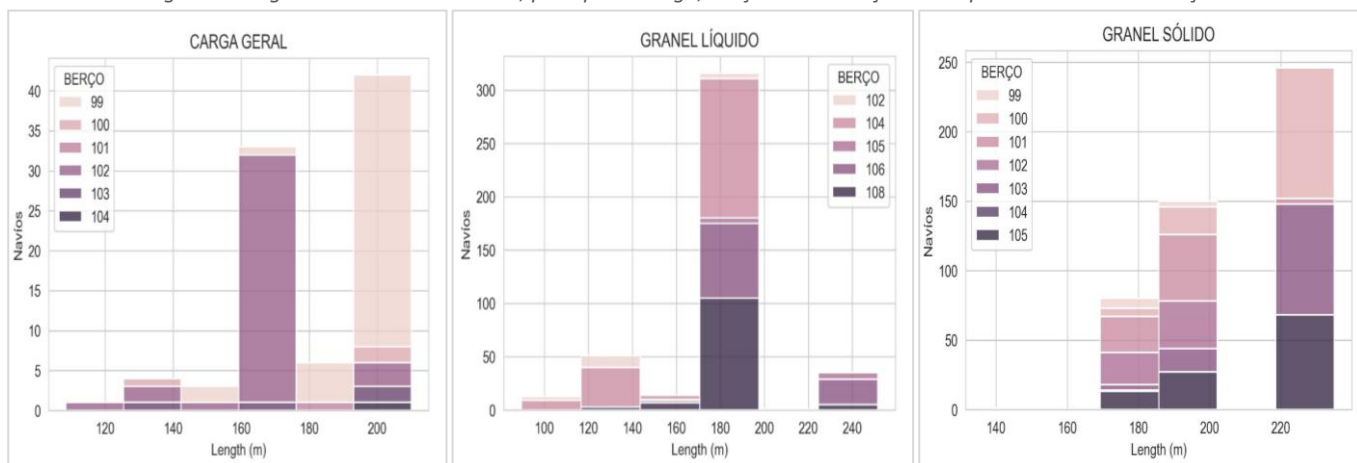
Figura 6 – Emissões incluídas no Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui



Fonte: Fundación Valenciaport.

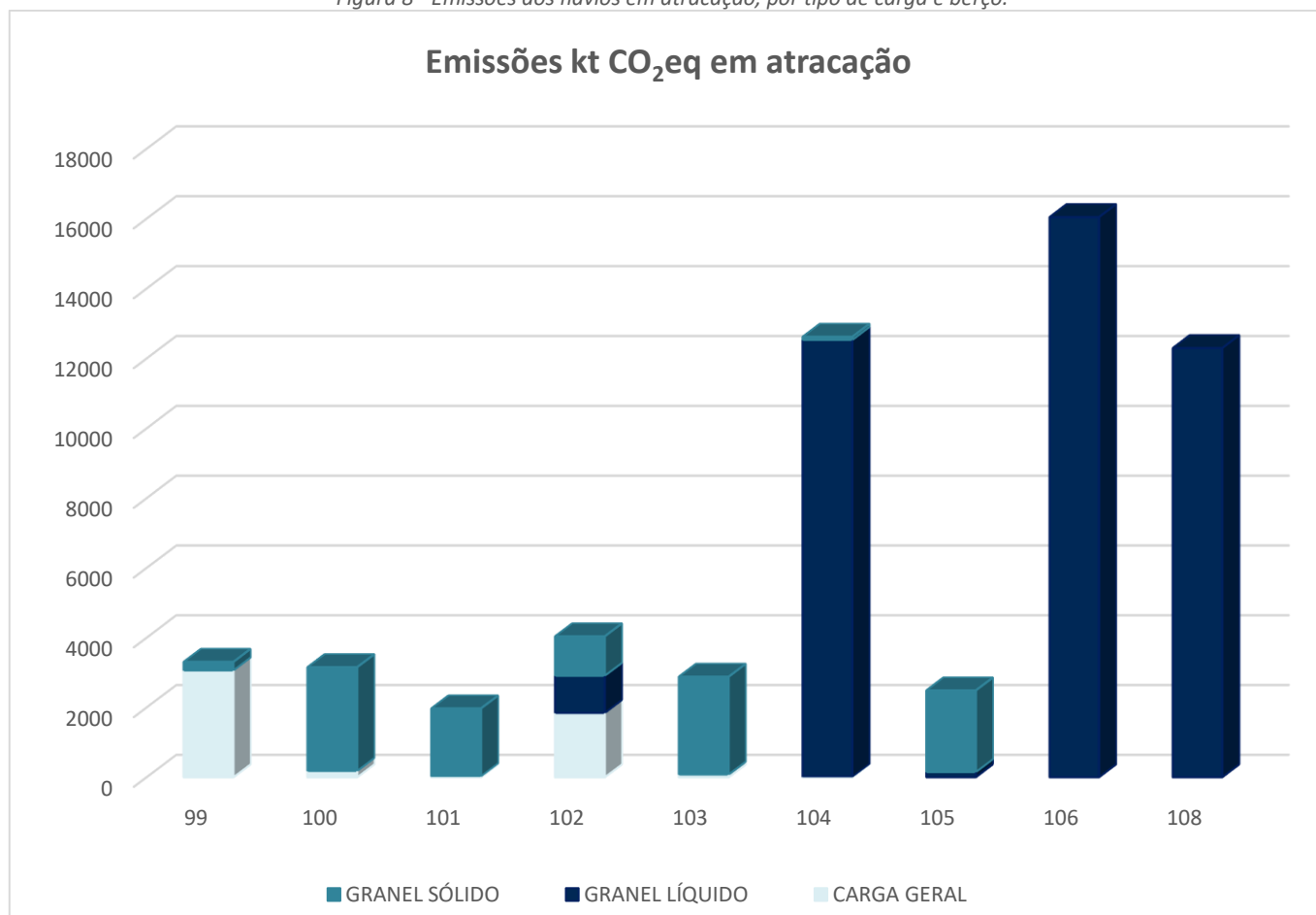
As maiores emissões de CO₂ durante a atracação provêm dos navios de granel líquido, que estão alocados nos berços 104, 106 e 108. O maior número de escalas corresponde ao granel sólido, distribuído principalmente em três faixas de tamanho. No caso do granel líquido, a maior parte dos navios se concentra em torno de um único porte. O maior número de escalas de carga geral refere-se à celulose, em uma faixa de tamanho específica, no berço 99.

Figura 7 - Registro de escalas em 2022, por tipo de carga, berços de atracação e comprimento das embarcações.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Figura 8 - Emissões dos navios em atracação, por tipo de carga e berço.



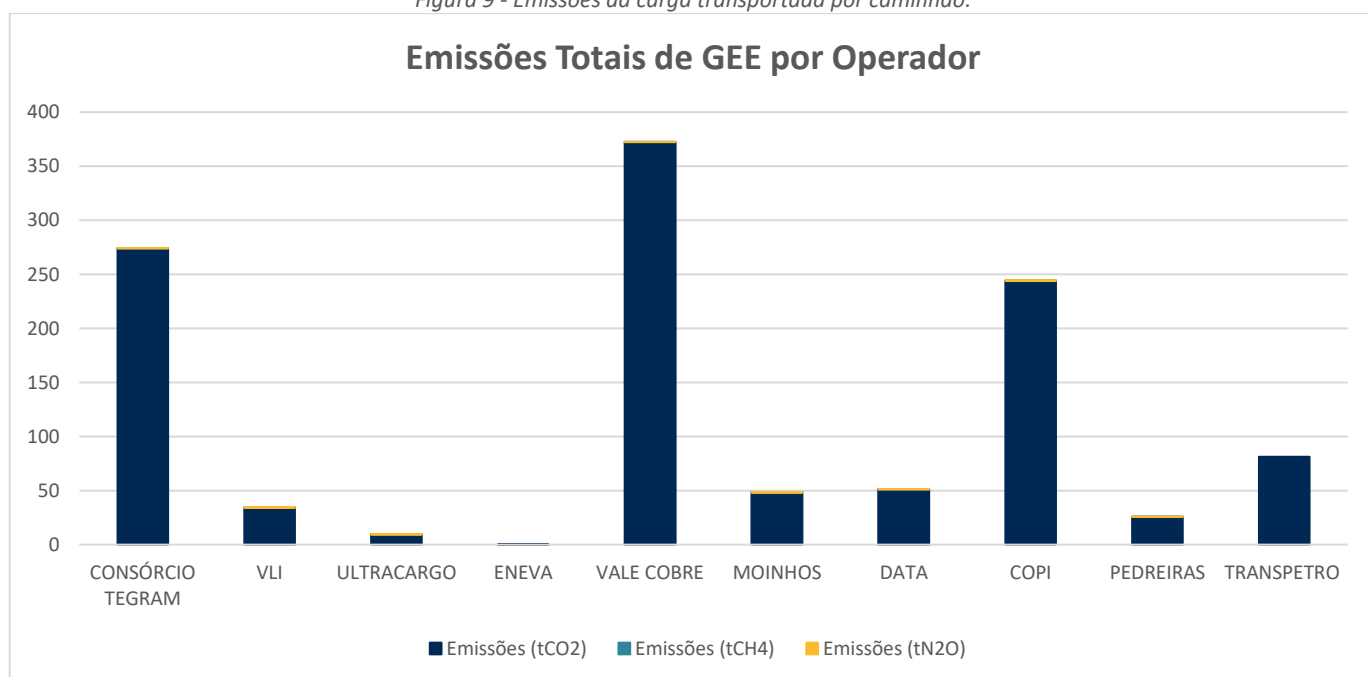
Fonte: Fundación Valenciaport.

No que se refere à entrada e saída de mercadorias por via terrestre no Porto do Itaqui, o modo de transporte utilizado está diretamente relacionado ao tipo de carga. A celulose é predominantemente recebida por ferrovia, enquanto os granéis sólidos minerais e os granéis líquidos são, em sua maioria, transportados por caminhões. O granel sólido vegetal, principal carga movimentada no porto, apresenta uma distribuição modal estimada em 60% por rodovia e 40% por ferrovia.

As operações rodoviárias concentram-se, sobretudo, no Terminal de Grãos do Maranhão (TEGRAM) e na área primária do porto. No modal ferroviário, destacam-se as operações também no TEGRAM e nas atividades de recepção de celulose.

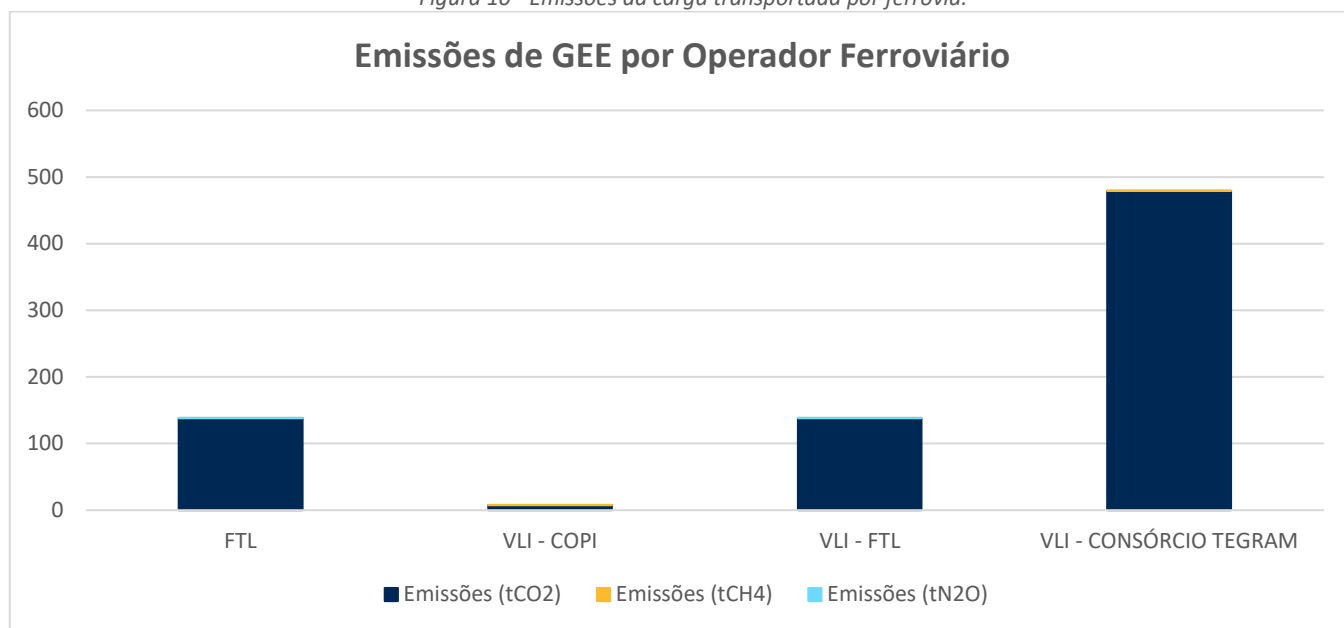
Adicionalmente, merece destaque a utilização do sistema dutoviário, que conecta berços especializados — como os berços 104, 106 e 108 — a instalações de armazenagem e unidades de processamento. As dutovias são amplamente empregadas na movimentação de granéis líquidos, oferecendo uma solução logística segura, eficiente e com menor impacto ambiental. Esse modal contribui significativamente para a otimização operacional, permitindo transferências contínuas e automatizadas, além de reduzir o tempo de operação e os riscos associados ao transporte por caminhões.

Figura 9 - Emissões da carga transportada por caminhão.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Figura 10 - Emissões da carga transportada por ferrovia.



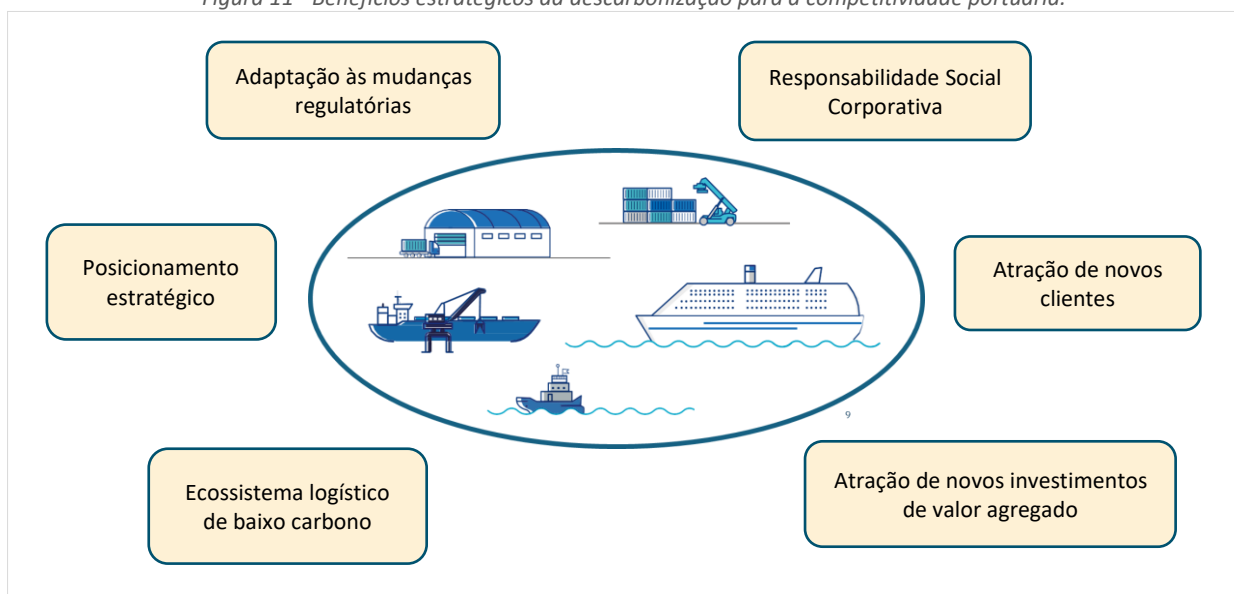
Fonte: Fundación Valenciaport.

2.3. Motivações

Embora os resultados do processo de descarbonização de um porto tenham um impacto positivo na sociedade e, portanto, estejam alinhados com a estratégia de responsabilidade social corporativa da autoridade portuária, os principais benefícios são a prontidão e o posicionamento e, portanto, estão diretamente relacionados à competitividade do porto em escala global.

A implementação de práticas de baixo carbono fortalece a capacidade do porto de atender às exigências regulatórias internacionais, amplia seu acesso a mercados mais exigentes e o torna mais atrativo para novos clientes e investidores comprometidos com critérios de sustentabilidade. Além disso, consolida o papel estratégico do porto como plataforma logística de referência em excelência ambiental, integrando inovação tecnológica, eficiência operacional e responsabilidade socioambiental como diferenciais competitivos.

Figura 11 - Benefícios estratégicos da descarbonização para a competitividade portuária.



Fonte: Fundación Valenciaport.

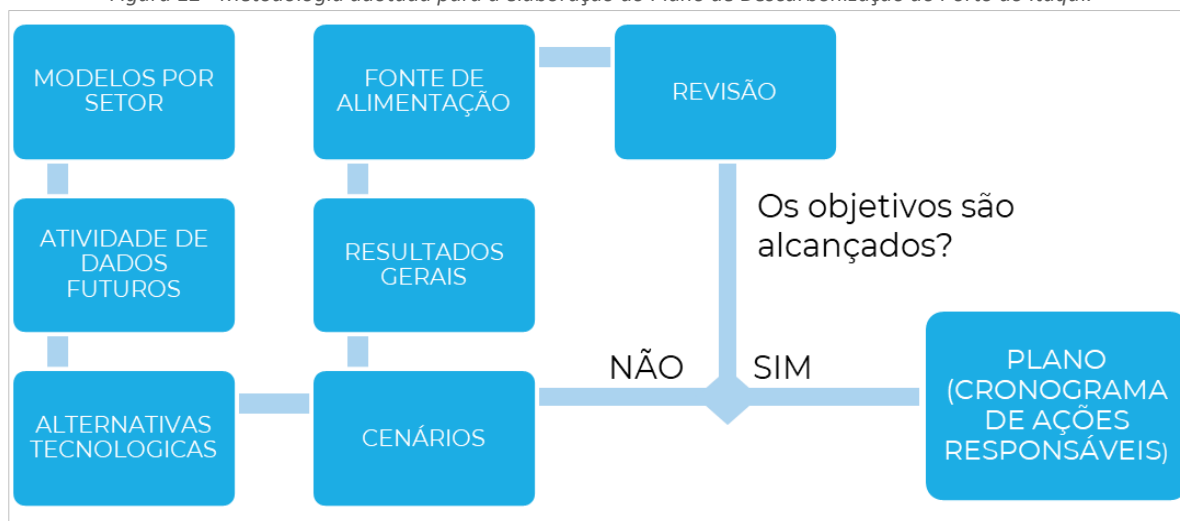
3. Metodologia

A metodologia utilizada para a elaboração do plano de descarbonização baseia-se em uma abordagem técnica e participativa, que combina análises quantitativas com a colaboração direta da EMAP.

Em primeiro lugar, são desenvolvidos modelos específicos para quantificar o impacto potencial na redução das emissões de CO₂ resultante da implementação de diferentes tecnologias ou outras medidas de mitigação. Esses modelos permitem simular, com base em dados reais e projeções, como cada ação pode contribuir para a descarbonização do porto ao longo do tempo. Para cada medida considerada, também é estimado um orçamento preliminar, o que possibilita avaliar sua viabilidade técnica e econômica. Essas duas ferramentas — estimativa de redução de emissões e custo aproximado — são integradas com previsões de crescimento de tráfego e operam dentro do contexto local do porto, considerando particularidades como os padrões operacionais atuais e as previsões de crescimento. Com isso, é possível construir cenários futuros realistas e consistentes.

A definição final das ações a serem incluídas no plano é realizada de forma colaborativa com a EMAP, garantindo alinhamento com as estratégias institucionais, os objetivos de sustentabilidade do porto e as possibilidades reais de implementação.

Figura 12 - Metodologia adotada para a elaboração do Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui.



Fonte: Fundación Valenciaport.

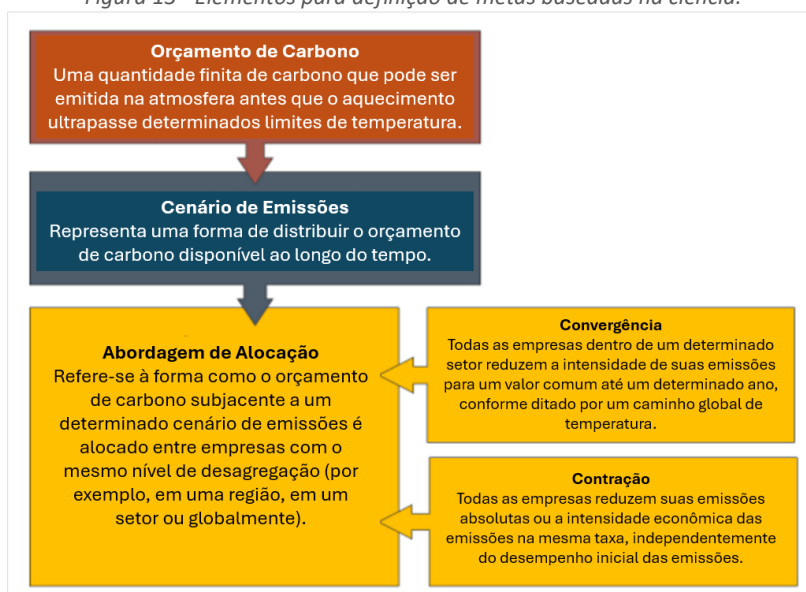
3.1. Alinhamento ao SBTi

As metas baseadas na ciência (SBTi) exigem que o objetivo esteja alinhado a um aumento de temperatura global inferior a 2 °C, com esforços para não ultrapassar 1,5 °C. Para definir metas concretas, a iniciativa requer três elementos:

- Definir um orçamento de carbono específico,
- Desenvolver cenários, e
- Aplicar uma abordagem de alocação.

A metodologia proposta neste trabalho fornece ferramentas (cenários) para atingir esse objetivo, embora se considere que, na seleção de ações concretas, prevalecer um objetivo realista seja mais importante do que simplesmente atingir o orçamento de CO₂ definido pelo SBTi.

Figura 13 - Elementos para definição de metas baseadas na ciência.



Fonte: SBTi.

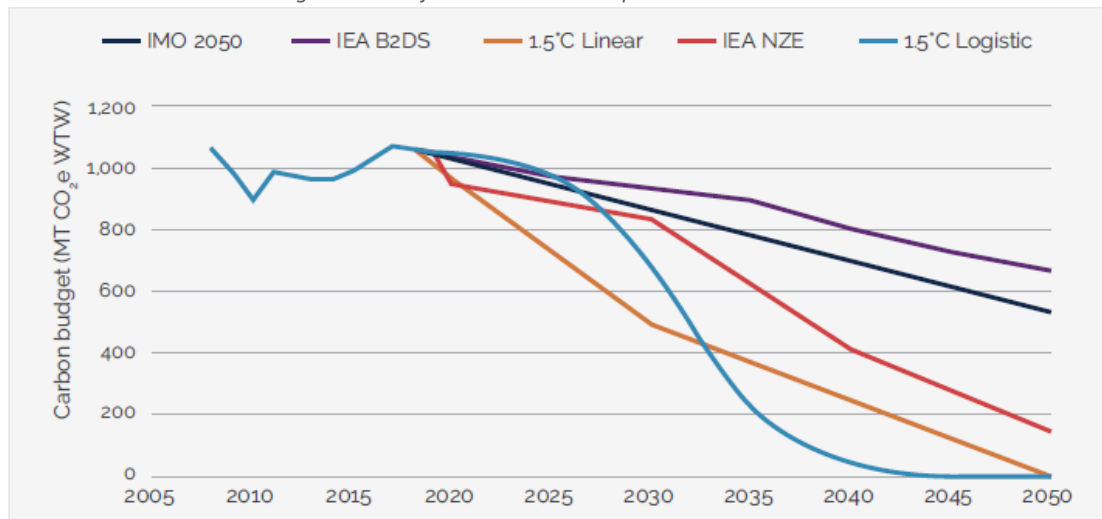
3.2. Metas de descarbonização

O objetivo inicial de descarbonização é o estabelecido pela metodologia SBTi.

No caso do Porto de Itaquí, considerando que mais de 93% das emissões provêm de fontes marítimas (navios de carga e rebocadores), foi utilizado o guia Science Based Target Setting for the Maritime Sector, que indica que a redução até 2040 deve atingir 96%.

Caso seja adotada a estratégia da IMO, a redução prevista seria de 70% até 2040. De todo modo, o plano definido deve ser realista e aplicável.

Figura 14 - Trajetórias de emissões para o setor marítimo.

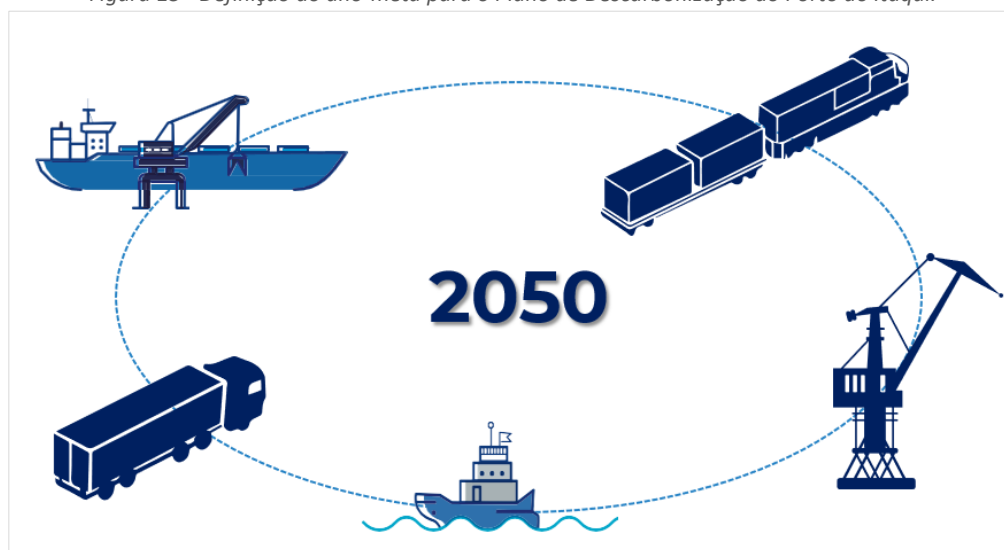


Fonte: Science Based Targets initiative.

3.3. Ano-alvo

Considerando que as principais fontes de emissões são as embarcações de carga e serviço, é aconselhável ter um ano-alvo para a descarbonização de acordo com a estratégia da IMO, ou seja, 2050. O escopo da ação inclui o mesmo escopo da pegada média, ou seja: navios atracados, rebocadores, arrendatários, concessionárias e operadores, transporte terrestre por caminhão e trem. No caso dos navios, considera-se apenas a fase de atracação, pois é a única na qual a EMAP pode realizar intervenções.

Figura 15 - Definição do ano-meta para o Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui.

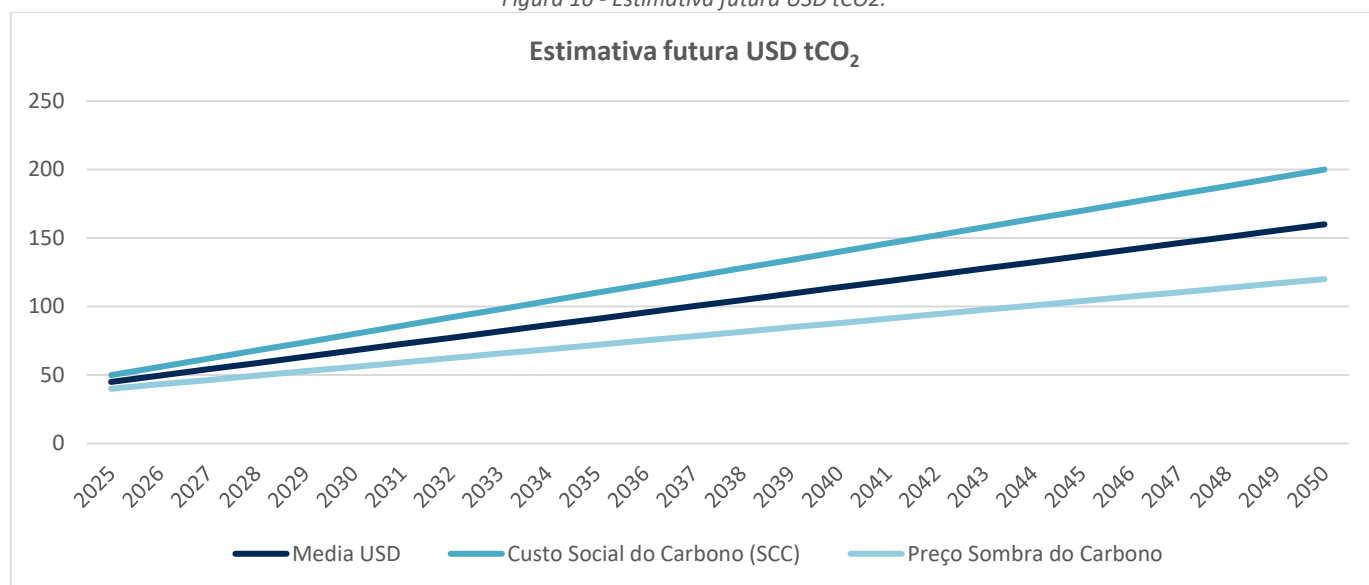


Fonte: Fundación Valenciaport.

3.4. Preço carbono

Para as análises de benefício econômico e avaliação do investimento, foi considerado a média entre os valores futuros esperados para o Custo Social do Carbono e o Preço Sombra do Carbono.

Figura 16 - Estimativa futura USD tCO₂.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Custo Social do Carbono (SCC - Social Cost of Carbon)

- Representa o impacto econômico e ambiental real de emitir uma tonelada de CO₂.

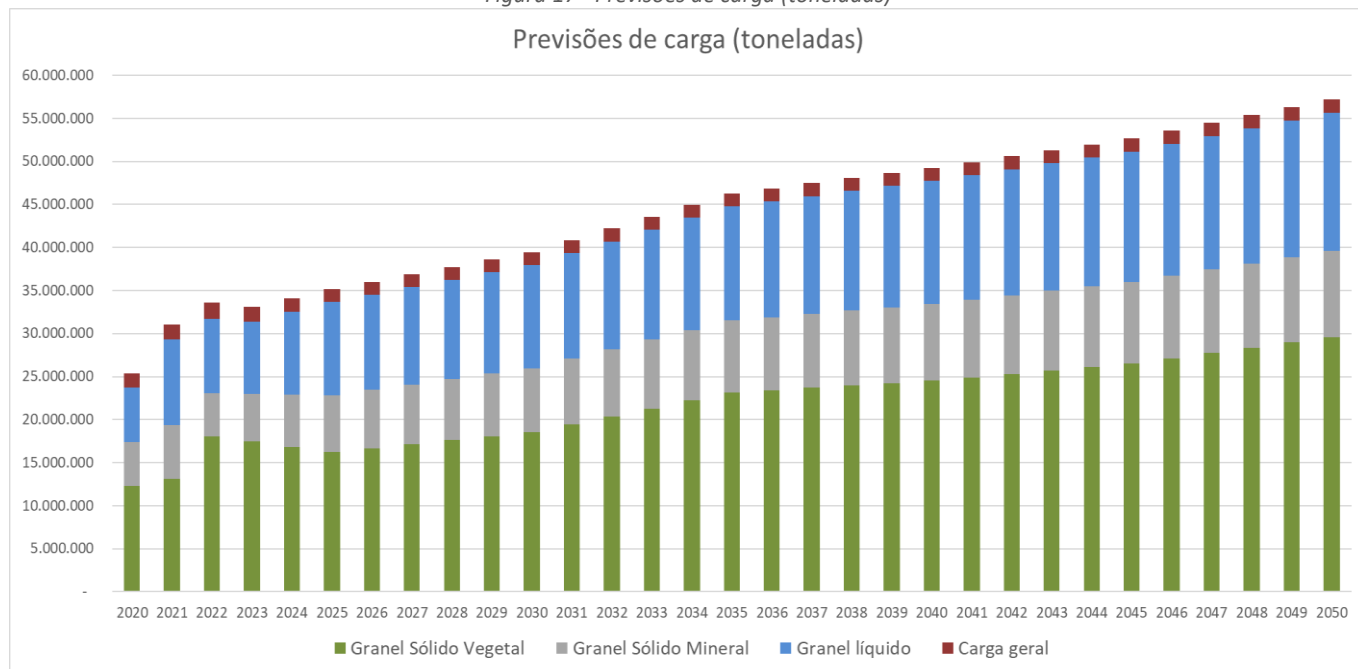
Preço Sombra do Carbono (Carbon Shadow Price)

- Utilizado por organismos multilaterais (BID, Banco Mundial, IFC) e grandes empresas para simular cenários regulatórios futuros

4. Situação futura

No ano 2050, estima-se que a demanda para o Porto do Itaqui atinja um volume de 57.2 milhões de toneladas no cenário tendencial. A natureza de carga de granel sólido vegetal corresponderá ao principal volume movimentado com 29.6 milhões de toneladas, 16.1 toneladas corresponderão a granel líquido; 10 toneladas a granel sólido mineral e 1.5 toneladas a carga geral.

Figura 17 - Previsões de carga (toneladas)



Fonte: Fundación Valenciaport.

O Berço-98 estará pronto até o final de 2026. Os Berços 97 e 96 já têm demanda e serão viáveis em, no máximo, 5 anos. Os Berços 95 e 94 estão previstos para um prazo máximo de 10 anos.

Nos próximos 10 anos, serão construídos cinco novos berços, que, junto com os nove já existentes, totalizarão 14 berços. O detalhamento sobre o planejamento portuário e os estudos ambientais associados está descrito na versão completa do EIA/RIMA, disponível no site oficial do porto.

Figura 18 - Ampliação da infraestrutura portuária do Porto do Itaqui: previsão de novos berços até 2035.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Novo terminal operado pela Santos Brasil, empresa especializada em operações portuárias e logística, está em operação no Porto do Itaqui desde o final de 2022. A empresa iniciou seu plano de expansão para os terminais de combustíveis TGL 1 e TGL 3 no porto público do Maranhão. As obras em andamento incluem a construção de novos tanques para recebimento, expedição e armazenamento de diesel, gasolina e biocombustíveis.

Figura 19 - Áreas arrendadas e plano de expansão da Santos Brasil para terminais de combustíveis no Porto do Itaquí.



Fonte: Fundación Valenciaport.

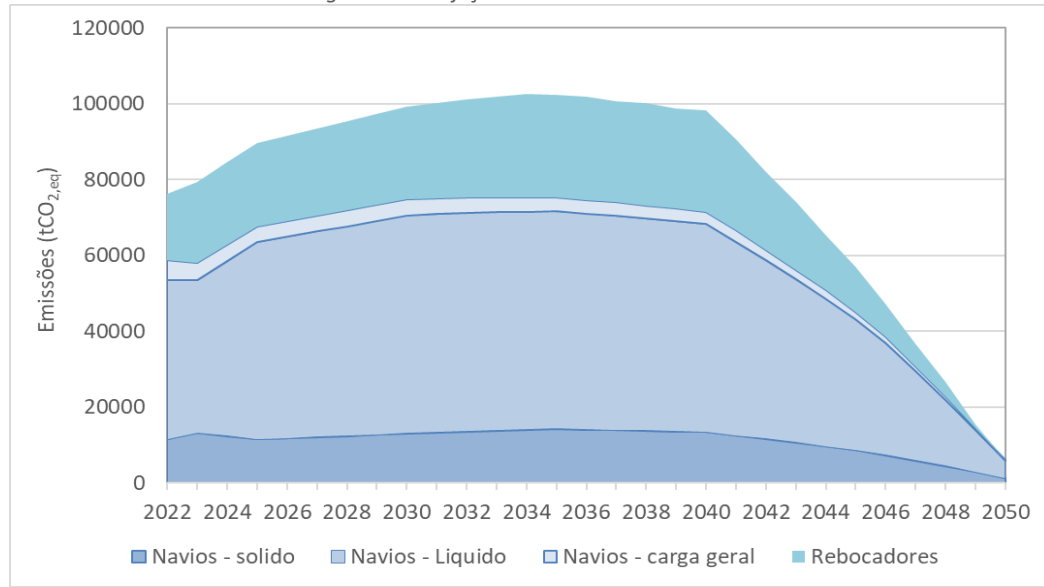
A empresa Santos Brasil arrendou as seguintes áreas: IQI-03, IQI-11 e IQI-12. A área IQI-13, foi arrendado pelo Terminal químico de Aratú (TEQUIMAR)¹

4.1. Projeção de navios e rebocadores

No período de 2022 a 2050, no cenário sem as ações de descarbonização do EMAP, haverá duas tendências. Até 2040, há um ligeiro aumento no qual parte do aumento da atividade é compensada por algumas ações de descarbonização no setor. A partir de 2040, espera-se que o setor marítimo se alinhe à estratégia da IMO, o que implicará uma redução significativa nas emissões gerais. Em 2050, as emissões totais são estimadas em 6 kt CO₂, um valor que representa 8% das emissões de 2022. No entanto, em 2050, elas ainda serão a principal fonte de emissões no Porto do Itaquí, respondendo por 41% das emissões globais totais.

¹ <https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/leilao-de-portos>

Figura 20 - Projeção de Navios e Rebocadores



Fonte: Fundación Valenciaport.

4.2. Projeção da EMAP e terminais

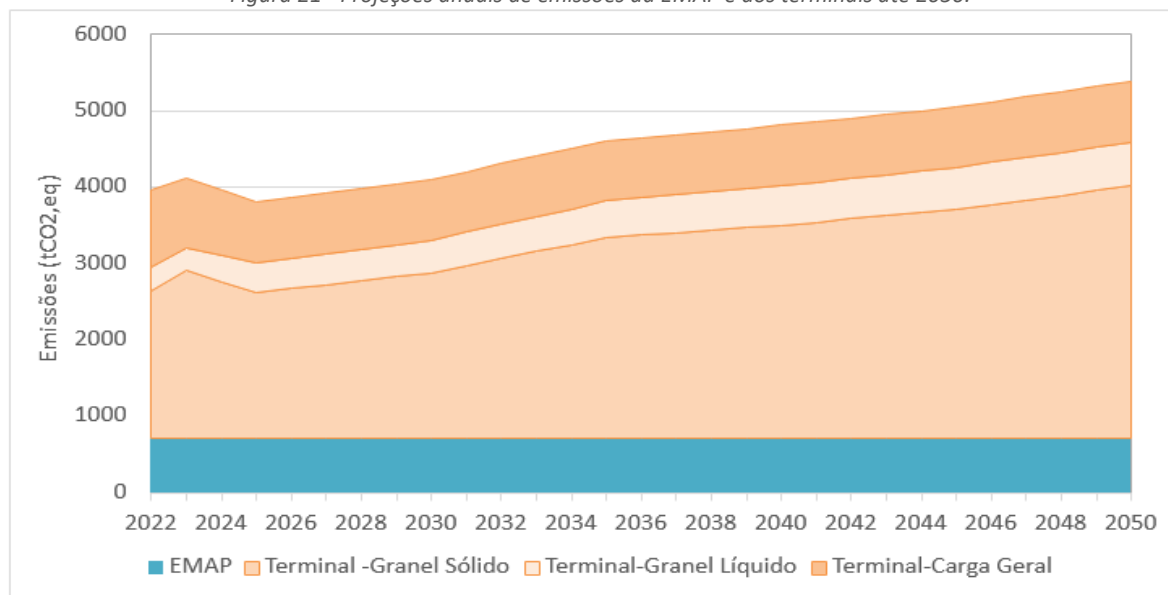
No período entre 2022 e 2050, com relação aos terminais, presumiu-se que, sem mudanças tecnológicas, as emissões por unidade de carga movimentada permanecerão constantes. As projeções de emissões até 2050 para operadores e terminais foram calculadas considerando as projeções de tráfego por tipo de carga (granel sólido, granel líquido e carga geral) e o índice de emissões por tonelada de mercadoria de cada tipo (kgCO₂eq/tonelada para granéis sólidos, para granéis líquidos e para carga geral).

A Figura 21 apresenta a projeção das emissões anuais de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas às atividades da EMAP e dos terminais arrendados, no período de 2022 a 2050. Assim como no inventário da pegada de carbono, a projeção considera as emissões provenientes de fontes fixas, móveis, gases refrigerantes, extintores e consumo de energia elétrica geradas tanto pelas instalações da EMAP quanto pelos terminais localizados dentro dos limites geográficos do porto.

Observa-se que a maior parte das emissões é proveniente dos terminais de granéis sólidos, que mantêm uma trajetória de crescimento gradual ao longo dos anos. Este segmento concentra a maior intensidade de emissões, refletindo o perfil operacional dominante no complexo portuário. Os terminais de granéis líquidos e de carga geral apresentam emissões mais modestas, porém estáveis, com leve tendência de alta até 2050. Já as emissões atribuídas diretamente à EMAP mantêm-se praticamente constantes ao longo de todo o período, considerando que o crescimento que possa ser gerado nos próximos anos poderá ser contrabalançado pelas ações de descarbonização já previstas atualmente (substituição da frota por veículos híbridos e elétricos, substituição de combustíveis com priorização de etanol e biodiesel, instalação de painéis solares). Dessa forma, suas emissões situam-se abaixo de

1.000 tCO₂eq por ano, o que indica um menor impacto relativo da administração portuária em comparação às operações privadas.

Figura 21 - Projeções anuais de emissões da EMAP e dos terminais até 2050.

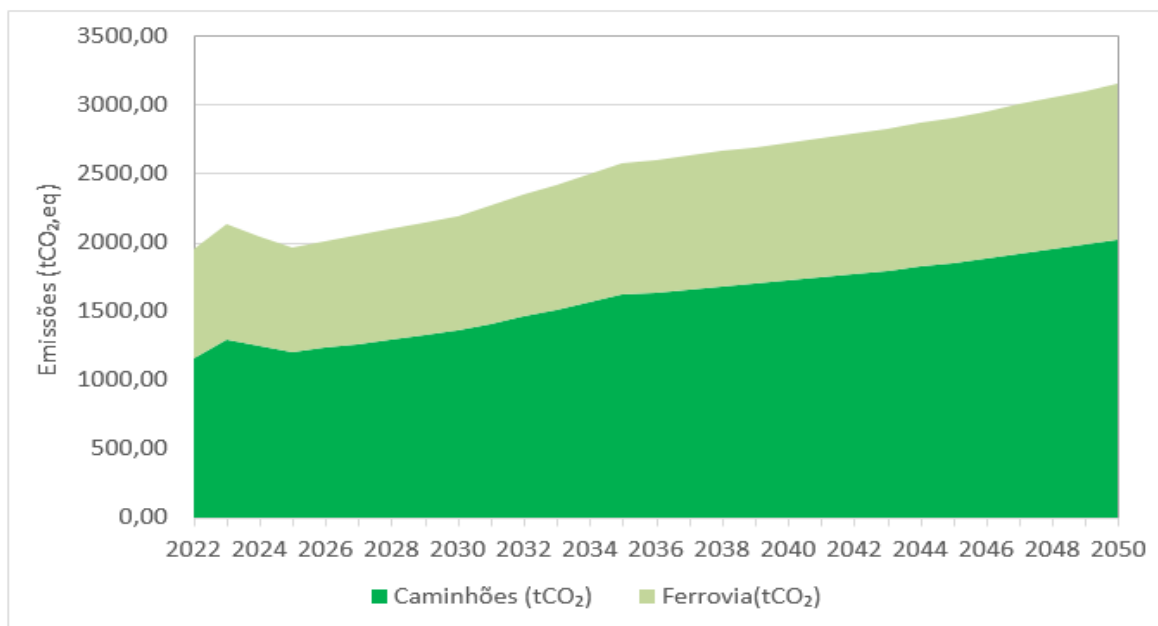


Fonte: Fundación Valenciaport.

4.3. Projeção de caminhões e ferrovias

No período entre 2022 e 2050, no cenário sem ações de descarbonização, espera-se que as emissões de caminhões e trens aumentem em 62%, um aumento que está de acordo com o aumento do tráfego. A distribuição das emissões por modo permanece razoavelmente constante, com um leve aumento na contribuição do caminhão, chegando a 64% dessa seção.

Figura 22 - Projeções anuais de emissões de caminhões e ferrovias até 2050.



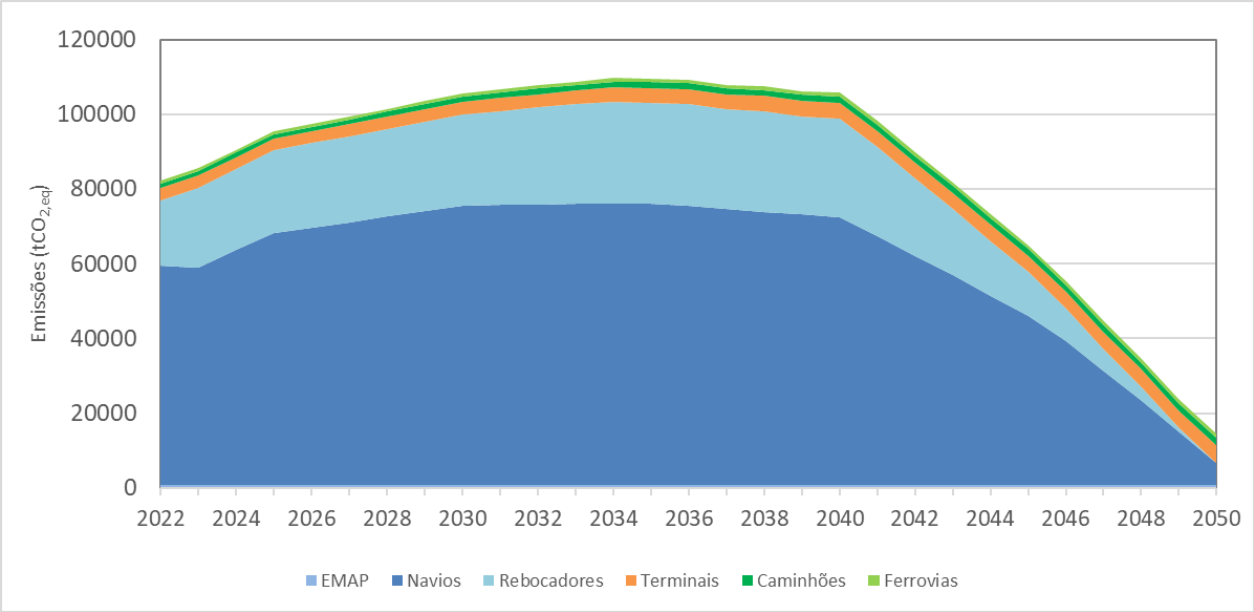
Fonte: Fundación Valenciaport.

4.4. Projeção Global

Considerando as projeções de tráfego e partindo do pressuposto de que nenhuma medida de descarbonização seja implementada por parte da EMAP (cenário BAU – Business as Usual), estima-se um crescimento progressivo das emissões até 2040. A partir desse ano, espera-se que o setor marítimo passe a se alinhar à estratégia da Organização Marítima Internacional (IMO), resultando em uma redução significativa das emissões associadas a navios e rebocadores.

Nesse cenário, as emissões totais atingirão cerca de 105 mil toneladas de CO₂ equivalente (ktCO₂eq) em 2040, com redução expressiva para 14,6 ktCO₂eq até 2050, em razão da renovação tecnológica da frota. Ainda assim, as principais fontes de emissões residuais permanecerão associadas à permanência dos navios atracados nos berços, às operações de carga e descarga, e ao transporte rodoviário de cargas (caminhões), exigindo atenção especial nas estratégias de mitigação a longo prazo.

Figura 23 - Projeções anuais de emissões do Porto do Itaqui até 2050.



Fonte: Fundación Valenciaport.

5. Tecnologias disponíveis

A descarbonização do setor portuário exige uma transformação dos processos, equipamentos e fontes de energia atualmente utilizados. Nos últimos anos, surgiram diversas tecnologias com potencial para reduzir significativamente as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas às operações portuárias e logísticas.

Essas soluções vão desde a eletrificação de veículos e equipamentos de operação, o uso de combustíveis alternativos de baixa emissão, até a implantação de sistemas de gestão e digitalização voltados à melhoria da eficiência energética. Embora muitas dessas tecnologias já estejam disponíveis no mercado e tenham demonstrado resultados positivos, sua implementação em larga escala ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios, que devem ser analisados com base nas particularidades de cada porto, seu contexto operacional e territorial.

A seguir, são apresentadas as principais opções tecnológicas atualmente disponíveis para a descarbonização dos diferentes segmentos do ambiente portuário.

5.1. Navios

As tecnologias que podem ser aplicadas são, principalmente, três:

- **Onshore Power Supply (OPS)** implica no fornecimento de energia elétrica aos navios enquanto estão ancorados ou atracados, permitindo que desliguem seus geradores auxiliares.
- Uso de **tecnologias alternativas de propulsão**, como a hibridização com baterias ou navios com propulsão totalmente elétrica.
- Uso de **combustíveis** sintéticos, biocombustíveis ou combustíveis de baixa emissão.

Figura 24 - Instalação de sistema OPS em média tensão para navios de cruzeiro, Terminal de Altona, Hamburgo.



Fonte: Hamburg Port Authority.

Figura 25 - Exemplo de combustível alternativo de baixa emissão (amônia) (a), e propulsão híbrida com baterias (Ro-Ro, Grimaldi) (b).



(a)

Fonte: Bioenergy International²



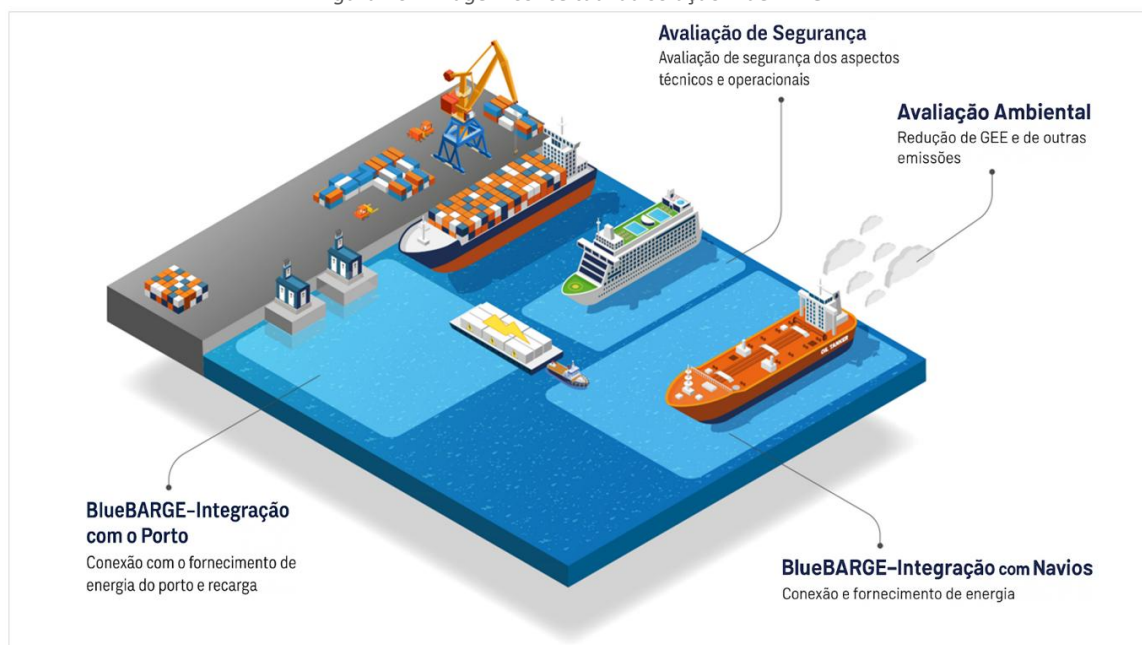
(b)

Fonte: Cadena de Suministro³.

No caso de pontos de difícil eletrificação, a tecnologia convencional de OPS não pode ser utilizada, e as alternativas disponíveis são o uso de barcas de fornecimento (soluções como BlueBARGE ou Elemanta) ou o lançamento de cabos submarinos de fornecimento elétrico (solução Stillstrom).

BlueBARGE: solução inovadora otimizada de power-barge com módulos de fornecimento de energia em contêineres, para atingir pelo menos 3 MW de potência de descarga e 35 MWh de capacidade de energia. A tecnologia de armazenamento: Sistemas de armazenamento de energia por bateria, baseados em íons de lítio e fluxo de redox de vanádio.

Figura 26 - Imagem conceitual da solução BlueBARGE.



Fonte: Projeto BlueBARGE.⁴

² <https://bioenergyinternational.com/ihi-jera-commence-worlds-first-large-scale-ammonia-co-firing-demo/>

³ https://www.cadenadesuministro.es/noticias/grimaldi-incorpora-a-su-flota-el-eco-malta_1393546_102.html

⁴ <https://bluebarge.eu/>

Elemanta: barcaça de energia baseada em pilha de hidrogênio para atingir de 1 a 5 MW de potência de descarga e até 48 horas de capacidade de energia autônoma. Célula a combustível de 1 MW com 1,5 toneladas de H₂ armazenadas a bordo.

Figura 27 - Solução Elemanta (Hydrogen power Barge).



Fonte: HDF Energy⁵

Stillstrom: conexão à rede de terra ou eletrificação direta, garantindo uma fonte de energia confiável, sustentável e constante para as embarcações fundeadas. Ele pode ser levado para as áreas de fundeio 2 e 3 e fornecer abastecimento simultâneo a todas as embarcações fundeadas.

Figura 28 - Solução Stillstrom.



Fonte: Stillstrom.⁶

⁵ <https://hdf-energy.com/>

⁶ <https://stillstrom.com/>

5.2. Rebocadores

Uma das principais estratégias para avançar na descarbonização do serviço de rebocadores marítimos é melhorar a eficiência energética das embarcações existentes. Isso pode ser alcançado por meio da hibridização dos sistemas de propulsão ou pela aplicação de revestimentos antifouling que otimizam o desempenho hidrodinâmico. Para atingir níveis mais elevados de redução de emissões, é necessário considerar o uso de combustíveis alternativos ou até mesmo uma transformação completa nos sistemas de propulsão.

- **Redução de consumo:** A otimização das operações e a manutenção eficiente contribuem diretamente para a diminuição do consumo de combustível.
 - **Hibridização:** a integração de sistemas híbridos, combinando motores a diesel com baterias ou motores elétricos, permite reduzir o consumo de energia em até 18%, especialmente em operações de baixa demanda energética ou durante manobras de curta duração.
 - **Revestimentos antifouling:** esses tratamentos aplicados ao casco evitam a incrustação de organismos marinhos, reduzindo o atrito com a água. Dependendo do tipo de revestimento utilizado, é possível obter ganhos de eficiência entre 5% e 15%.
- **Uso de Combustíveis drop-in:** Esses combustíveis podem ser utilizados em motores existentes com mínimas adaptações, facilitando sua implementação no curto prazo.
 - **Biodiesel e HVO:** quando produzidos a partir de óleos residuais, podem oferecer reduções significativas de emissões, de até 90%. O Brasil, com sua destacada capacidade agrícola, especialmente em soja e palma, possui grande potencial na produção dessas alternativas.
 - **Combustíveis pirolíticos:** produzidos a partir de biomassa. Ainda não estão disponíveis comercialmente na atualidade.
- **Nova propulsão:** A viabilidade dessas tecnologias depende do perfil operacional de cada rebocador e de seu padrão de navegação.
 - **Bio-GNL:** pode proporcionar reduções de emissões de até 90%. No Brasil, já existem iniciativas lideradas por empresas como a Petrobras e a Raízen nessa direção.
 - **Elétricos puros:** ideais para operações portuárias ou em áreas restritas, onde as distâncias percorridas são curtas e há infraestrutura adequada para recarga.

- **Hidrogênio:** pode ser utilizado tanto em motores de combustão quanto em células a combustível (Fuel Cells), oferecendo uma opção de emissão zero no ponto de uso.
- **Metanol:** alternativa líquida que permite uma implementação relativamente simples, além de facilitar o armazenamento e o manuseio.
- **Amônia:** promete grandes reduções nas emissões, embora exija sistemas específicos de manuseio e segurança devido à sua toxicidade.

Atualmente, não há um combustível alternativo que supere os combustíveis tradicionais em todos os aspectos, sendo, portanto, necessário avaliar cada opção de acordo com sua aplicação específica. O FAME (éster metílico de ácidos graxos) e o HVO (óleo vegetal hidrotratado) já são opções comerciais disponíveis, embora seu custo mais elevado exija uma justificativa técnica e econômica para seu uso. No caso do Porto do Itaqui, o etanol — que já conta com uma cadeia de distribuição consolidada — pode representar uma alternativa particularmente atrativa. Para outras iniciativas futuras com potencial de sinergia, como a produção local de amônia ou biometano, recomenda-se a realização de estudos específicos sobre sua viabilidade de uso em rebocadores.

5.3. Terminais

No caso de Itaqui, os operadores dos terminais portuários utilizam principalmente equipamentos com motores a diesel e, em menor grau, elétricos, sendo que alguns desses equipamentos funcionam com eletricidade não renovável. Além disso, observa-se um consumo limitado de gasolina, GLP e etanol. Todas essas fontes de energia geram emissões de Gases de Efeito Estufa, contribuindo para as mudanças climáticas e para a deterioração da qualidade do ar na região.

As principais estratégias para reduzir as emissões dos equipamentos portuários incluem o uso de eletricidade renovável e ações voltadas para os combustíveis. Isso pode ser alcançado de diversas formas, como melhorando a eficiência para reduzir o consumo, utilizando combustíveis "drop-in" ou até mesmo propondo a substituição completa do sistema de propulsão ou do tipo de equipamento usado.

Algumas opções são:

- **Eletricidade renovável:**
 - Esteiras elétricas, contêineres refrigerados (reefers) e guindastes operando com eletricidade renovável.
 - Guindastes de cais do tipo MHC (Mobile Harbor Cranes) elétricos.

- **Combustíveis drop-in:**

- Biodiesel e HVO: Idealmente produzidos a partir de óleos residuais (até 90%). O Brasil é um grande produtor de soja e palma.
- Bio-GNL: Gás natural liquefeito de origem renovável.
- Combustíveis pirolíticos: Derivados de biomassa, atualmente não disponíveis comercialmente.
- Etanol: Utilizado em misturas como a gasolina E10 (com 10% de etanol).

- **Maior eficiência e nova propulsão:**

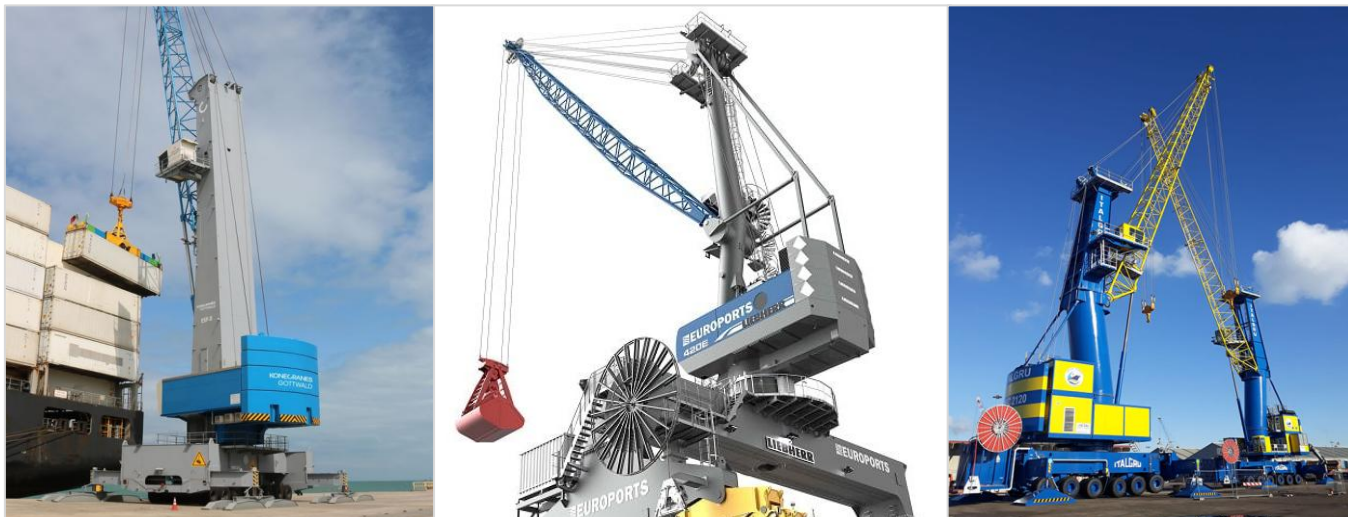
- Sistemas de certificação energética.
- Hibridização dos sistemas de propulsão.
- GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)
- Sistemas elétricos puros.
- Hidrogênio (H₂) e células a combustível (Fuel Cells).

A seguir, uma análise dos principais equipamentos portuários usados em Itaquí do ponto de vista de alternativas de baixa emissão.

Guindastes móveis

Desde 2020, começaram a ser disponibilizados guindastes móveis de cais (MHC – Mobile Harbour Cranes) elétricos por diversos grandes fabricantes e empresas especializadas nesse tipo de equipamento, como Liebherr, Konecranes, Gottwald, Sennebogen, Italgru, Palfinger Marine, entre outros. Alguns dos portos que já utilizam MHCs elétricos são: Los Angeles (EUA), Antuérpia (Bélgica), Roterdã (Países Baixos), Durres (Albânia), Dar es Salaam (Tanzânia) e Mormugão (Índia).

Figura 29 - Guindastes móveis eléctricos de cais.



Fonte: Konecranes⁷ Liebherr⁸ Italgru.⁹

Empilhadeiras

As empilhadeiras são utilizadas principalmente para movimentar e armazenar carga geral em armazéns, depósitos e áreas de carga nos portos, e para movimentar equipamentos ou acessórios como geradores ou garras.

Alguns modelos alternativos aos movidos a diesel são:

- **Toyota:** modelo com bateria elétrica (íon de lítio ou chumbo-ácido).
- **Hyster:** modelo elétrico. Possui versões movidas a hidrogénio (H₂) em desenvolvimento.
- **Still GmbH:** modelo elétrico com bateria de lítio
- **BYD:** modelo elétrico com baterias de fosfato de ferro-lítio.

Figura 30 - Empilhadeira elétrica Hyster.



Fonte: Hyster.¹⁰

⁷ <https://www.marinelink.com/companies/konecranes-83436>

⁸ <https://www.liebherr.com/es-int/gruas-maritimas/productos/equipamiento-de-puerto/gr%C3%BAas-p%C3%B3rtico/liebherr-portal-slewing-electric/lps-420-e-5391558>

⁹ <https://italgru.it/en/electric-port-cranes/mobile-harbour-cranes/imhc-2120-e>

¹⁰ <https://www.hyster.com/es-es/emea/carretillas-elevadoras-electricas-de-4-ruedas/j10-18xd/>

Reach Stackers (Empilhadores de contêineres)

São empilhadeiras projetadas especificamente para manusear contêineres. São tradicionalmente movidas a diesel.

Alguns modelos alternativos aos movidos a diesel são:

- **Kalmar (grupo Cargotec):** versão elétrica (baterias). Também oferecem opções híbridas e HVO.
- **Hyster:** versão elétrica com baterias de lítio o hidrogênio (célula de combustível).
- **Liebherr:** versão elétrica (plug-in ou baterias).

Figura 31 - Reach Stacker eléctrica de Kalmar.



Fonte: Kalmar.¹¹

Front-End Loaders (Pá carregadeira)

Eles são usados em operações de sólidos a granel para cereais e minerais. Tradicionalmente, eles têm motores a diesel. Algumas alternativas de baixa emissão são:

- **Volvo CE:** modelo elétrico (baterias).
- **Caterpillar (CAT):** bateria elétrica (a CAT também está testando hidrogênio em outros equipamentos)
- **Komatsu:** modelo elétrico (baterias).
- **John Deere:** modelo elétrico (baterias).

Figura 32 - Pá carregadeira eléctrica de Volvo.



Fonte: Volvo.¹²

¹¹ https://www.kalmarglobal.com/news--insights/press_releases/2023/kalmar-hands-over-its-first-fully/

¹² <https://www.volvoce.com/espana/es-es/products/electric-machines/l120-electric/>

Backhoe Loaders (retroescavadeira)

As retroescavadeiras são equipamentos versáteis usados em obras de construção civil, movimentação de terra e manuseio de graneis sólidos. Tradicionalmente, operam com motores a diesel, mas existem alternativas com menores emissões disponíveis.

- **JCB:** modelo elétrico. Ele também tem um modelo de hidrogênio.
- **CASE Construction:** modelo elétrico.
- **Volvo CE:** modelo elétrico em desenvolvimento.

Figura 33 - Mini retroescavadeira de hidrogênio de JCB.



Fonte: JCB.¹³

Outros equipamentos portuários

Os operadores precisam fazer outros trabalhos e usar outros tipos de equipamentos que também tenham alternativas de baixa emissão.

- **Konecrans:** RTG (Rubber-Tired Gantry) elétrico e HVO/biodiesel.
- **Terberg:** trator de Terminal elétrico
- **MAN Truck & Bus:** caminhões elétricos para portos
- **Scania:** caminhões com motores a biogás (Bio-GNL) ou HVO.

Figura 34 - Caminhão elétrico de Terberg.



Fonte: Terberg.¹⁴

¹³ <https://tinyurl.com/58baaphj>

¹⁴ https://www.terbergtaylor.com/assets/TTA_PRODUCT_LINE.pdf

Finalmente, como um resumo os combustíveis alternativos que podem ser utilizados na manipulação de mercadorias nos portos incluem biodiesel, gás natural liquefeito (GNL), hidrogênio, combustíveis pirolíticos e eletricidade renovável. Esses combustíveis contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a melhoria da sustentabilidade nas operações portuárias. Alguns dos fabricantes que já possuem equipamentos desenvolvidos comercialmente para esses combustíveis incluem Liebherr, Konecranes, Kalmar, Scania e outros:

- **Elétrico (baterias):** opção mais comum (ex. Kalmar, Volvo, CAT).
- **Hidrogênio (H₂):** em desenvolvimento (Hyster, JCB).
- **Com HVO/Biodiesel:** usado em equipamentos a diesel modificados (Kalmar, Konecranes).
- **Bio-GNL:** para caminhões e máquinas pesadas (Scania, IVECO).
- **GLP/GNC:** menos comum em portos, mas usado em algumas empilhadeiras.

Figura 35 - Caminhão de biometano de Scania.



Fonte: Interchange UK¹⁵

5.4. Caminhões

No curto prazo, é estratégico priorizar ações voltadas à melhoria da caracterização da frota e à elevação da eficiência operacional do setor. Na sequência, recomenda-se avançar na substituição progressiva de combustíveis e, por fim, avaliar a adoção de tecnologias de caminhões de baixa ou zero emissão.

Redução de consumo

- Melhor caracterização do setor.
- Programa de Assistência Empresarial.

¹⁵ <https://www.interchange-uk.com/news/stbs-launch-alternative-fuels-strategy-for-the-south-west>

- Sistemas de Certificação de Caminhões.
- Reboque triplo.

Combustíveis drop-in

- Biodiesel e HVO.
- Idealmente de óleos usados (até 90%).
- Brasil é uma potência em soja e palma.

Nova propulsão

- Bio GNL. Requer rede de abastecimento. IVECO S-Way Natural Power e Scania CNG/GNL. (20%).
- Elétrico puro. Distâncias curtas. Volvo, Mercedes-Benz e Scania.
- Redes de abastecimento.

Os serviços de assistência são uma opção que permite reduções interessantes sem grandes investimentos por parte das empresas de transporte. Ele tende a ter boa aceitação social e resultados interessantes: programa francês Objectif CO₂.

Figura 36 - Programa francês Objectif CO₂.



Fonte: Objectif CO₂

Atualmente, a infraestrutura de postos de abastecimento de Gás Natural Liquefeito (GNL) para caminhões no Brasil está em desenvolvimento e é limitada. Não há um número exato de postos de GNL em operação no país, pois as informações públicas são escassas e os projetos estão em diferentes fases de implementação.

No estado do Maranhão, especificamente, não existem atualmente postos de abastecimento de GNL para caminhões em funcionamento. No entanto, há iniciativas em andamento que podem mudar esse cenário no futuro. Por exemplo, a empresa Virtu GNL adquiriu 30 caminhões movidos a GNL para operar no estado, o que indica uma possível expansão da infraestrutura de abastecimento na região.

Figura 37 - Iniciativas de descarbonização com GNL.

VIRTU GNL E PORTO DE ITAQUI ASSINAM ACORDO PARA DESCARBONIZAÇÃO DA FROTA

Mar, 08, 2024 Postado por Gabriel Malheiros
Semana 282418

A Virtu GNL e Empresa Maranhense de Administração Portuária (Emap) assinaram nesta quarta-feira, durante a Intermodal South American 2024, acordo para descarbonização da frota do Porto de Itaqui, em São Luís (MA).

Especializada em transporte de gás natural liquefeito, a Virtu GNL atua como um meio de transporte complementar aos gasodutos, movimentando caminhões movidos a GNL em operações de longas distâncias, sobretudo nas regiões não contempladas pela malha dutoviária no Brasil.

Data Insights: os projetos de regaseificação de GNL no Brasil

Bnamericas
Publicado: segunda-feira, 06 janeiro, 2025

Gás natural Regaseificação Capacidade Liquefação Gasodutos Mostrar 6 mais



O Brasil tem vários projetos de terminais de regaseificação de gás natural liquefeito (GNL) em estudo, avaliação ambiental, bem como estágios iniciais ou avançados de projeto e engenharia.

A seguir está uma lista dos empreendimentos, de acordo com o banco de dados da BNAmericas:

DISLUB GNL MARANHÃO

Fonte: World Cargo News; BNAmericas.

5.5. Ferrovias

As ações relacionadas à descarbonização dos trens têm três eixos: melhoria operacional, combustível e eficiência, e eletrificação. Considerando o baixo grau de eletrificação da malha externa, a eletrificação da rede ferroviária não apresenta muito interesse. As opções com maior potencial seriam a melhoria operacional, a hibridização e o uso de combustíveis renováveis.

Operação

- Otimização do tráfego ferroviário com inteligência artificial.
- Redução do tempo ocioso das locomotivas.
- Caracterização do consumo e das emissões em tempo real das locomotivas.

Combustíveis e eficiência

- Implementação de locomotivas híbridas com baterias de lítio para operações dentro da área portuária.
- Aproveitamento da frenagem regenerativa para recarga das baterias.

- Biodiesel e HVO, idealmente a partir de óleos residuais (até 90%). O Brasil é uma potência em soja e palma.

Nova propulsão

- Eletrificação da rede ferroviária no porto, com parcerias público-privadas para financiamento da eletrificação.
- Utilização de Bio-GNL.
- Testes com locomotivas movidas a hidrogênio verde, integrando a produção de H₂ à matriz energética do Porto do Itaqui.

5.6. Estudo de potencial fotovoltaico e armazenamento

Os objetivos específicos deste estudo são identificar as áreas dentro do porto com maior potencial para a instalação de painéis solares, quantificar a capacidade de geração de energia solar e definir os parâmetros técnicos para sua implementação. Além disso, serão avaliadas as necessidades de armazenamento energético de curto e longo prazo para otimizar o uso da energia gerada.

Por fim, será analisado o potencial de produção local de hidrogênio e propostas soluções tecnológicas e de infraestrutura para seu armazenamento e uso, em consonância com as necessidades energéticas deste vetor energético previstas no presente Plano de Descarbonização do Porto de Itaqui.

5.6.1. Potencial solar

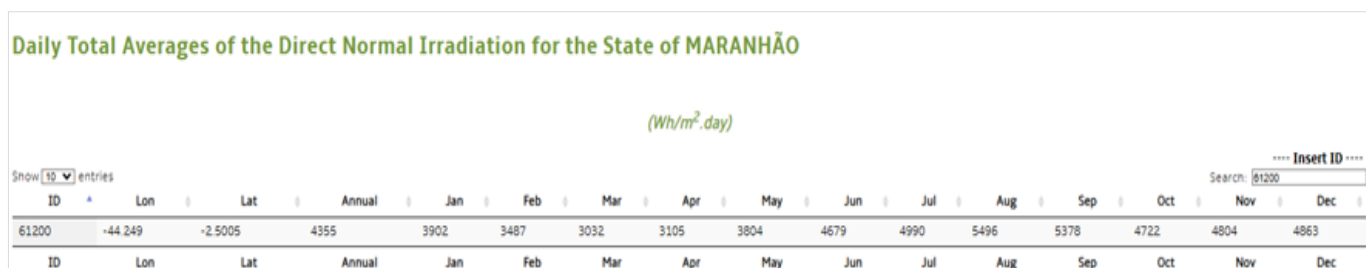
O presente estudo tem como objetivo analisar o potencial de geração solar fotovoltaica no Porto de Itaqui e em suas áreas de influência, considerando especificamente a viabilidade de instalar sistemas solares em coberturas de edifícios administrativos, estacionamentos em processo de reforma e outras áreas geridas pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) fora do perímetro portuário, como o terminal de passageiros ou terrenos adjacentes.

Dada a elevada irradiação solar característica do estado do Maranhão e o compromisso do porto com a descarbonização e a sustentabilidade energética, esta análise busca identificar oportunidades concretas para o aproveitamento da energia solar como fonte limpa e estratégica para o abastecimento de suas operações.

Para estimar o potencial de geração solar nas áreas identificadas do Porto de Itaqui, foi seguida uma metodologia baseada na análise da superfície disponível, dados de irradiação solar média anual e eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Em primeiro lugar, foi realizada uma estimativa preliminar das superfícies úteis em coberturas de edifícios administrativos, estruturas de estacionamento e terrenos externos viáveis, a partir de imagens de satélite

e plantas do porto. Posteriormente, foi considerada a irradiância solar média anual em São Luís, variando entre 3,03 (março) e 5,49 (agosto) kWh/m²/dia, com média anual de 4,366 kWh/m²/dia [1], bem como um rendimento médio do sistema entre 15 % e 18 % [2], levando em conta perdas por temperatura, orientação, sombreamento e conversão. Esses parâmetros permitem calcular a produção teórica anual de energia para cada tipo de área e avaliar sua contribuição potencial para o consumo elétrico do porto.

Figura 38 - Irradiação considerada para o Porto de Itaqui Itaqui.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Identificação de Áreas Suscetíveis para Instalação de Painéis Fotovoltaicos

Foram consideradas três categorias principais de espaços:

- **Coberturas de edifícios administrativos:** superfícies planas ou ligeiramente inclinadas, geralmente livres de obstruções e com infraestrutura elétrica próxima. Foram priorizadas as coberturas dos edifícios administrativos centrais, salas técnicas e armazéns logísticos.
- **Estacionamentos em reforma:** a instalação de estruturas fotovoltaicas tipo carport em estacionamentos é duplamente eficiente, pois gera energia renovável e ainda proporciona sombra e conforto térmico aos veículos. As áreas selecionadas incluem estacionamentos de pessoal operacional, visitantes e frotas de serviço, atualmente em processo de renovação ou expansão.
- **Áreas externas à poligonal portuária:** terrenos fora do perímetro imediato do porto, mas sob gestão da EMAP ou do Governo do Estado do Maranhão, como áreas logísticas desativadas, pátios ferroviários ou terrenos adjacentes. Esses locais representam oportunidade para implantação de plantas solares de maior escala.

Planejamento Inicial: Áreas Internas

O procedimento de dimensionamento das áreas seguiu um processo sequencial. Primeiramente, foi determinada a área disponível em zonas sob controle direto da EMAP. Essas zonas foram classificadas como tipologias 1 e 2 e definem o espaço disponível para a instalação de geração fotovoltaica em curto prazo.

Figura 39 - Área disponível em zonas sob controle



Fonte: Fundación Valenciaport.

Após a análise detalhada das infraestruturas e superfícies disponíveis no recinto do Porto de Itaqui, foi determinado que a área potencialmente aproveitável para a instalação de painéis fotovoltaicos é de **14.810 m²**. Essa superfície se distribui entre **7.320 m²** correspondentes a coberturas de edifícios administrativos e logísticos, e **7.490 m²** em áreas de estacionamento, atualmente em processo de renovação.

Para refletir com maior precisão a fração útil realmente disponível, foram aplicados fatores de adequação de 80 % para as coberturas (considerando obstáculos, inclinações ou zonas inacessíveis) e de 90 % para os estacionamentos (devido à disposição estrutural e ao espaçamento entre fileiras).

Como resultado, a superfície útil líquida estimada para a instalação de painéis solares é de **12.597 m²**, o que constitui a base para o dimensionamento da planta fotovoltaica dentro do perímetro portuário.

Planejamento Ampliado: Áreas Externas Fora do Polígono Portuário

Após a análise da superfície disponível dentro do recinto do Porto de Itaqui, foi estimado que é possível instalar um sistema fotovoltaico de aproximadamente 6,7 MWp sobre um total de 12.597 m² úteis, distribuídos entre coberturas de edifícios e áreas de estacionamento.

No entanto, essa capacidade representa apenas uma fração do potencial técnico de injeção permitido pela infraestrutura elétrica existente, em particular pela subestação equipada com uma célula modular de média tensão Schneider Electric SM6, configurada para operar a 13,8 kV com uma corrente nominal de 630 A.

Por isso, este estudo propõe, como primeiro passo, maximizar a geração fotovoltaica até esgotar a capacidade da rede interna de distribuição do Porto de Itaqui.

Ao combinar as superfícies internas já identificadas com novas áreas externas complementares, torna-se possível alcançar essa capacidade sem a necessidade de modificar a infraestrutura de média tensão existente. Essa estratégia de projeto não só permite maximizar o uso dos ativos já disponíveis, como também otimiza o retorno energético e econômico do sistema, ao distribuir o investimento fixo em infraestrutura sobre um volume maior de geração renovável, evitando investimentos superiores em upgrades da rede elétrica interna.

Requisitos para as Áreas Externas

Essas áreas externas deverão atender a uma série de requisitos técnicos, operacionais e jurídicos, entre os quais se destacam:

- **Titularidade pública ou disponibilidade de uso:** Priorizar terrenos pertencentes ao Governo do Estado do Maranhão ou geridos pela EMAP, como antigas áreas logísticas, pátios ferroviários desativados ou zonas próximas ao terminal de passageiros.
- **Proximidade da infraestrutura elétrica do porto:** Para minimizar perdas e facilitar a conexão ao ponto comum de entrega na subestação SM6, recomenda-se que a planta externa esteja a uma distância máxima de 1,5 a 2 km do centro de carga.
- **Condições topográficas e de irradiação:** Os terrenos devem possuir baixa declividade, orientação livre de sombras, acessibilidade para maquinário de instalação e baixa exposição a inundações, comuns em algumas áreas próximas ao porto.
- **Viabilidade de conexão:** Será necessário projetar uma conexão de média tensão, preferencialmente aérea ou subterrânea conforme viabilidade técnica, até a célula disponível da subestação existente, dimensionando adequadamente proteções e seccionamentos conforme a norma NBR 14039 (instalações elétricas em média tensão).

A tabela a seguir apresenta um resumo das características técnicas das instalações propostas.

Tabela 02 - Características técnicas das instalações propostas.

Parâmetro	Instalação interna	Instalação externa
Área de superfície efetiva disponível (m²)	12.597	14.340
Potência máxima instalada (kWp)	6.676	7.600
Número de módulos (550 W)	12.138	13.818
Produção anual mínima estimada (kWh)	3.011.168	3.427.812
Produção anual máxima estimada (kWh)	3.613.402	4.113.375

Fonte: Fundación Valenciaport.

A produção máxima estimada é de **7.726.777 kWh por ano**.

5.6.2. Necessidade de Armazenamento

Durante o ano de 2022, a EMAP registrou um consumo energético **total de 2,6 GWh**, segundo dados fornecidos pela administração portuária. Este valor corresponde ao conjunto de instalações operacionais e administrativas do recinto atendidas pela EMAP.

Esse volume de consumo permite estabelecer uma primeira aproximação da magnitude energética do complexo, que pode ser considerada moderada em termos industriais, o que abre caminho para uma estratégia de cobertura parcial ou até mesmo total por meio de fontes de geração renovável.

O sistema fotovoltaico proposto para instalação no porto, com potência total de 14,3 MWp, foi modelado com dados climáticos específicos do local utilizando o software PVGIS. Com base nesse modelo, foi estimada uma produção anual entre 6.438.848 e 7.726.618 kWh, dependendo do rendimento efetivo do sistema (intervalo estimado entre 15 % e 18 %).

A comparação direta entre a produção estimada e o consumo registrado permite extrair algumas conclusões-chave:

- A planta projetada geraria entre 2,47 e 2,97 vezes o consumo atual do porto.
- Isso implica um superávit energético significativo, o que exigirá avaliar cuidadosamente os cenários de gestão dos excedentes.
- Sob um esquema de autoconsumo direto, a instalação poderia cobrir 100 % da demanda atual gerida pela EMAP, inclusive nos meses de menor irradiação solar.

Estudo técnico sobre o potencial de armazenamento (Cenários)

Com o objetivo de avaliar de forma rigorosa e realista a viabilidade técnico-econômica do aproveitamento da energia solar fotovoltaica no Porto de Itaquí, o presente estudo foi estruturado em dois casos de análise diferenciados.

Essa divisão responde à necessidade de comparar o desempenho, o impacto e a rentabilidade de diferentes estratégias de implementação de geração renovável, levando em consideração tanto as limitações físicas do ambiente portuário quanto o cenário tarifário e tecnológico vigente.

Com base nos perfis de geração e considerando a demanda de referência (distribuída uniformemente como suposição inicial), será realizada a otimização econômica do dimensionamento das baterias, considerando os seguintes pressupostos:

- A geração projetada neste caso permite cobrir uma parte substancial do consumo elétrico atual do porto através de autoconsumo direto, reduzindo significativamente a conta de energia, com um custo de energia evitada estimado em R\$ 0,711 por kWh, conforme as tarifas industriais vigentes no Estado do Maranhão.
- No entanto, devido à limitação da superfície disponível, essa solução não permite o aproveitamento total do potencial fotovoltaico do enclave, nem a cobertura completa da demanda portuária em determinados períodos. Adicionalmente, a curva horária de geração nem sempre coincide com a curva de consumo, o que evidencia a necessidade de considerar opções de armazenamento elétrico complementar para melhorar o índice de autossuficiência.
- Dado o custo atual de armazenamento em baterias estacionárias, estimado em R\$ 2.000 por kWh instalado [13], foi analisada neste caso a capacidade ótima de baterias que permita deslocar a energia solar das horas de máxima geração para as horas de maior demanda, sem incorrer em superdimensionamentos injustificados.
- O equilíbrio entre o custo de investimento em armazenamento e a economia gerada pela redução do consumo de energia da rede é crucial para determinar a viabilidade final deste cenário.
- O objetivo da otimização é a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) do investimento, considerando uma taxa interna de desconto de 4 %.

Para realizar a otimização, foi utilizada uma ferramenta de otimização de baterias desenvolvida pela Fundación Valenciaport.

Caso de Estudo 1: instalação fotovoltaica em edifícios e estacionamentos próprios da EMAP

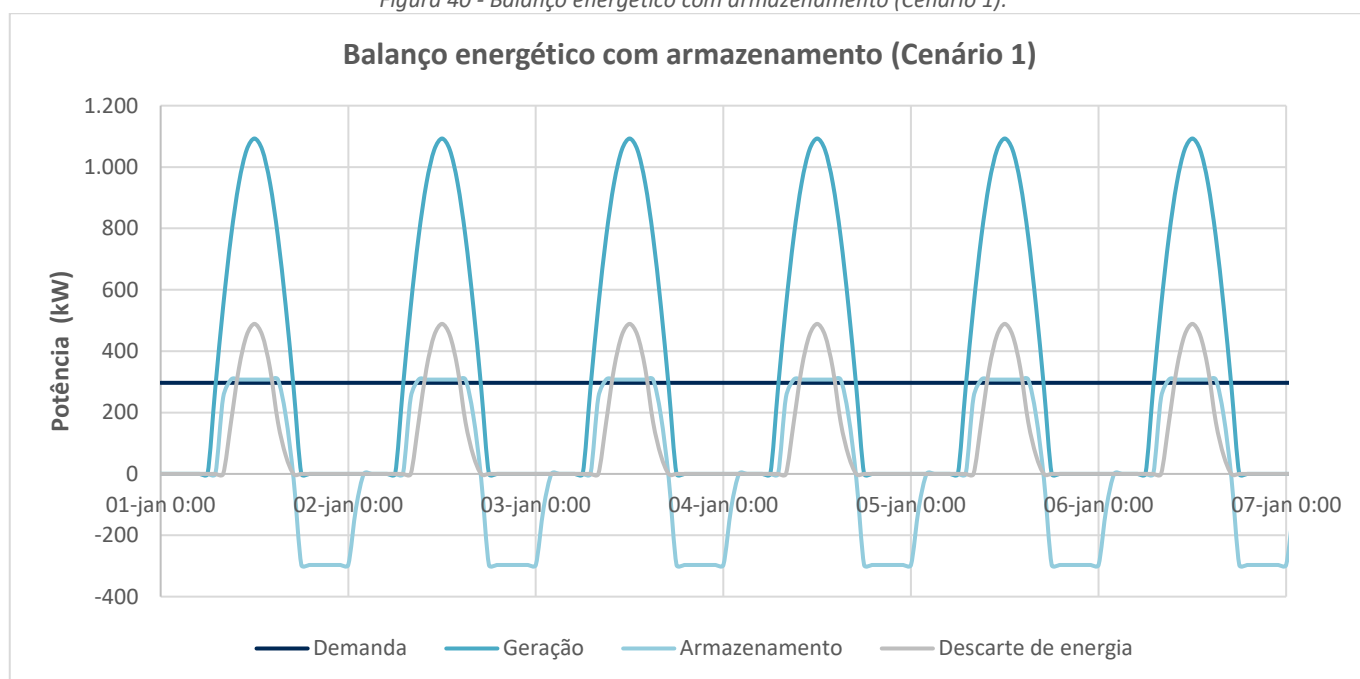
Neste primeiro cenário, considera-se apenas a instalação de sistemas fotovoltaicos sobre as coberturas dos edifícios administrativos e nas áreas de estacionamento previamente identificadas como tecnicamente viáveis dentro do recinto portuário. Esta opção representa uma estratégia de aproveitamento de áreas já urbanizadas, com mínimo impacto sobre o solo, menor complexidade de licenciamento e máxima integração arquitetônica.

Obtemos, para o primeiro caso de estudo, um valor de otimização de 307 kW de potência de armazenamento necessária, o que implica um investimento de R\$ 614.559 para a aquisição das baterias. Com isso, gera-se uma economia anual na compra de eletricidade de R\$ 565.458.

Além disso, há uma redução dos vertimentos de energia renovável (devido à incapacidade de absorção pela rede), passando de 2.030 MWh (equivalente a 63 % da geração) para 1.094MWh (34 %). Os custos de manutenção da instalação são estimados em R\$ 21.249.

A seguir, apresenta-se o gráfico com o balanço energético projetado para a primeira semana do ano considerado como base:

Figura 40 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 1).



Fonte: Fundación Valenciaport.

Caso de Estudo 2: instalação fotovoltaica considerando a instalação completa

No segundo cenário, amplia-se o escopo da instalação fotovoltaica com a inclusão de uma planta adicional em solo, localizada em áreas externas ao recinto imediato, mas ainda dentro da área de gestão portuária ou do Governo do Estado, como explanadas adjacentes ou zonas de expansão logística.

Essa alternativa permite atingir uma capacidade instalada significativamente maior, o que não apenas garante a cobertura total do consumo atual do porto, mas também viabiliza novos vetores de consumo energético, como:

- Produção de hidrogênio verde.
- Eletrificação de equipamentos portuários.
- Fornecimento de energia a terceiros.

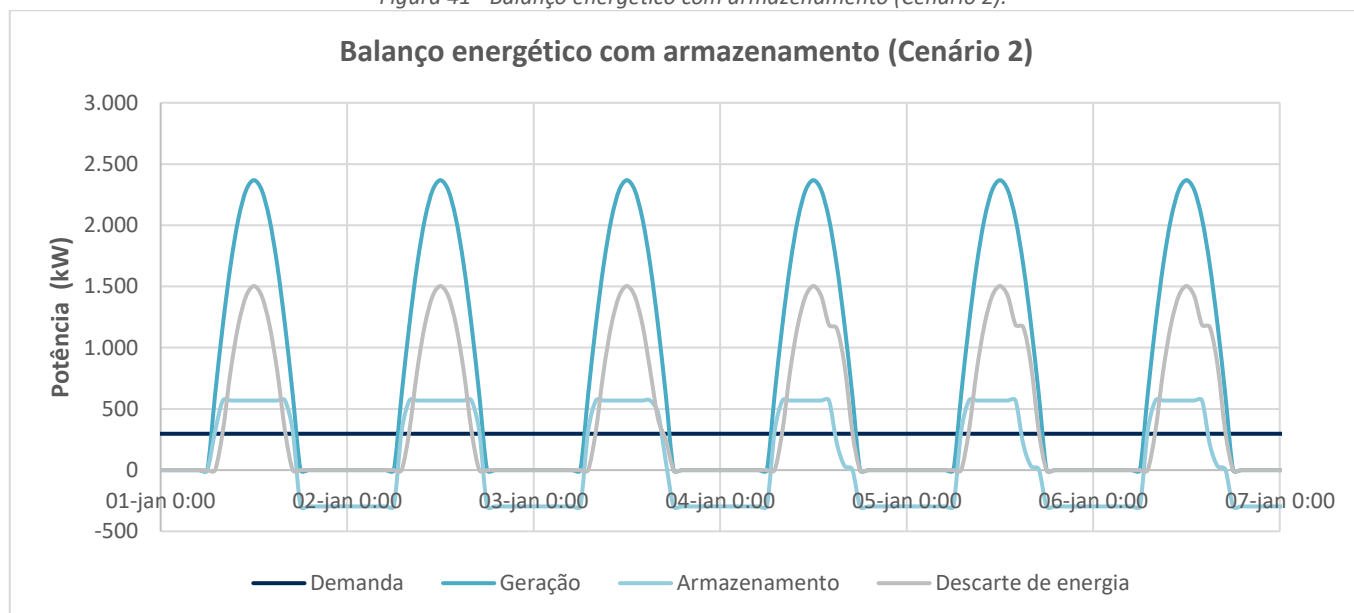
Essa maior capacidade de geração inevitavelmente gera um volume superior de excedentes solares diários, tornando mais relevante a necessidade de armazenamento elétrico. No entanto, também se abre a possibilidade de empregar parte dessa energia adicional em usos flexíveis, como a produção de hidrogênio, carregamento noturno ou sistemas de refrigeração, o que reduz a pressão sobre o sistema de baterias.

Dessa forma, este caso permite não apenas avaliar uma estratégia de aproveitamento energético em maior escala, como também avançar em direção a um modelo de autossuficiência energética integral e de geração distribuída com valor agregado.

Obtém-se, para o segundo caso de estudo, um valor de otimização de 568 kW de potência de armazenamento necessária, o que implica um investimento de R\$ 1.136.227 para a aquisição das baterias. Com isso, gera-se uma economia anual na compra de eletricidade de R\$ 996.755. Os vertimentos de energia renovável (devido à incapacidade de absorção pela rede) são reduzidos de 5.757 MWh (equivalente a 82 % da geração) para 4.105 MWh (59 %). Os custos de manutenção da instalação são estimados em R\$ 46.041, proporcionais à escala da solução proposta.

Esse resultado evidencia que, mesmo com armazenamento otimizado, uma parte significativa da energia renovável gerada não pode ser aproveitada sem a adoção de novas medidas de flexibilização do sistema. A seguir, apresenta-se o gráfico com o balanço energético projetado para a primeira semana do ano considerado como base:

Figura 41 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 2).



Em termos comparativos, o primeiro caso apresenta uma melhor eficiência relativa no aproveitamento energético, com um investimento menor e uma maior proporção de autoconsumo.

Por outro lado, o segundo caso, embora menos eficiente do ponto de vista do uso relativo da energia, permite alcançar maiores volumes absolutos de energia aproveitada e maior economia total, graças à maior escala da geração solar instalada.

Ambos os cenários demonstram a viabilidade técnica e econômica da combinação entre geração solar e armazenamento elétrico no ambiente portuário. No entanto, também evidenciam a necessidade de desenvolver estratégias complementares, como o uso de hidrogênio verde, a eletrificação de equipamentos ou a implementação de micro redes, para aproveitar a energia renovável excedente que não pode ser absorvida pela rede nem armazenada de forma eficiente.

5.7. Hidrogênio renovável

O estudo sobre a produção local de hidrogênio renovável no Porto de Itaquí Itaquí possibilitou o dimensionamento de uma planta de eletrólise de 1 MW parcialmente alimentada por energia solar, capaz de produzir até 450 kg de hidrogênio verde por dia. Essa produção é proposta como uma solução estratégica para descarbonizar as operações logísticas, abastecer as máquinas portuárias e gerar um novo vetor de energia complementar, aproveitando os excedentes fotovoltaicos não consumidos diretamente pela rede.

Figura 42 - Hidrogeneradora do projeto H2Ports localizada no Porto de Valência.



Fonte: Fundación Valenciaport.

O sistema inclui armazenamento de baixa pressão para cobrir um dia inteiro de operação, bem como uma estação de reabastecimento replicável com base no modelo **H2PORTS**. A análise econômica, considerando os preços locais da eletricidade e o investimento estimado, coloca o custo nivelado do hidrogênio (**LCOH**) entre R\$ 48 e R\$ 60 por kg.

Tabela 2 - Parâmetros Técnicos da Produção de Hidrogênio

Parâmetro	Valor
Potência do eletrolisador	1 MW
Produção máxima de hidrogênio	450 kg/dia
Consumo elétrico específico	12.138
Melhoria da utilização da eletricidade	+14.9% / +21.4%
LCOH estimado	R\$ 48 – R\$ 60

Fonte: Fundación Valenciaport.

5.8. Compensação

Uma vez aplicadas as medidas de mitigação, pode permanecer um volume residual de emissões que, devido às características próprias da atividade portuária, é de difícil eliminação. Nesses casos, podem ser considerados mecanismos de compensação.

A compensação de emissões refere-se ao processo de aquisição de créditos de carbono, gerados por projetos que absorvem ou evitam a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), com o objetivo de compensar as emissões que uma organização não consegue reduzir.

Cada crédito de carbono representa 1 tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂eq) que foi evitada ou absorvida por meio de um projeto certificado. Caso uma organização compense a totalidade de sua pegada de carbono referente a um determinado ano, ela pode ser considerada carbono neutro nesse período.

Existem diferentes níveis de compromisso que uma autoridade portuária pode assumir em relação à compensação de emissões, de acordo com o papel que exerce, desde facilitar o acesso a créditos de carbono para as diversas organizações atuantes no porto, até gerar seus próprios créditos de compensação.

Tabela 3 - Papéis de uma autoridade portuária na compensação de emissões.

Papel	Promotor	Aglutinador	Facilitador
Descrição	Investimento em projetos de absorção fora do entorno portuário	Intermediário entre promotores/corretoras e a comunidade portuária	Manutenção de um portal de compra de créditos de CO ₂ para os usuários portuários
Atividades	- Identificação de projetos - Investimento e manutenção - Certificação - Cessão/venda de créditos - Criação e manutenção de plataforma de compra e venda.	- Identificação de projetos - Cessão/venda de créditos - Criação e manutenção de plataforma de compra e venda	- Criação e manutenção de plataforma de compra e venda
Recursos	- Equipe da autoridade portuária em tempo integral - Licitações: • Auditorias • Plataforma	- Equipe da autoridade portuária em tempo parcial - Licitações: • Promotor/corretora • Plataforma	Licitação para o desenvolvimento do mercado

Fonte: Fundación Valenciaport.

6. Plano de ação

O plano de descarbonização do Porto de Itaquí prevê um objetivo estratégico de atuação para cada um dos segmentos de curto (2025-2035) e longo prazo (2035-2050). No curto prazo, são propostas ações que levem em consideração tecnologias já disponíveis para navios e rebocadores, combinadas com ações suaves em terminais e transporte terrestre. A longo prazo, propõe-se aumentar a presença de combustíveis renováveis e eletrificação.

Figura 43 - Principais ações sugeridas para a descarbonização do Porto de Itaquí.



Fonte: Fundación Valenciaport.

6.1. Ações identificadas EMAP

As possíveis ações foram discutidas em colaboração com vários departamentos da EMAP e foram levadas em consideração nas ações do plano.

- Desconto (Bonificação)
 - Relacionado ao ISP (Índice de Sustentabilidade Portuária).
 - bonificação via outorga ou tarifa.
- Abordar critérios de sustentabilidade nas próximas licitações.
- Implementação de sistemas para suprimento de energia para embarcações atracadas (OPS).
- Definir pontos de desempenho e atuação visando melhorias sustentáveis no porto.
- Implementação de um sistema de gestão das escalas.
 - Regras claras para atracação e operação.
 - VTMISS.
- Inclusão dos ferrys boats nos sistemas de gestão e sustentabilidade
- Ampliação da frota sustentável EMAP.

6.2. Navios

OPS em terminais de granel líquido

Recomenda-se a eletrificação dos berços de granel líquido. O padrão OPS (IEC/IEEE 80005-1) recomenda infraestrutura de fornecimento elétrico em média tensão para demandas de potência superiores a 1 MVA. No entanto, para demandas acima de 500 kW, considerando o aumento no porte dos navios e a possível conversão das caldeiras para sistemas elétricos, este estudo recomenda a infraestrutura de fornecimento OPS em média tensão (6,6 kV). A tabela a seguir apresenta os valores de potência estimados para cada berço, juntamente com os dados de porte bruto (Gross Tonnage) e comprimento dos navios que fizeram escala no ano de 2022.

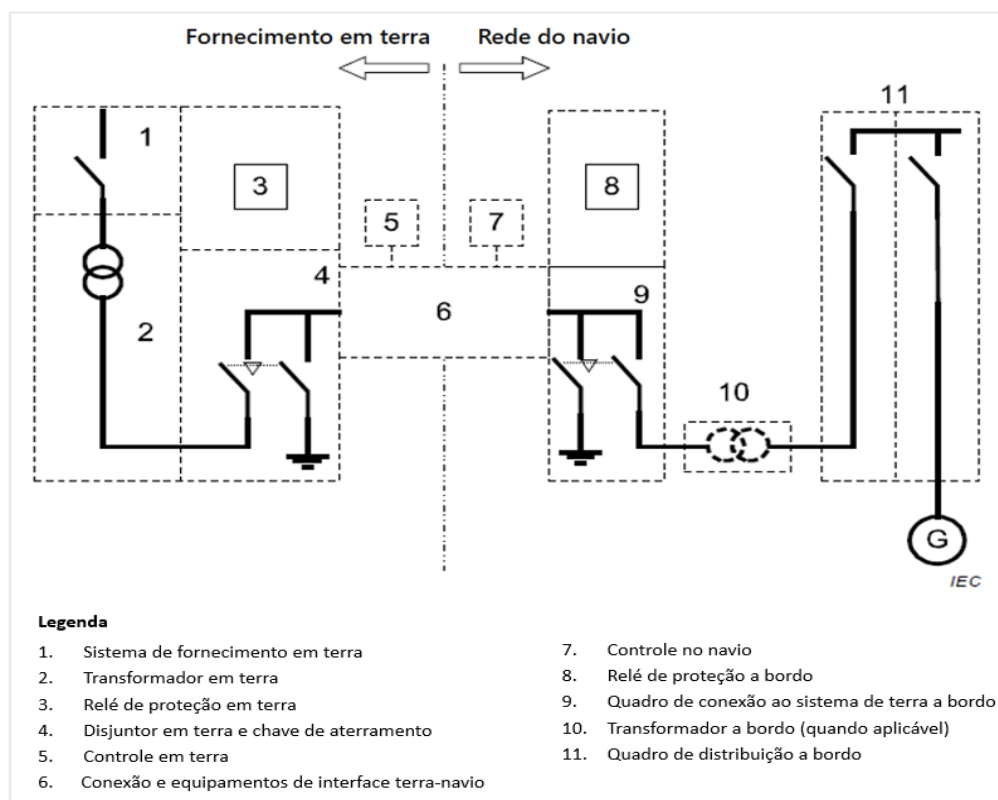
Tabela 4 - Dados dos navios de granel líquido que fizeram escala nos berços 104, 106 e 108 no ano de 2022.

Berço	Escalas	P_{aux} (kW)	$P_{boilers}$ (kW)	P_{total} (kW)	GT	Comprimento (m)
104	181	790	1350	2140	14900-36200	162-184
106	97	800	4000	4800	57000-66000	243-252
108	120	790	1350	2140	12700-54100	164-230

Fonte: Fundación Valenciaport

A capacidade total mínima requerida é de 9,08 MW, o que, considerando o componente de potência reativa, atinge um valor de $9,08/0,8 =$ aproximadamente 11,35 MVA.

Figura 444 - Esquema geral de conexão OPS em média tensão.



Fonte: IEC 80005-1. High Voltage Shore Connection. General Requirements.

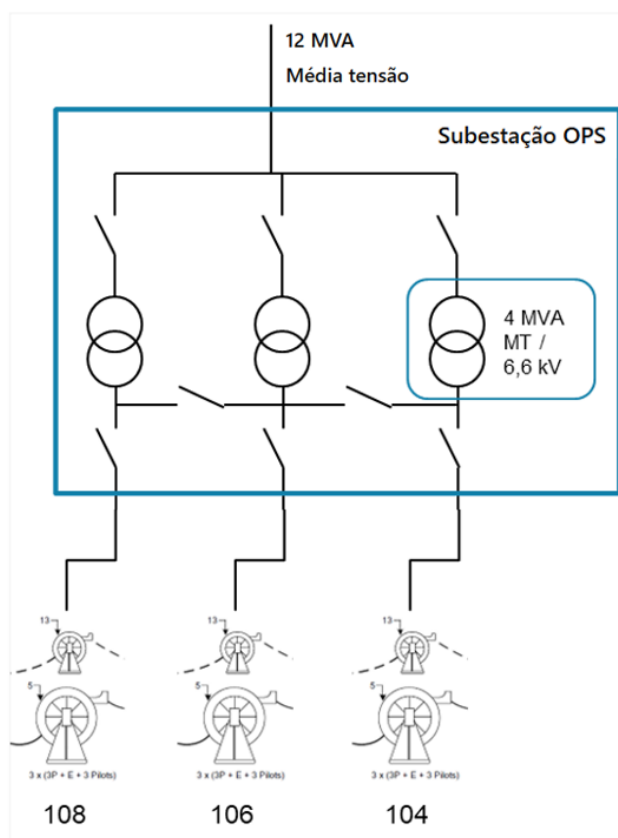
A norma IEC/IEEE 80005-1 HVSC (High Voltage Shore Connection) indica, em seu Anexo F de requisitos adicionais para navios-tanque, que a conexão ao navio deve ser feita com três cabos. Cada cabo deve ter três fases, terra e três linhas piloto. Cada cabo também deve ter uma capacidade nominal de 3,6 MVA. A montante da conexão, a subestação transformadora para a alimentação de 6,6 kV deve ter uma capacidade nominal mínima de 11,35 MVA no total.

Infraestrutura OPS necessária para a eletrificação de docas de graneis líquidos. Propõe-se a instalação de uma única subestação OPS, com capacidade nominal de 12 MVA, para abastecer OPS nos três berços (104, 106 e 108). A instalação requer uma linha de alimentação de média tensão com 12 MVA de potência contratada.

Recomendam-se as seguintes características para a subestação OPS:

- A subestação deve incluir pelo menos três transformadores, aterrados, para garantir o isolamento galvânico nas três linhas de alimentação para os berços.
- Além disso, deve incluir um quadro de distribuição para operação e proteções.
- Se a rede elétrica dos navios estiver a 60 Hz, não é necessário um conversor de frequência.
- Opção de incluir direção para permitir que a potência total seja usada em uma, duas ou três molas simultaneamente.

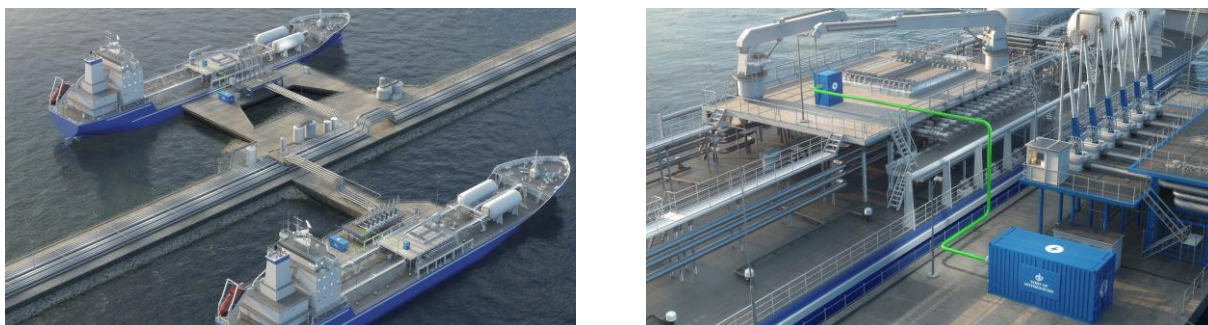
Figura 45 - Esquema simplificado de infraestrutura elétrica para fornecimento de OPS aos berços 104, 106 e 108.



Fonte: Fundación Valenciaport.

O potencial de redução de emissões da eletrificação dos berços 104, 106 e 108 depende da porcentagem de instalação de OPS em navios e da eletrificação de caldeiras. Supondo que os berços em 2022 tenham sido utilizados em todo o potencial, o potencial máximo de redução chegará a 40,2 kt (8,5 kt de geradores auxiliares e 31,7 kt de caldeiras).

Figura 46 - Exemplo de instalação OPS para navios tanque: Projeto The Green Cable para navios tanque no Porto de Gotemburgo.



Fonte: Port of Gothenburg.¹⁶

Orçamento

Na Europa, o custo da instalação do sistema OPS, desde a subestação OPS até o sistema de gestão de cabos no cais, é de aproximadamente 900 mil euros por MVA instalado, incluindo conversor de frequência. Caso o conversor não seja necessário, o custo pode ser reduzido pela metade: 450 mil euros por MVA instalado. Portanto, para a instalação proposta, o orçamento seria:

$$12 \text{ MVA} \times 450 \text{ k€} = 5,4 \text{ M€}$$

Este cálculo não inclui a linha de alimentação de média tensão. A infraestrutura incluída é desde a subestação OPS até os sistemas de gerenciamento de cabos nos três berços.

Outras Ações

Recomenda-se começar com a melhoria da coleta de dados na solicitação de escalas (preparação para OPS e combustível consumido) e melhorar a gestão das escalas. Em um segundo momento, será necessário atualizar a rede elétrica com a instalação de uma rede de média tensão, o que exigirá um estudo detalhado da rede. Por fim, é necessário buscar benefícios para as empresas de navegação que utilizam opções descarbonizadas ou um sistema de prioridade de escala.

¹⁶ <https://www.portofgothenburg.com/about/projects/ops-tankers/>

Tabela 5 - Lista de ações para navios.

#	Ação	Orçamento (MR\$)	Potencial redução/ ano (kt CO ₂)	Início	Fim	Departamento
N1	Melhoria na coleta de dados das escalas	0,6	0	1M26	2M26	Operações, Digitalização
N2	Implementação de um sistema de gestão das escalas	0,3	0	2M26	1M27	Operações, Digitalização
N3	Pesquisa de preparação da rede elétrica do Itaqui	2	0	2M26	1M27	Infraestruturas
N4	Rede de média tensão (12 MW)	35	0	2M26	2M27	Infraestruturas
N5	Eletificação de berços de graneis líquidos	33,2	15,6	1M27	2M28	Infraestruturas
N6	Desconto de tarifa para navios que usam combustíveis renováveis	14	3,5	1M27	2M40	Operações
N7	Sistema de prioridade de escala para navios de baixo carbono	0,24	1,3	1M27	2M50	Operações

Fonte: Fundación Valenciaport.

As ações N5 e N6 devem ser consideradas com dois níveis de ambição na definição de cenários. No cenário conservador, a ação N5 considerará apenas a eletrificação do píer 104, enquanto no cenário otimista tanto o píer 104 quanto o 106 serão eletrificados. Para a ação N6, são considerados diferentes resultados obtidos pela redução de tarifas. No cenário conservador, as reduções alcançadas são de 2,5%, enquanto no cenário otimista são de 5%.

Uma parte significativa das emissões dos navios provém da zona de fundeio (em 2022 foram de 95,8 kt CO₂eq, principalmente devido aos graneis sólidos). Embora seja discutível se é uma área onde as ações são recomendadas, são apresentadas duas opções que podem ser de interesse e identificado o potencial de economia. No caso das zonas de ancoragem 4, 5 e 7, selecionando navios com calado inferior a 11 m, as emissões totais são de 9,05 kt CO₂eq.

Tabela 6 - Ação proposta para navios na área de fundeio.

#	Ação	Orçamento (MR\$)	Potencial redução/ano (kt CO ₂)	Início	Fim	Departamento
N0	OPS para navios fundeados	18/30	2,8	1M40	2M50	Infraestruturas

Fonte: Fundación Valenciaport.

Para essas áreas de fundeio mais próximas ao porto, propõem-se soluções baseadas em "power-barge":

Solução BlueBARGE:

- Fornecimento máximo por escala: energia utilizada por geradores auxiliares ancorados - capacidade máxima de fornecimento (35 MWh).
- Uma barça só pode atender uma embarcação por vez, depois recarregar ou trocar a bateria.

- As emissões resultantes no consumo de auxiliares para balanças com calado inferior a 11 m são de 2,34 kt CO₂. O máximo que poderia ser reduzido é 2,79 kt CO₂. Isso equivale a 2,95% do total de emissões de CO₂eq no ancoradouro por ano.

Solução Elementar:

- Fornecimento máximo por escala: energia utilizada por geradores auxiliares fundeados- capacidade máxima de fornecimento (48 MWh).
- Uma barcaça só pode atender uma embarcação por vez e, em seguida, reabastecer H₂.
- As emissões resultantes no consumo de auxiliares para balanças com calado inferior a 11 m são de 1,73 kt CO₂. O máximo que poderia ser reduzido é de 3,46 kt CO₂eq. Isso equivale a 3,61% do total de emissões de financiamento por ano.

6.3. Rebocadores

Ao promover sistemas antifouling, é possível melhorar o desempenho dos rebocadores. Isso requer a implementação de um sistema de inspeção e certificação para validar a economia obtida.

- **Monitoramento**

- Uso de sensores no casco para medir a acumulação de organismos marinhos.
- Análise de históricos.

- **Redução de Emissões**

- Depende da tecnologia: 5% (básico) e 12% (silicone de baixa fricção).
- Economias de até 3700 t anuais (12% de consumo).

- **Custos Associados**

- Câmeras de inspeção (R\$ 58 mil).
- Pessoal, para inspeção.
- Descontos nas taxas portuárias.

- **Avaliação**

- Certificação antifouling com histórico de consumos por manobra

Estima-se que será necessário que 6 novos rebocadores estejam em operação até 2040. Embora a frota atual seja bastante numerosa, o que implica um baixo número de manobras por rebocador, é preciso considerar a

possibilidade de que os rebocadores também operem no terminal de Ponta da Madeira e em Alumar, o que reduz a jornada disponível. Se for possível aplicar critérios de sustentabilidade nos novos editais de serviços portuários, pode-se propor que as novas aquisições sejam de emissão zero. Com base em dados de custo de rebocadores elétricos adquiridos em 2022 pela empresa Saam Towage, entre US\$ 8,8 milhões e US\$ 12 milhões, supõe-se um valor de US\$ 10 milhões por rebocador, o que pode implicar um sobrecusto de 100%. O potencial de redução de emissões seria de aproximadamente 1000 toneladas por rebocador.

Tabela 7 - Estimativa de Manobras/Rebocador.

Ano	Escalas	Manobras reb.	#Reb.	Man./Reb.
2022	997	4543	24	190
2040	1445	6584	30	220

Fonte: Fundación Valenciaport.

Tabela 8 - Estimativa de Consumo com Rebocadores Elétricos.

MDO (tn)	CO ₂ (tn)	
9153,113	29344,88	Sem eletrificação
7322,49	23475,90	6 Rebocadores elétricos

Fonte: Fundación Valenciaport.

No curto prazo, propõe-se a melhoria de desempenho por meio da promoção do antifouling e da eletrificação durante a espera. Em médio prazo, a atividade será descarbonizada de acordo com a estratégia da IMO.

Tabela 9 - Ações Propostas para a Descarbonização do Setor

#	Ação	Orçamento (MR\$)	Potencial de redução/ano (kt CO ₂)	Início	Fim	Departamento
R8	Grupo de trabalho para a descarbonização de rebocadores	0,78	0,55	2M25	2M40	Meio Ambiente
R9	Programas de monitoramento de bioincrustação	0,26	3,34	2M26	2M27	Meio Ambiente/ Operações
R10	Fornecimento de eletricidade durante a espera	3,15	1,59	1M27	2M27	Meio Ambiente

Fonte: Fundación Valenciaport.

6.4. Terminais

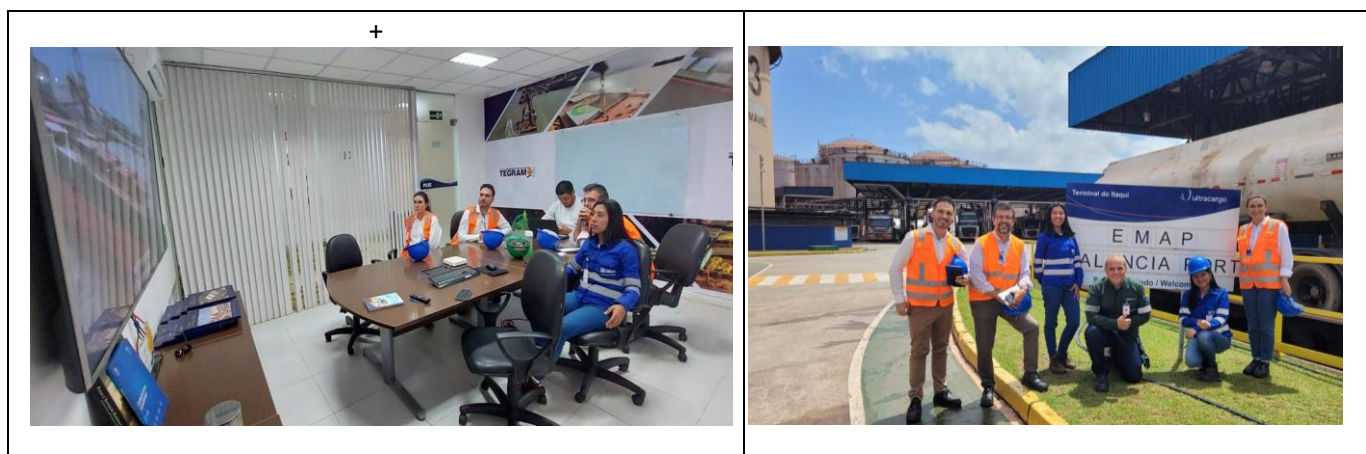
As emissões das operações de carga e descarga representam uma pequena fração das emissões totais do porto, mas ainda há espaço para reduzir as emissões das operadoras. Para que um plano de descarbonização seja bem-sucedido e suas ações efetivas, é fundamental envolver toda a comunidade portuária. Os operadores precisam se comprometer a desenvolver iniciativas que reduzam as emissões de suas atividades. Nesse sentido, propõe-se a criação de uma comunidade colaborativa dedicada à melhoria da coleta de dados (como consumo de combustível, emissões e inventário de equipamentos, entre outros) e à divulgação do plano de descarbonização. Essa

comunidade pode também trabalhar no desenvolvimento de ações de treinamento e na promoção de alternativas tecnológicas de baixa emissão, entre outras iniciativas.

As primeiras fases do processo devem se concentrar na formação dessa comunidade cooperativa, sendo a disseminação do plano de descarbonização o estágio inicial. Ações como treinamento, identificação de alternativas tecnológicas e colaboração na aquisição de energia são mais viáveis dentro dessa estrutura colaborativa. Os principais pilares dessas ações incluem a criação de uma comunidade participativa, com reuniões regulares e metas anuais, cuja adesão será definida nos termos de referência. Simultaneamente, é necessário melhorar o monitoramento e implementar incentivos adequados. Por fim, uma alternativa interessante seria a utilização de caminhões elétricos em operações de acesso frequente ao cais, como no transporte entre o cais e os armazéns.

Figura 47 - Comunidade portuária colaborativa para a descarbonização do porto.





Fonte: Fundación Valenciaport.

Tabela 10 - Ações propostas para operadores portuários.

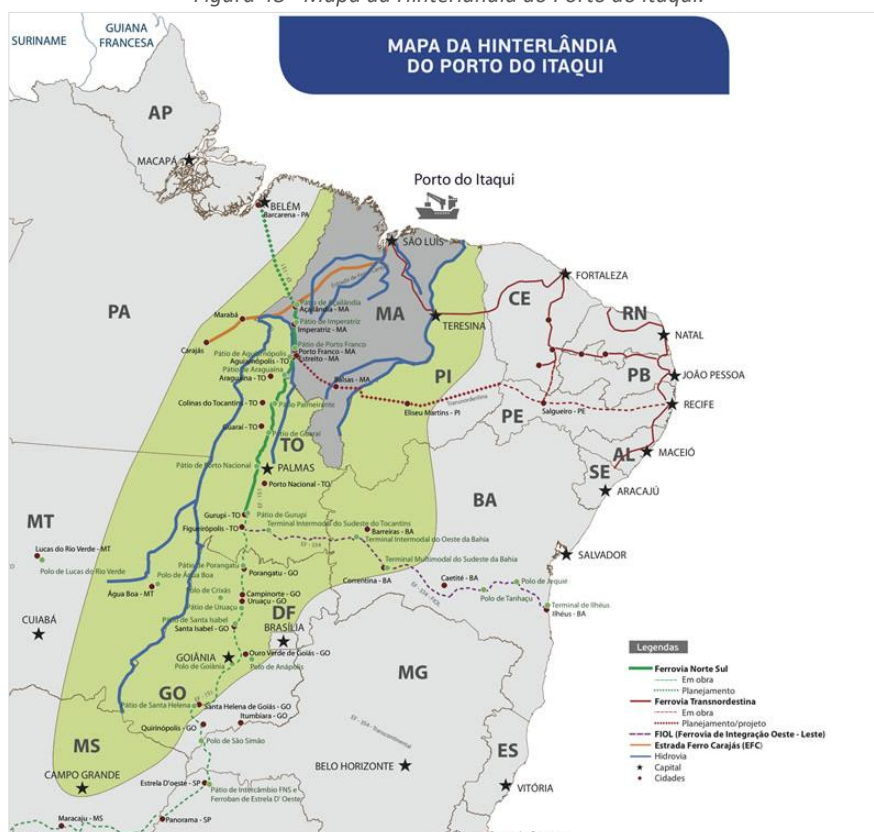
#	Ação	Orçamento (MR\$)	Potencial redução/ano (kt CO ₂)	Início	Fim	Departamento
T11	Criação da comunidade de colaboração (Melhoria da coleta de dados, inventário, catálogo e capacitação)	1,3	0,2	1M26	2M50	Meio Ambiente
T12	Separação dos medidores de eletricidade de cada terminal/operador dos da EMAP	0,2	0,01	1M26	2M26	Infraestruturas
T13	Incentivo ao uso de eletricidade renovável (com certificado)	57,5	0,2	1M28	2M50	Meio Ambiente
T14	Incentivos econômicos para operadores e terminais (redução de taxas/tarifas) pelo uso de combustíveis de baixa emissão	42	1,9	1M30	2M50	Meio Ambiente
T15	Instalação de ponto de recarga para caminhões	3,3	0,2	1M28	2M28	Infraestrutura e Energia

Fonte: Fundación Valenciaport.

6.5. Caminhões

Dado o impacto relativamente baixo dos caminhões na pegada de carbono total, somado à falta de caracterização específica do setor e à complexidade da transição tecnológica, recomendam-se ações graduais de curto prazo. Em paralelo, sugere-se a experimentação de novas tecnologias, considerando as limitações atuais da infraestrutura de abastecimento.

Figura 48 - Mapa da Hinterlândia do Porto do Itaqui.



Fonte: Porto do Itaqui.¹⁷

Figura 49 - Caminhão a GNL da Virtu GNL em operação no Porto do Itaqui.



Fonte: Porto do Itaqui.

Os primeiros passos definidos visam melhorar o conhecimento sobre o setor e o apoio prestado pela EMAP. Em seguida, as ações se concentrarão em facilitar o acesso à eletricidade e aos combustíveis renováveis. A eletrificação pura será interessante para trajetos curtos, enquanto para outras rotas a melhor opção são os combustíveis drop-in (diesel).

¹⁷ <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/planejamento-desenvolvimento/novos-negocios>

Tabela 11 - Ações propostas para descarbonização do transporte terrestre associado ao Porto do Itaqui.

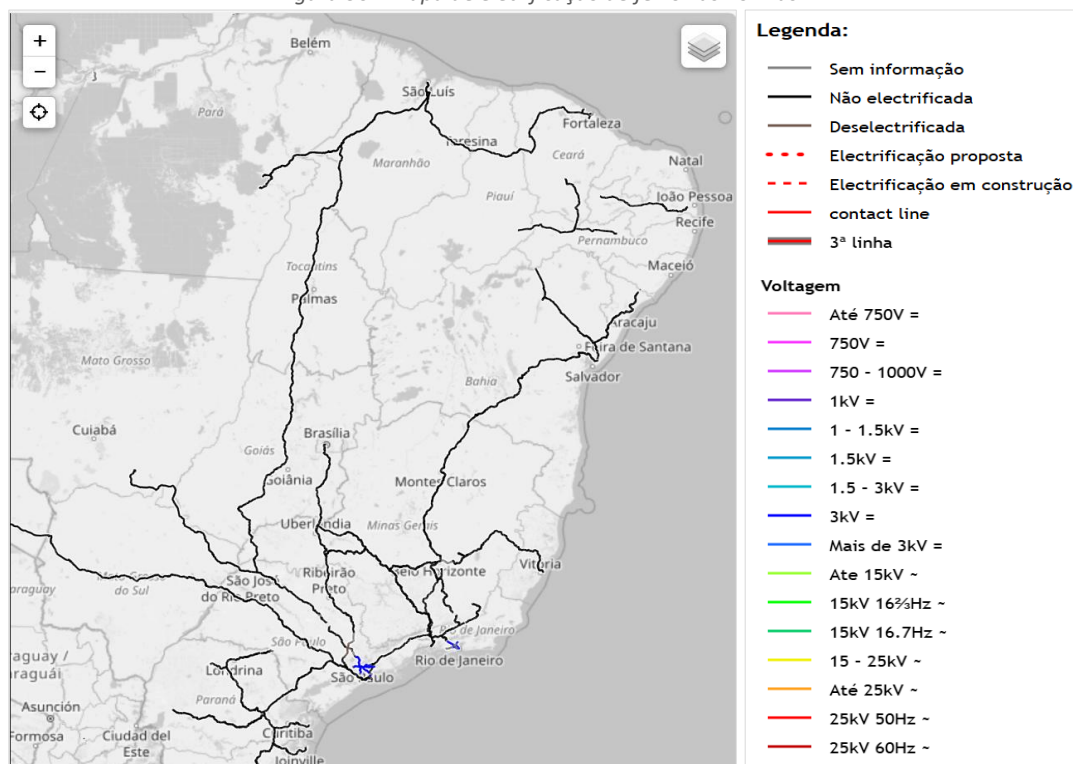
#	Ação	Orçamento (MR\$)	Potencial de redução/ano (kt CO ₂)	Início	Fim	Departamento
C16	Grupo de trabalho do transporte terrestre + setor agrícola.	0,78	0,04	2M25	2M40	Logística e Transporte
C17	Estudo do hinterlândia e potencial de corredores verdes.	0,5	0	2M26	2M27	Planejamento Estratégico
C18	Esquema de categorização e etiquetas verdes para caminhões	1,35	0,1	1M27	2M40	Meio Ambiente
C19	Acordo com empresa de energia para o fornecimento de combustível renovável no entorno portuário	288	0,1	1M27	2M30	Infraestrutura e Energia
C20	Escritório de assistência às empresas de transporte	5	0,23	1M27	2M30	Meio Ambiente

Fonte: Fundación Valenciaport.

6.6. Ferrovias

Considerando o pequeno porte do setor ferroviário, o baixo grau de desenvolvimento de alternativas tecnológicas e o potencial para aumentar o diálogo entre as operadoras e a EMAP, sugere-se concentrar esforços na comunicação e na inovação.

Figura 50 - Mapa de eletrificação de ferrovias no Brasil.



Fonte: OpenRailwayMap.¹⁸

¹⁸ <https://www.openrailwaymap.org/>

Figura 51 - Locomotivas híbridas ZTR.



Fonte: Union Pacific.¹⁹

Propõe-se trabalhar no aprimoramento das operações e em outras ações de descarbonização por meio da criação de um grupo de trabalho como um espaço de colaboração.

Tabela 12 - Ação proposta para descarbonização das operações ferroviárias no Porto do Itaqui.

#	Ação	Orçamento (MR\$)	Potencial de redução (kt CO ₂)	Início	Fim	Departamento
F21	Grupo de trabalho de logística e digitalização das operações ferroviárias	0,75	0,06	1M26	2M40	Operações

Fonte: Fundación Valenciaport.

6.7. Cenários

Para avaliar o impacto potencial do plano de descarbonização, foram definidos diferentes cenários de implementação, de acordo com o grau de adoção das medidas propostas. Das 21 ações identificadas, foram selecionadas aquelas que apresentam um impacto quantificável na redução de emissões e que permitem modelar dois níveis de ambição: um cenário conservador, que assume uma adoção parcial ou mais gradual das medidas, resultando em reduções moderadas de emissões; e um cenário otimista, que contempla a implementação total das ações e as máximas reduções possíveis das emissões de GEE.

Além disso, incluem-se 5 ações de preparação que, embora não resultem em reduções diretas de emissões, são necessárias para viabilizar ou facilitar a adoção de medidas mais ambiciosas.

A tabela a seguir enumera as diferentes ações por atividade e indica se elas foram consideradas para a fase de preparação (PRE), para o cenário conservador (CON) e/ou para o cenário otimista (OPT).

¹⁹ https://www.up.com/aboutup/community/inside_track/ztr-hybrid-locomotives-it-240429.htm

Tabela 13 - Medidas de descarbonização propostas para o Porto do Itaqui com seus cenários.

Atividade	#	Ação	PREP	CON	OPT
Navios	N1	Melhoria na coleta de dados das escalas			
	N2	Implementação de um sistema de gestão das escalas			
	N3	Pesquisa de preparação da rede elétrica do Itaqui			
	N4	Rede de média tensão (12 MW)			
	N5	Eletrificação de berços de granéis líquidos			
	N6	Desconto de tarifa para navios que usam combustíveis renováveis			
	N7	Sistema de prioridade de escala para navios de baixo carbono			
Rebocadores	R8	Grupo de trabalho para a descarbonização de rebocadores			
	R9	Programas de monitoramento de bioincrustação			
	R10	Fornecimento de eletricidade durante a espera			
Terminais	T11	Criação da comunidade de colaboração (Melhoria da coleta de dados, inventário, catálogo e capacitação)			
	T12	Separação dos medidores de eletricidade de cada terminal/operador dos da EMAP			
	T13	Incentivo ao uso de eletricidade renovável (com certificado)			
	T14	Incentivos econômicos para operadores e terminais pelo uso de combustíveis de baixa emissão			
	T15	Instalação de ponto de recarga para caminhões			
Caminhões	C16	Grupo de trabalho do transporte terrestre + setor agrícola.			
	C17	Estudo do hinterlândia e potencial de corredores verdes.			
	C18	Esquema de categorização e etiquetas verdes para caminhões			
	C19	Acordo com empresa de energia para o fornecimento de combustível renovável no entorno portuário			
	C20	Escritório de assistência às empresas de transporte			
Ferrovias	F21	Grupo de trabalho de logística e digitalização das operações ferroviárias			

Fonte: Fundación Valenciaport.

6.7.1. Cenário conservador

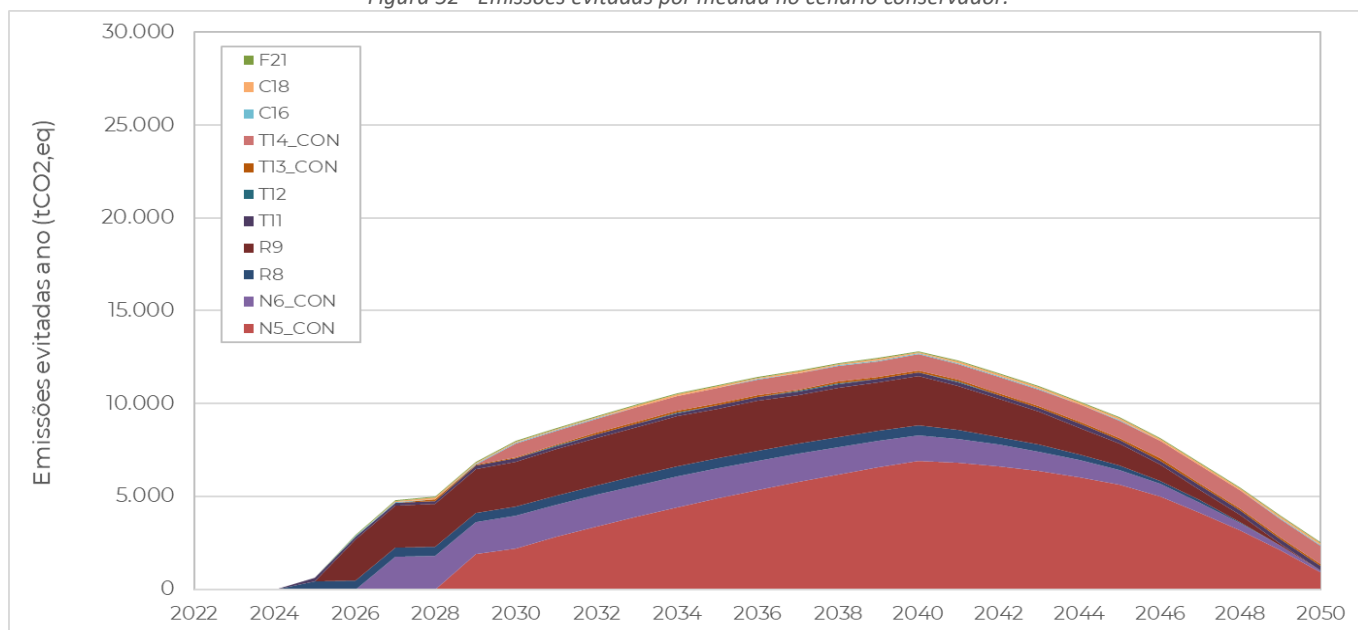
No cenário conservador, as ações propostas resultam em reduções anuais significativas de emissões entre 2025 e 2040, atingindo um pico superior a 25 mil toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂eq) evitadas em 2040, conforme indicado na Figura 53. A partir desse marco, o impacto das medidas voltadas a navios e rebocadores tende a diminuir, uma vez que grande parte dessas embarcações já terá adotado tecnologias de baixo carbono, em linha com as diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO).

Nesse contexto, as ações direcionadas aos terminais portuários e ao transporte rodoviário passam a ganhar relevância progressiva no portfólio de descarbonização do Porto do Itaqui, assumindo papel estratégico na continuidade da trajetória de mitigação das emissões do complexo portuário até 2050.

Esse cenário representa um avanço moderado, porém possivelmente mais realista, considerando as limitações técnicas, econômicas ou de governança que podem retardar a adoção de determinadas tecnologias ou mudanças operacionais no Porto do Itaqui.

O gráfico a seguir apresenta as emissões anuais evitadas por cada medida no cenário conservador:

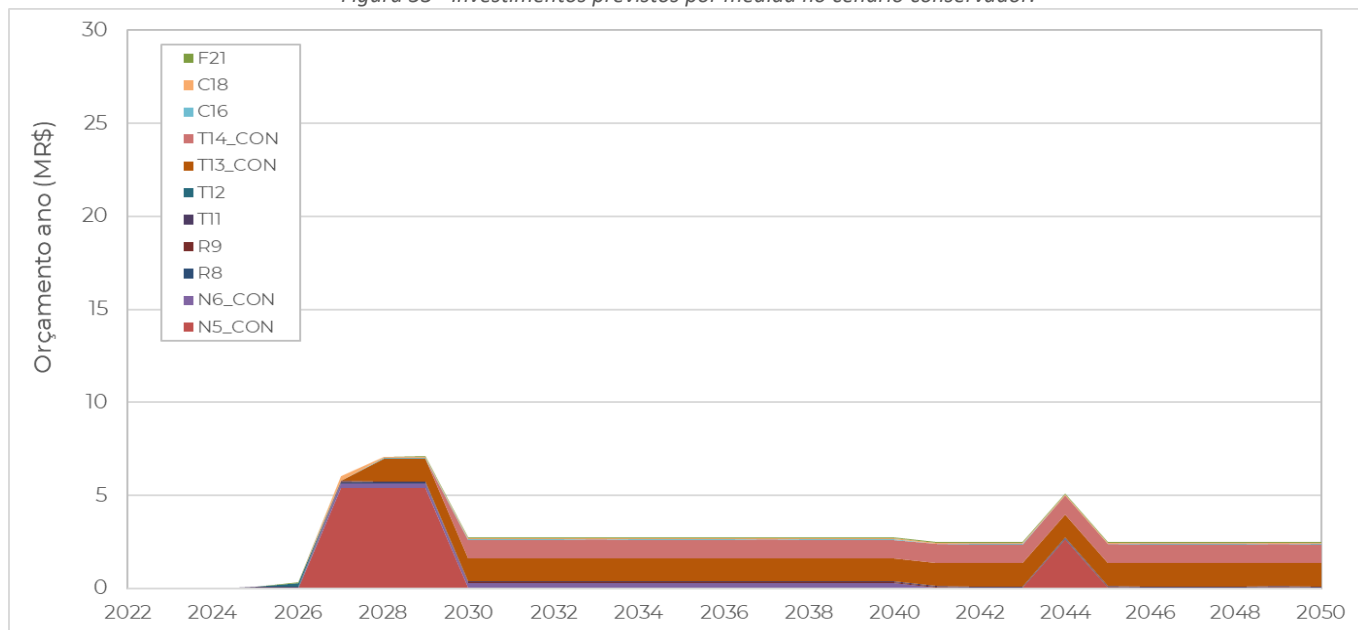
Figura 52 - Emissões evitadas por medida no cenário conservador.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Os maiores investimentos estão previstos entre 2026 e 2030, alcançando R\$ 8 milhões por ano. Em 2044, há um novo pico de investimento devido ao recondicionamento da instalação de OPS.

Figura 53 - Investimentos previstos por medida no cenário conservador.

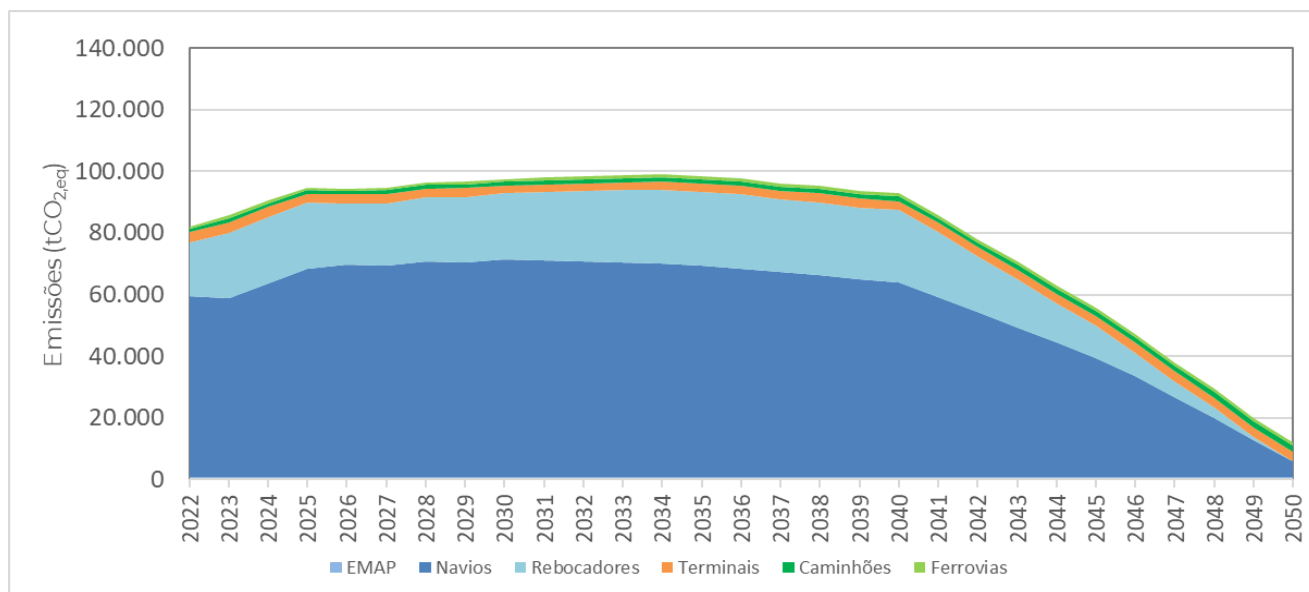


Fonte: Fundación Valenciaport.

Como resultado da implementação das medidas de redução e dos investimentos correspondentes, no cenário conservador é possível manter as emissões anuais do Porto do Itaqui abaixo de 100 kt de CO₂eq em todos os momentos, mesmo nos anos de maior atividade. Para 2050, as emissões são reduzidas para aproximadamente 12 kt, o que representa uma diminuição de 17% em comparação ao cenário tendencial (Business as Usual).

Embora esse cenário implique uma implementação gradual e mais limitada das medidas propostas, ele permite avançar rumo a um modelo portuário mais sustentável e resiliente, estabelecendo as bases para futuras melhorias.

Figura 54 - Emissões anuais do Porto do Itaqui no cenário conservador.

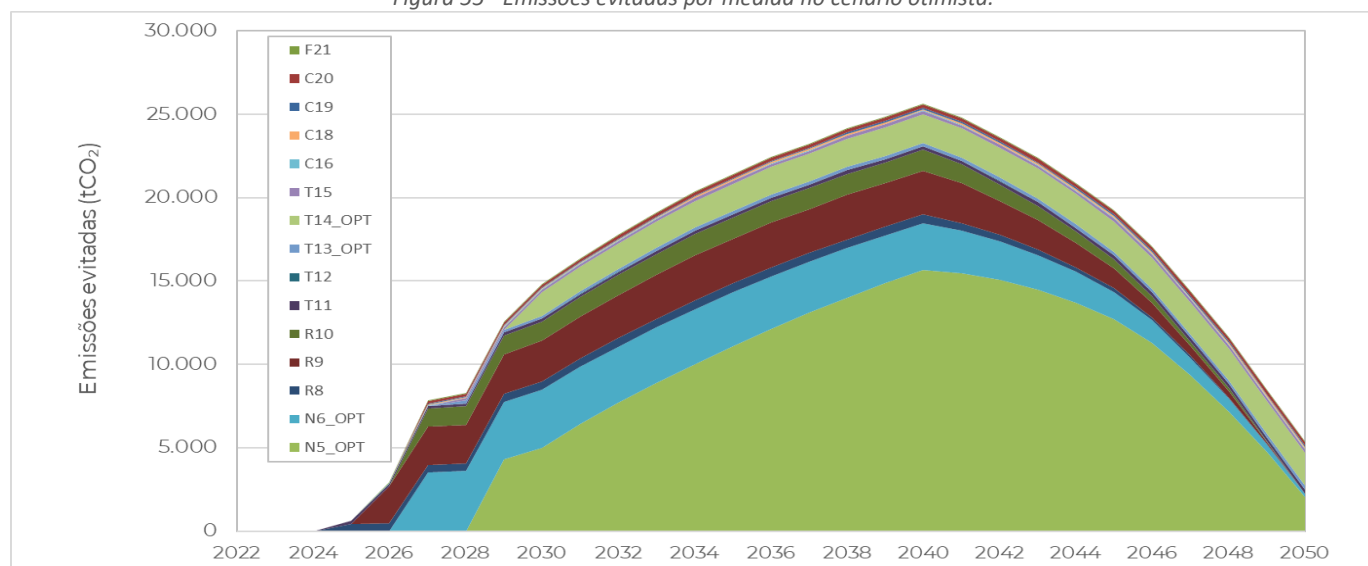


Fonte: Fundación Valenciaport.

6.7.2. Cenário otimista

No cenário otimista, considera-se a adoção ampla e acelerada das medidas de descarbonização propostas, com maior ambição e eficiência na sua implementação. Nessas condições, a redução anual de emissões de GEE atinge seu pico por volta de 2040, superando 25 mil toneladas de CO₂ equivalente (ktCO₂eq). A partir desse ponto, observa-se uma redução gradual no ritmo de abatimento anual, principalmente em função da transformação progressiva da frota de navios e rebocadores para tecnologias de baixa ou zero emissão, o que diminui o potencial marginal de redução nessas categorias à medida que as principais fontes de emissões são substituídas ou otimizadas.

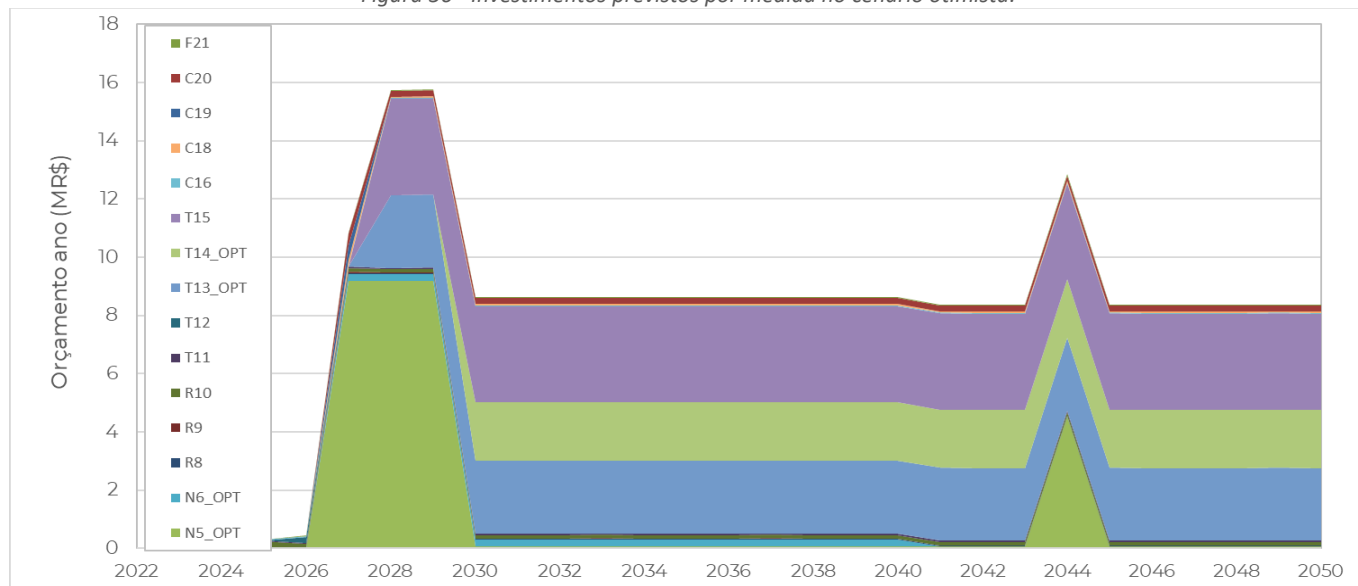
Figura 55 - Emissões evitadas por medida no cenário otimista.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Os maiores investimentos estão previstos entre 2026 e 2030, superando R\$ 24 milhões anuais. Em 2044, há um novo pico de investimento devido ao recondicionamento da instalação de OPS. A partir de 2026, o investimento anual necessário ultrapassa R\$ 11 milhões.

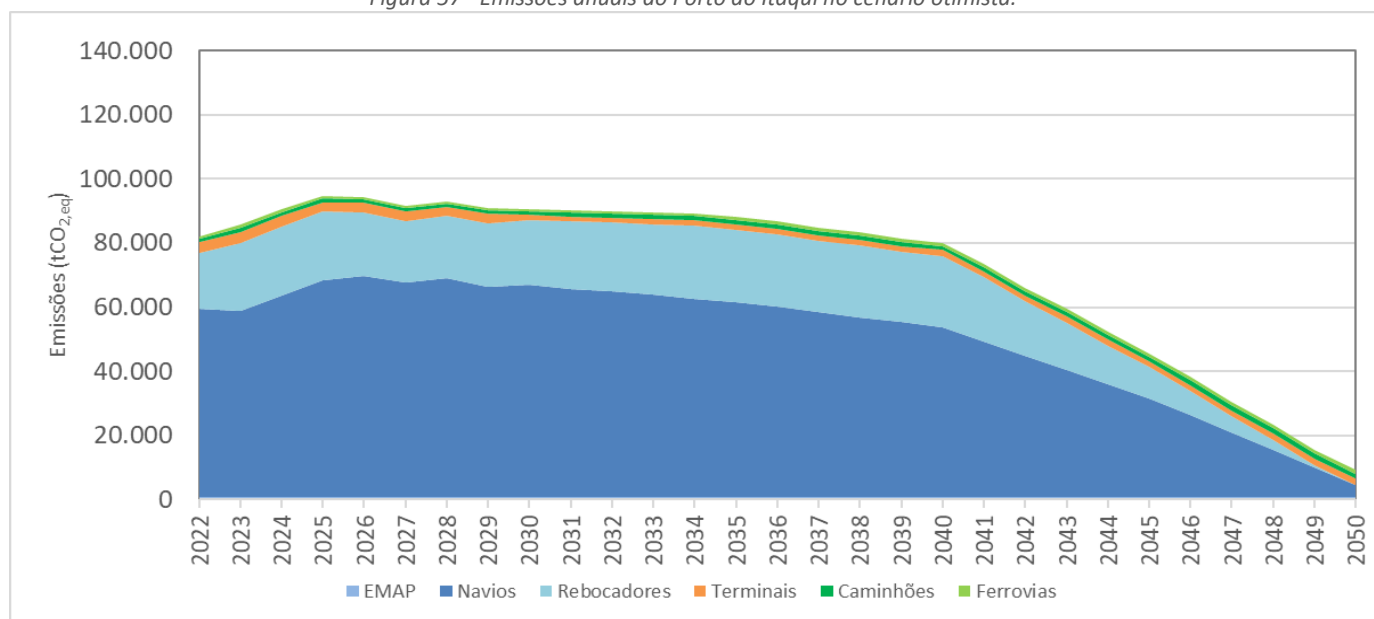
Figura 56 - Investimentos previstos por medida no cenário otimista.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Como resultado de uma implementação mais decidida das medidas de descarbonização propostas, as emissões do porto começam a diminuir de forma contínua a partir de 2026. Em 2050, as emissões anuais são reduzidas para aproximadamente 9 kt de CO₂eq, o que representa uma diminuição significativa em relação ao cenário tendencial (Business as Usual — BaU) e evidencia o impacto que pode ser alcançado por meio de uma estratégia ambiciosa de descarbonização.

Figura 57 - Emissões anuais do Porto do Itaquí no cenário otimista.

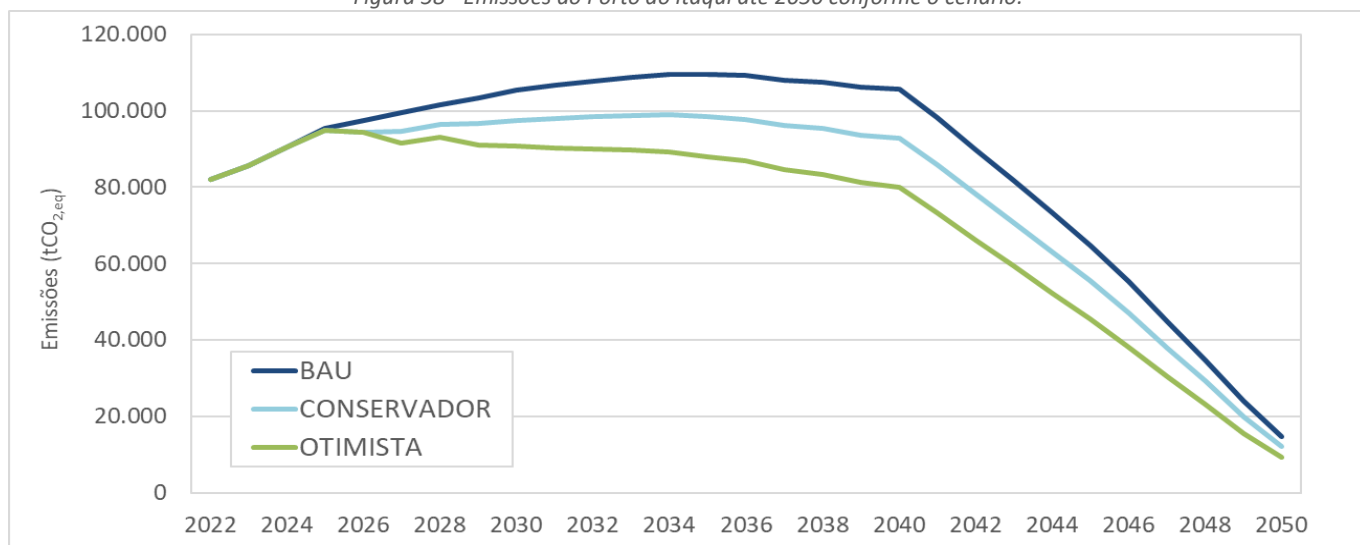


Fonte: Fundación Valenciaport.

6.7.3. Comparação de cenários

O gráfico a seguir mostra a evolução da pegada de carbono do Porto do Itaqui conforme o cenário Business as Usual, implementação de medidas nos cenários conservador e otimista. Observa-se que o cenário conservador consegue manter um nível de emissões constante, apesar do aumento da atividade, até 2040, ano a partir do qual ocorre uma redução significativa impulsionada pela descarbonização do setor marítimo. Por sua vez, o cenário otimista prevê reduções a partir de 2026, que também ganharão velocidade a partir de 2040.

Figura 58 - Emissões do Porto do Itaqui até 2050 conforme o cenário.



Fonte: Fundación Valenciaport.

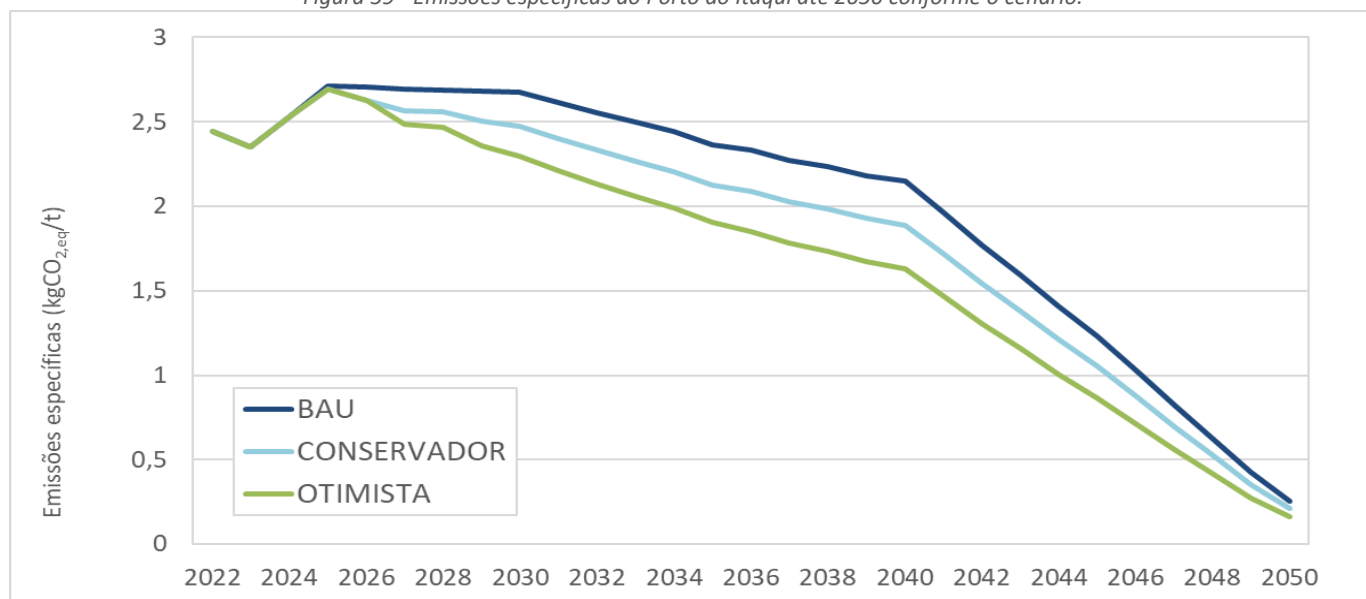
Tabela 14 - Redução de emissões do Porto do Itaqui por cenário.

Ano	% Redução CO ₂ (2022 referência)		
	Bau	Conservador	Otimista
2035	-33,2	-19,9	-7,2
2040	-28,7	-13,1	2,5
2045	21,0	32,3	44,4
2050	82,2	85,3	88,8

Fonte: Fundación Valenciaport

No cenário de manutenção das práticas atuais (BAU), observa-se uma tendência de estabilidade nas emissões, com início de declínio gradual a partir de 2030. Já nos cenários conservador e otimista, os declínios ocorrem de forma mais acelerada.

Figura 59 - Emissões específicas do Porto do Itaquí até 2050 conforme o cenário.



Fonte: Fundación Valenciaport.

6.7.4. VPL

Oito das ações resultam em VPL positivo, destacando-se aquelas voltadas a navios e rebocadores como as de melhor desempenho.

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma métrica financeira amplamente utilizada em análises de investimento para estimar a rentabilidade de uma ação ou projeto ao longo do tempo. No contexto do Plano de Descarbonização, o VPL representa o saldo entre os benefícios econômicos esperados (como economia de combustível, incentivos fiscais ou redução de custos operacionais) e os investimentos necessários, trazidos a valor presente com base em uma taxa de desconto definida. Um VPL positivo indica que a ação gera retorno superior ao seu custo de capital, sendo, portanto, financeiramente viável.

Neste estudo, oito das ações avaliadas apresentaram VPL positivo, com destaque para aquelas voltadas a navios e rebocadores, que se mostraram as mais eficientes do ponto de vista econômico e climático. Essas iniciativas aliam alto potencial de abatimento de emissões de GEE a viabilidade financeira, o que as posiciona como elementos-chave da estratégia de descarbonização do Porto do Itaquí.

Tabela 15 - VPL Positivo.

Escopo	Ação	Nome	VPL (MR\$)
Navios	N5 Otimista	Eletrificação de berços de granéis líquidos	R\$ 26,14
Rebocadores	R9	Grupo de trabalho para a descarbonização de rebocadores	R\$ 12,54
Navios	N5 Conservador	Eletrificação de berços de granéis líquidos	R\$ 8,74
Navios	N7	Sistema de prioridade de escala para navios com tecnologia de baixo carbono	R\$ 7,29
Rebocadores	R10	Fornecimento de eletricidade durante a espera	R\$ 5,45
Navios	N6	Desconto de tarifa para navios que usam combustíveis renováveis	R\$ 5,37
Rebocadores	R8	Programas de monitoramento de bioincrustação	R\$ 2,38
Terminais	T11	Criação da comunidade de colaboração	R\$ 0,50

Fonte: Fundación Valenciaport.

No cenário conservador, adotando uma taxa média de desconto de 8% ao ano, observa-se que oito ações apresentam Valor Presente Líquido (VPL) positivo, indicando viabilidade econômica e contribuição relevante para a estratégia de descarbonização. Essas ações estão representadas na Curva Marginal de Custo de Abatimento (MACC) da Figura 61, e concentram-se, majoritariamente, nos escopos de navios e rebocadores.

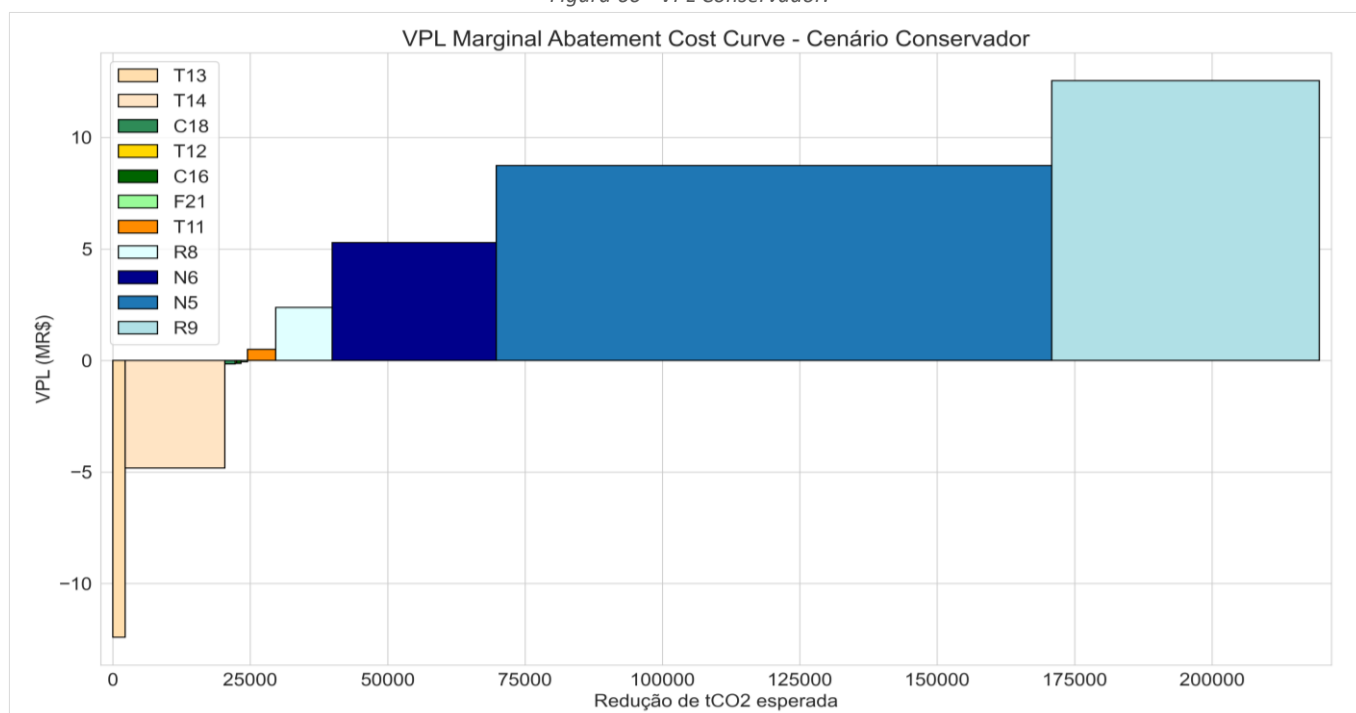
As três iniciativas com maior destaque nesse cenário são:

- N5 – Eletrificação de berços de granéis líquidos;
- R9 – Criação de grupo de trabalho para a descarbonização de rebocadores, com VPL de R\$ 12,54 milhões;
- N6 – Desconto de tarifa para navios que utilizam combustíveis renováveis, com VPL de R\$ 5,37 milhões.

Essas três ações concentram, de forma significativa, tanto o maior volume de redução potencial de emissões de CO₂ equivalente (tCO₂eq) quanto o maior retorno financeiro líquido estimado, o que as posiciona como prioritárias para implementação em curto e médio prazo.

Outras cinco ações também apresentam VPL positivo, embora com menor impacto individual, reforçando o papel de soluções complementares no portfólio de mitigação. A análise evidencia que os modais marítimos (navios e rebocadores) permanecem como os principais alvos estratégicos para a descarbonização, tanto pela sua participação na pegada de carbono quanto pela oportunidade de retorno financeiro sobre os investimentos.

Figura 60 - VPL Conservador.



Fonte: Fundación Valenciaport.

No cenário otimista, que considera uma maior eficiência na implementação das medidas e contextos favoráveis de mercado e regulamentação, observa-se um aumento expressivo tanto no potencial de redução de emissões de GEE quanto nos valores de retorno econômico (VPL) das ações avaliadas.

A Curva Marginal de Custo de Abatimento (MACC) da Figura 62 demonstra que, assim como no cenário conservador, as ações com maior impacto estão fortemente concentradas nos modais marítimos – navios e rebocadores.

As cinco ações com VPL positivo mais elevado neste cenário são:

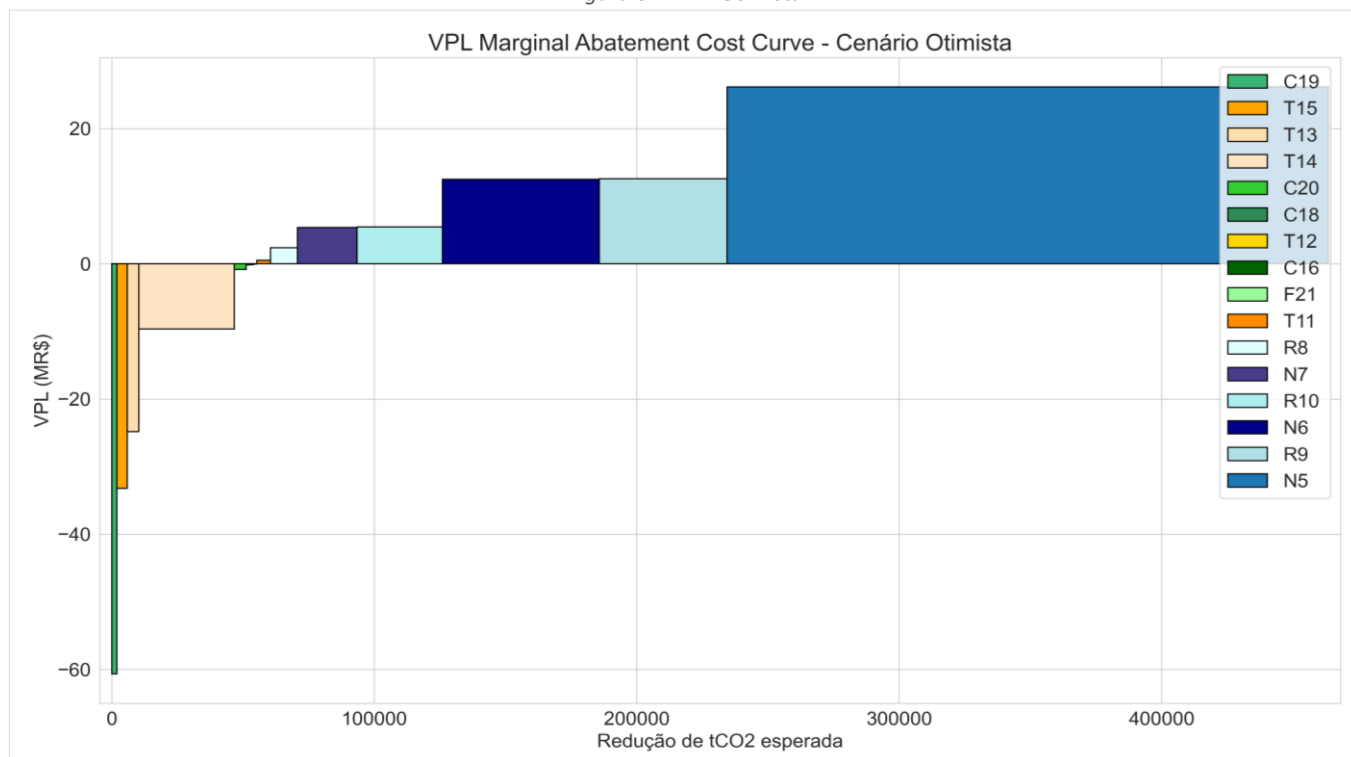
- N5 – Eletrificação de berços de graneis líquidos, com o maior VPL e potencial de abatimento de emissões entre todas as medidas avaliadas;
- R9 – Grupo de trabalho para descarbonização da frota de rebocadores;
- N6 – Desconto de tarifa para navios que utilizam combustíveis renováveis;
- R10 – Fornecimento de eletricidade durante a espera dos rebocadores;
- N7 – Sistema de prioridade de escala para navios com tecnologia de baixo carbono.

Essas ações se destacam por combinarem viabilidade econômica positiva com elevado potencial de mitigação de emissões (tCO₂eq), consolidando-se como as estratégias mais eficazes do portfólio técnico analisado.

Diferentemente do cenário conservador, o cenário otimista amplia o volume de abatimento esperado, ultrapassando 400 mil tCO₂eq — e melhora o desempenho financeiro de diversas ações, inclusive de iniciativas que no cenário anterior apresentavam retorno neutro ou negativo.

Essa análise reforça a importância de incentivos institucionais, marcos regulatórios e sinergias operacionais para viabilizar um ambiente mais propício à adoção dessas tecnologias, permitindo à autoridade portuária e seus operadores extrair valor máximo das estratégias de descarbonização.

Figura 61 - VPL Otimista.



Fonte: Fundación Valenciaport.

6.8. Compensação

Embora os esforços de descarbonização permitam reduzir significativamente as emissões do Porto do Itaqui, sempre haverá um remanescente de emissões de difícil eliminação, em função da natureza operacional de determinadas atividades portuárias. Para que o porto atinja a neutralidade climática e se torne uma infraestrutura com emissões líquidas zero até 2050, será necessário complementar as medidas de mitigação com ações de compensação.

Isso implica em investimentos em projetos capazes de evitar ou remover da atmosfera uma quantidade equivalente de Gases de Efeito Estufa (GEE) às emissões residuais.

De acordo com os cenários analisados, o custo anual estimado para compensação das emissões residuais em 2050 seria de aproximadamente R\$ 11,6 milhões no cenário conservador e R\$ 8,8 milhões no cenário otimista, considerando os resultados projetados de emissões residuais para cada cenário, conforme descrito nas seções anteriores, e um preço médio de R\$ 960 por crédito de carbono.

Recomenda-se iniciar a estratégia de compensação do Porto do Itaqui a partir de 2050 de forma gradual, atuando inicialmente como facilitador, passando a aglutinador e, eventualmente, estabelecendo um requisito para alcançar as emissões líquidas zero. A seguir, são indicadas as responsabilidades que a EMAP teria em cada fase:

Facilitador

- Criar e manter uma plataforma digital de acesso a créditos confiáveis.
- Selecionar e validar fornecedores/corretores de créditos certificados.
- Divulgar informações e conscientizar a comunidade portuária sobre a importância da compensação.

Aglutinador

- Criar e manter uma plataforma para compra e venda de créditos.
- Conectar usuários portuários a fornecedores/corretores confiáveis.
- Identificar necessidades de compensação e projetos disponíveis.
- Promover compras coletivas com condições vantajosas.
- Garantir a rastreabilidade e a verificação das transações.

Requisito de Emissões Líquidas Zero

- Estabelecer normas para a neutralidade de emissões no ecossistema portuário.
- Incluir requisitos de compensação em contratos, licenças e concessões.
- Implementar sistemas obrigatórios de monitoramento e verificação.
- Aplicar incentivos e sanções conforme o nível de cumprimento.
- Oferecer formação e apoio para medidas de redução e compensação.

7. Considerações finais

O plano de descarbonização do Porto do Itaqui representa um marco inédito no cenário portuário brasileiro, posicionando o complexo logístico como o primeiro porto público nacional a dispor de uma ferramenta de planejamento de descarbonização alinhada às exigências climáticas do século XXI.

Mais do que uma resposta às metas da IMO e aos compromissos do Brasil no contexto do Acordo de Paris, o plano estabelece as bases técnicas, operacionais e estratégicas para a redução progressiva das emissões de gases de efeito estufa em todos os modais e cadeias logísticas do porto. O plano apresenta soluções tecnológicas viáveis e

inovadoras, como a eletrificação de berços, potencial da energia solar, uso de biocombustíveis, hidrogênio verde e outras energias renováveis com alto potencial de redução de emissões.

A estratégia combina ações realistas de curto prazo com iniciativas estruturantes de longo prazo, promovendo transição energética gradual e segura em todos os modais e equipamentos portuários. A construção de uma comunidade colaborativa entre EMAP, operadores e transportadores garante maior adesão às metas, impulsionando uma governança integrada para sustentabilidade. Com base em análises econômicas robustas, 8 ações do plano apresentam VPL positivo, demonstrando que a descarbonização também é uma oportunidade de ganhos financeiros e competitividade.

Como consequência da descarbonização do setor marítimo, o peso de outras aplicações crescerá significativamente no porto de Itaquí, por isso é importante criar espaços de colaboração com toda a comunidade portuária. A descarbonização será liderada pela transição energética no setor marítimo, portanto, é muito importante que o porto de Itaquí se prepare para o fornecimento de combustíveis renováveis, a fim de aumentar a atratividade comercial do porto. Para a descarbonização total, será necessário levar em conta as ações de compensação, nas quais, em curto prazo, o EMAP deve desempenhar um papel de facilitador.

Este plano reforça o compromisso do Porto do Itaquí com um ecossistema logístico de baixo carbono, atraindo investimentos sustentáveis e consolidando sua liderança nacional em sustentabilidade portuária.

Referências

BlueBARGE – Plataforma de fornecimento de energia limpa para navios.

<https://bluebarga.eu/>

EMEP/EEA – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.

<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-d-navigation/view>

Fourth IMO Greenhouse Gas Study (2020) – Estudo de emissões de gases de efeito estufa no setor marítimo.

<https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

HDF Energy – Empresa de soluções em hidrogênio e energia renovável.

<https://hdf-energy.com/>

Hyster – Soluções de equipamentos elétricos e hidrogênio para movimentação de cargas.

<https://www.hyster.com/es-es/emea/carretillas-elevadoras-electricas-de-4-ruedas/j10-18xd/>

Interchange UK – Estratégias alternativas de combustíveis para o transporte.

<https://www.interchange-uk.com/news/stbs-launch-alternative-fuels-strategy-for-the-south-west>

Italgru – Guindastes móveis elétricos para portos.

<https://italgru.it/en/electric-port-cranes/mobile-harbour-cranes/imhc-2120-e>

JCB – Soluções de máquinas elétricas.

<https://tinyurl.com/58baaphj>

Kalmar – Equipamentos de movimentação elétrica de cargas.

https://www.kalmarglobal.com/news--insights/press_releases/2023/kalmar-hands-over-its-first-fully/

Konecranes – Soluções em guindastes e movimentação de cargas.

<https://www.marinelink.com/companies/konecranes-83436>

Liebherr – Guindastes portuários elétricos LPS 420 E.

<https://www.liebherr.com/es-int/gruas-maritimas/productos/equipamiento-de-puerto/gr%C3%BAas-p%C3%B3rtico/liebherr-portal-slewing-electric/lps-420-e-5391558>

OpenRailwayMap – Plataforma de visualização de redes ferroviárias.

<https://www.openrailwaymap.org/>

Port of Gothenburg – Projeto de fornecimento de energia (OPS) para navios-tanque.

<https://www.portofgothenburg.com/about/projects/ops-tankers/>

Porto do Itaqui – Planejamento e desenvolvimento de novos negócios.

<https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/planejamento-desenvolvimento/novos-negocios>

Science Based Targets initiative (2019) – Foundations of Science-based Target Setting.

<https://sciencebasedtargets.org/resources/files/foundations-of-SBT-setting.pdf>

Science Based Targets initiative (2023) – Science Based Target Setting for the Maritime Transport Sector.

<https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Maritime-Guidance.pdf>

Stillstrom – Soluções de fornecimento de energia offshore para navios fundeados.

<https://stillstrom.com/>

TEQUIMAR – Terminal Químico de Aratu (leilão de portos).

<https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/leilao-de-portos>

Terberg – Soluções de veículos de movimentação de cargas elétricos.

https://www.terbergtaylor.com/assets/TTA_PRODUCT_LINE.pdf

Union Pacific – Projeto de locomotiva híbrida para operações ferroviárias.

https://www.up.com/aboutup/community/inside_track/ztr-hybrid-locomotives-it-240429.htm

Volvo – Máquinas de construção elétricas Volvo CE.

<https://www.volvoce.com/espana/es-es/products/electric-machines/l120-electric/>

Anexo I – Detalhe das medidas propostas

Código	N1
Medida	Melhoria na coleta de dados das escalas
Descrição	Implantação de mecanismos padronizados e automáticos para coleta, consolidação e análise dos dados de escala dos navios que operam no Porto do Itaqui, incluindo horários de chegada e saída, tempos de espera, consumo de energia, uso de combustível, tipo de carga e características da embarcação.
Tipo de medida	Gestão de operações
Âmbito de aplicação	Navios
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0
Benefícios adicionais	• Melhoria da transparência e rastreabilidade das operações. • Tomada de decisão baseada em dados. • Base para criação de indicadores de eficiência energética e climática. • Facilita a implementação de incentivos ou penalidades relacionadas ao desempenho ambiental dos navios.
Orçamento (MR\$)	0,6
Horizonte temporal	1M26–2M26
Departamento responsável	Operações, Digitalização
Indicadores de acompanhamento	• % de escalas registradas com dados completos e confiáveis. • Número de variáveis-chave coletadas por escala.
Exemplos de implementação	Porto de Los Angeles, Porto de Antuérpia, Porto de Singapura

Código	N2
Medida	Implementação de um sistema de gestão das escalas
Descrição	Desenvolvimento e implementação de um sistema digital integrado que permita planejar, coordenar e otimizar as escalas dos navios no Porto do Itaqui. A ferramenta pode incorporar funcionalidades como programação Just-in-Time, notificações aos atores-chave e conexão com sistemas de comunidade portuária (PCS).
Tipo de medida	Gestão de operações
Âmbito de aplicação	Navios
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0
Benefícios adicionais	• Melhoria da eficiência operacional e redução de gargalos. • Diminuição das emissões associadas ao tempo de espera. • Redução dos custos operacionais para armadores e terminais. • Melhoria da transparência e da coordenação entre os atores portuários.
Orçamento (MR\$)	0,3
Horizonte temporal	2M26–1M27
Departamento responsável	Operações, Digitalização
Indicadores de acompanhamento	• % de escalas gerenciadas pelo sistema. • Redução média do tempo de espera dos navios. • Número de eventos Just-in-Time aplicados.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Los Angeles
Código	N3
Medida	Pesquisa de preparação da rede elétrica do Itaqui
Descrição	Realização de um estudo técnico para avaliar a capacidade atual da rede elétrica do porto e seu potencial de expansão para atender às futuras demandas energéticas, especialmente no contexto da eletrificação

	das operações portuárias, fornecimento de OPS (Onshore Power Supply), recarga de veículos elétricos e uso de energias renováveis.
Tipo de medida	Infraestrutura portuária
Âmbito de aplicação	Navios
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0
Benefícios adicionais	• Identificação de oportunidades para integrar energias renováveis ao sistema. • Melhoria da segurança energética do porto e sua resiliência. • Possibilita o planejamento adequado da eletrificação do porto.
Orçamento (MR\$)	2
Horizonte temporal	2M26–1M27
Departamento responsável	Infraestruturas
Indicadores de acompanhamento	• Identificação de pontos críticos e propostas de melhoria. • Número de projetos de eletrificação viabilizados a partir do estudo.
Exemplos de implementação	Porto de Santos, Porto de Valência, Porto de Hamburgo

Código	N4
Medida	Rede de média tensão (12 MW)
Descrição	Implementação de uma rede de média tensão (aproximadamente 12 MW de capacidade) dentro da área portuária para garantir o fornecimento elétrico necessário às futuras demandas associadas à eletrificação de berços, OPS (Onshore Power Supply) e outras operações.
Tipo de medida	Infraestrutura portuária
Âmbito de aplicação	Navios
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0
Benefícios adicionais	• Melhoria da capacidade energética do porto. • Redução dos custos operacionais de energia a longo prazo. • Aumento da resiliência energética frente a falhas ou sobrecargas.
Orçamento (MR\$)	35
Horizonte temporal	2M26–2M27
Departamento responsável	Infraestruturas
Indicadores de acompanhamento	• Capacidade instalada da rede elétrica (MW). • Número de pontos de conexão habilitados. • % da infraestrutura portuária alimentada pela nova rede. • Número de projetos elétricos conectados à rede.
Exemplos de implementação	Porto de Santos, Porto de Valência

Código	N5
Medida	Eletrificação de berços de granéis líquidos
Descrição	Instalação de sistemas de fornecimento elétrico nos berços destinados à operação de granéis líquidos, permitindo que os navios se conectem à rede elétrica terrestre durante a estadia no porto, evitando o uso de geradores auxiliares a bordo.
Tipo de medida	Infraestrutura portuária
Âmbito de aplicação	Navios
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	15,6
Benefícios adicionais	• Melhoria da qualidade do ar local. • Redução do ruído no entorno portuário. • Cumprimento de futuras normas internacionais. • Fortalecimento do posicionamento do porto como referência em sustentabilidade.
Orçamento (MR\$)	33,2
Horizonte temporal	1M27–2M28
Departamento responsável	Infraestruturas
Indicadores de acompanhamento	• Número de berços eletrificados. • % de escalas conectadas ao OPS. • Energia fornecida aos navios (MWh).
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Gotemburgo

Código	N6
Medida	Desconto de tarifa para navios que utilizam combustíveis renováveis.
Descrição	Implementação de um esquema de incentivos econômicos que concede descontos nas tarifas portuárias aos navios que operam com combustíveis renováveis ou de baixas emissões, como metanol verde, biocombustíveis avançados, hidrogênio, entre outros.
Tipo de medida	Incentivos ambientais
Âmbito de aplicação	Navios
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	3,5
Benefícios adicionais	• Atração de tráfegos marítimos com melhor desempenho ambiental. • Melhoria da imagem do porto como agente comprometido com a sustentabilidade. • Estímulo à inovação e ao uso de combustíveis alternativos no setor marítimo.
Orçamento (MR\$)	14
Horizonte temporal	1M27–2M40
Departamento responsável	Operações
Indicadores de acompanhamento	• Número de navios que acessam o incentivo. • % de escalas incentivadas que utilizam combustíveis renováveis. • Valor total de descontos concedidos.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Los Angeles

Código	N7
Medida	Sistema de prioridade de escala para navios de baixo carbono
Descrição	Desenvolvimento e implementação de um sistema que concede prioridade de atracação aos navios que utilizem combustíveis de baixas emissões ou tecnologias limpas.
Tipo de medida	Incentivos ambientais
Âmbito de aplicação	Navios
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	1,3
Benefícios adicionais	• Melhoria da eficiência nas operações portuárias. • Aceleração da adoção de tecnologias limpas no transporte marítimo. • Fortalecimento da imagem do porto como agente comprometido com a descarbonização.
Orçamento (MR\$)	0,24
Horizonte temporal	1M27–2M50
Departamento responsável	Operações
Indicadores de acompanhamento	• Tempo médio de espera vs. tempo médio de atracação para navios de baixas emissões. • Número de navios priorizados pelo desempenho ambiental.
Exemplos de implementação	Porto de Gotemburgo

Código	R8
Medida	Grupo de trabalho para a descarbonização de rebocadores
Descrição	Criação de um grupo de trabalho permanente entre a EMAP e as empresas de rebocadores, com o objetivo de definir estratégias e projetos para reduzir as emissões dos rebocadores que operam no Porto do Itaquí.
Tipo de medida	Combustíveis alternativos
Âmbito de aplicação	Rebocadores
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,55
Benefícios adicionais	• Fomento à colaboração público-privada para a transição energética. • Melhoria da competitividade e sustentabilidade dos serviços portuários.
Orçamento (MR\$)	0,78
Horizonte temporal	2M25–2M40
Departamento responsável	Meio Ambiente
Indicadores de acompanhamento	• Número de reuniões e propostas técnicas geradas pelo grupo. • Percentual da frota de rebocadores com tecnologias de baixas emissões. • Projetos-piloto implementados ou em desenvolvimento.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Los Angeles

Código	R9
Medida	Programas de monitoramento de bioincrustação
Descrição	Implementação de programas para monitorar a bioincrustação nos cascos dos rebocadores do Porto do Itaqui, com o objetivo de identificar aqueles com altos níveis de incrustação biológica que afetam a eficiência no consumo de combustível. O monitoramento pode incluir inspeções visuais, uso de sensores ou análise de dados de desempenho energético.
Tipo de medida	Gestão de operações
Âmbito de aplicação	Rebocadores
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	3,34
Benefícios adicionais	• Melhoria da eficiência energética dos rebocadores. • Geração de dados úteis para estudos ecológicos e para a gestão de espécies invasoras.
Orçamento (MR\$)	0,26
Horizonte temporal	2M26–2M27
Departamento responsável	Meio Ambiente / Operações
Indicadores de acompanhamento	• Número de rebocadores avaliados anualmente. • Percentual de rebocadores com bioincrustação crítica detectada. • Aplicação de medidas corretivas (limpeza, pintura antifouling, etc.).
Exemplos de implementação	Iniciativas-piloto em portos da Austrália e Nova Zelândia

Código	R10
Medida	Fornecimento de eletricidade durante a espera
Descrição	Instalação de pontos de fornecimento de eletricidade em berços ou áreas de atracação do Porto do Itaqui para permitir que os rebocadores se conectem à rede elétrica enquanto estão em espera entre manobras.
Tipo de medida	Infraestrutura portuária
Âmbito de aplicação	Rebocadores
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	1,59
Benefícios adicionais	• Redução das emissões locais e melhoria da qualidade do ar no entorno portuário. • Diminuição do ruído e das vibrações nas áreas operacionais. • Economia de combustível para os operadores de rebocadores. • Facilita a eletrificação progressiva da frota auxiliar portuária.
Orçamento (MR\$)	3,15
Horizonte temporal	1M27–2M27
Departamento responsável	Meio Ambiente
Indicadores de acompanhamento	• Número de rebocadores que utilizam o sistema de fornecimento elétrico. • Tempo médio de conexão por rebocador (h/ano). • Consumo de combustível fóssil evitado.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Hamburgo

Código	T11
Medida	Criação da comunidade de colaboração (Melhoria da coleta de dados, inventário, catálogo e capacitação)
Descrição	Estabelecimento de uma comunidade de colaboração entre a EMAP e as terminais, com o objetivo de melhorar a coleta de dados sobre emissões, consumos energéticos e operações portuárias. Essa comunidade também facilitará a construção conjunta do inventário de emissões, o desenvolvimento de um catálogo de medidas de descarbonização e a implementação de programas de formação e capacitação técnica para impulsionar a sustentabilidade portuária.
Tipo de medida	Gestão de operações
Âmbito de aplicação	Terminais
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,2
Benefícios adicionais	• Melhoria da qualidade e transparência dos dados do porto. • Promoção do alinhamento estratégico entre os principais atores. • Aumento da capacidade técnica do ecossistema portuário. • Facilitação do monitoramento, avaliação e melhoria contínua do plano de descarbonização.
Orçamento (MR\$)	1,3
Horizonte temporal	1M26–2M50
Departamento responsável	Meio Ambiente
Indicadores de acompanhamento	• Número de entidades participantes da comunidade. • Número de sessões de trabalho e atividades realizadas.
Exemplos de implementação	Porto de Valência, Porto de Amsterdã

Código	T12
Medida	Separação dos medidores de eletricidade de cada terminal/operador dos da EMAP
Descrição	Instalação de medidores de eletricidade separados para cada terminal e operador portuário dentro da área de gestão do Porto do Itaqui, permitindo um monitoramento preciso e específico do consumo energético de cada entidade.
Tipo de medida	Gestão de operações
Âmbito de aplicação	Terminais
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,01
Benefícios adicionais	• Melhoria do controle e da gestão do consumo energético de cada terminal. • Identificação de oportunidades de eficiência energética em nível de terminal. • Facilitação da implementação de incentivos para economia de energia. • Aumento da transparência e da responsabilidade no consumo energético.
Orçamento (MR\$)	0,2
Horizonte temporal	1M26–2M26
Departamento responsável	Infraestruturas
Indicadores de acompanhamento	• Número de terminais com medidores de eletricidade independentes. • % de consumo elétrico renovável utilizado por cada terminal.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Hamburgo

Código	T13
Medida	Incentivo ao uso de eletricidade renovável (com certificado)
Descrição	Implementação de um esquema de incentivos para os terminais que utilizarem eletricidade renovável certificada em suas operações. A EMAP oferecerá descontos em tarifas, acesso preferencial ou benefícios regulatórios para aquelas que utilizarem eletricidade proveniente de fontes renováveis, verificada por certificados de garantia de origem.
Tipo de medida	Incentivos ambientais
Âmbito de aplicação	Terminais
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,2
Benefícios adicionais	• Estímulo ao uso de energia limpa e contribuição para a descarbonização. • Alinhamento com os objetivos internacionais de combate às mudanças climáticas e redução de emissões. • Melhoria da competitividade do porto no contexto da sustentabilidade global.
Orçamento (MR\$)	57,5
Horizonte temporal	1M28–2M50
Departamento responsável	Meio Ambiente
Indicadores de acompanhamento	• Número de terminais que aderirem ao esquema de incentivos. • % de eletricidade renovável utilizada pelos terminais.
Exemplos de implementação	Porto de Amsterdã, Porto de Roterdã

Código	T14
Medida	Incentivos econômicos para operadores e terminais pelo uso de combustíveis de baixa emissão
Descrição	Implementação de um sistema de incentivos econômicos direcionado a operadores e terminais portuários que utilizem combustíveis de baixas emissões. Os incentivos podem incluir descontos em tarifas portuárias, redução de taxas pelo uso de combustíveis sustentáveis ou acesso prioritário a determinadas infraestruturas portuárias.
Tipo de medida	Incentivos ambientais
Âmbito de aplicação	Terminais
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	1,9
Benefícios adicionais	• Melhoria da qualidade do ar no entorno portuário. • Preparação para futuras regulamentações ambientais. • Reforço da reputação institucional e liderança ambiental. • Atração de terminais e operadores sustentáveis.
Orçamento (MR\$)	42
Horizonte temporal	1M30–2M50
Departamento responsável	Meio Ambiente
Indicadores de acompanhamento	• Número de operadores e terminais que adotam combustíveis sustentáveis. • % de combustíveis de baixa emissão utilizados pelos operadores e terminais. • Valor total dos incentivos econômicos concedidos pelo uso de combustíveis de baixa emissão.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Amsterdã

Código	T15
Medida	Instalación de ponto de recarga para caminhões
Descrição	Instalación de infraestrutura de recarga eléctrica nos terminais para os caminhões que operam dentro do Porto do Itaquí. A EMAP poderá atuar como facilitadora, por meio de incentivos, acordos de cooperação ou requisitos em contratos de concessão.
Tipo de medida	Infraestrutura portuária
Âmbito de aplicação	Terminais
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,2
Benefícios adicionais	• Melhoria da qualidade do ar no entorno portuário. • Fortalecimento da imagem ambiental do porto e dos terminais. • Apoio à política nacional de eletromobilidade. • Atração de terminais e operadores sustentáveis.
Orçamento (MR\$)	3,3
Horizonte temporal	1M28–2M28
Departamento responsável	Infraestrutura e Energia
Indicadores de acompanhamento	• Número de pontos de recarga instalados nos terminais. • Número de caminhões eléctricos circulando no porto. • % de terminais com infraestrutura de recarga eléctrica.
Exemplos de implementação	Porto de Los Angeles, Porto de Roterdã

Código	C16
Medida	Grupo de trabalho do transporte terrestre + setor agrícola
Descrição	Criação de um grupo de trabalho composto pela EMAP, operadores logísticos, empresas do setor agrícola e autoridades locais, com o objetivo de analisar e promover a transição para soluções de transporte terrestre mais sustentáveis para o deslocamento de mercadorias entre o porto e as zonas agrícolas.
Tipo de medida	Logística verde
Âmbito de aplicação	Caminhões
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,04
Benefícios adicionais	• Otimização das rotas logísticas, aumentando a eficiência. • Melhoria da qualidade do ar. • Estímulo à cooperação público-privada, alinhando-se a políticas de sustentabilidade.
Orçamento (MR\$)	0,78
Horizonte temporal	2M25–2M40
Departamento responsável	Logística e Transporte
Indicadores de acompanhamento	• Número de reuniões e projetos iniciados pelo grupo de trabalho. • Número de iniciativas sustentáveis implementadas. • Volume de mercadorias transportadas por meios de baixa emissão.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Suape

Código	C17
Medida	Estudo do hinterlândia e potencial de corredores verdes
Descrição	Realização de um estudo sobre o hinterlândia do Porto do Itaquí, com foco na identificação de oportunidades para o desenvolvimento de corredores verdes. Esse estudo analisará as rotas de transporte atuais e futuras, avaliando o potencial de integração de soluções sustentáveis, como a eletrificação de infraestruturas e o uso de combustíveis alternativos.
Tipo de medida	Logística verde
Âmbito de aplicação	Caminhões
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0
Benefícios adicionais	• Melhoria da eficiência logística. • Redução da poluição atmosférica. • Redução dos custos operacionais.
Orçamento (MR\$)	0,5
Horizonte temporal	2M26–2M27
Departamento responsável	Planejamento Estratégico
Indicadores de acompanhamento	• Identificação de rotas e corredores verdes com maior potencial de implementação. • Número de iniciativas sustentáveis identificadas e implementadas.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Hamburgo

Código	C18
Medida	Esquema de categorização e etiquetas verdes para caminhões
Descrição	Implementação de um sistema de categorização e etiquetagem verde para os caminhões que operam no porto, baseado em seu nível de emissões e no uso de tecnologias limpas. Esse sistema permitirá classificar os caminhões em diferentes categorias de acordo com seu impacto ambiental, facilitando a aplicação de incentivos e descontos para veículos de baixas emissões. Além disso, serão concedidas etiquetas verdes aos caminhões que utilizarem combustíveis alternativos ou tecnologias de baixo impacto, incentivando a transição para uma frota mais sustentável.
Tipo de medida	Logística verde
Âmbito de aplicação	Caminhões
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,1
Benefícios adicionais	• Estímulo ao uso de veículos de baixas emissões. • Melhoria da qualidade do ar. • Alinhamento com políticas de sustentabilidade.
Orçamento (MR\$)	1,35
Horizonte temporal	1M27–2M40
Departamento responsável	Meio Ambiente
Indicadores de acompanhamento	• Número de caminhões categorizados com etiquetas verdes. • % de caminhões de baixas emissões em comparação à frota total operativa.
Exemplos de implementação	Porto de Los Angeles, Porto de Roterdã

Código	C19
Medida	Acordo com empresa de energia para o fornecimento de combustível renovável no entorno portuário
Descrição	Celebração de um acordo entre a EMAP e uma empresa energética para o fornecimento e distribuição de combustíveis renováveis (como biodiesel, HVO, biogás, entre outros) no Porto do Itaqui. O objetivo é garantir que as operações dentro do porto, tanto no transporte terrestre quanto nas atividades portuárias, utilizem fontes de energia limpa, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo a transição para uma logística mais sustentável. O acordo pode também incluir a implantação de infraestrutura necessária para a distribuição desses combustíveis na área portuária.
Tipo de medida	Combustíveis alternativos
Âmbito de aplicação	Caminhões
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,1
Benefícios adicionais	• Impulso à infraestrutura de combustíveis renováveis no porto. • Cumprimento de possíveis regulamentações ambientais futuras. • Redução da poluição atmosférica. • Atração de operadores sustentáveis.
Orçamento (MR\$)	288
Horizonte temporal	1M27–2M30
Departamento responsável	Infraestrutura e Energia
Indicadores de acompanhamento	• Quantidade de combustível renovável fornecido ao porto. • Número de caminhões que utilizam combustíveis renováveis.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Los Angeles

Código	C20
Medida	Escritório de assistência às empresas de transporte
Descrição	Criação de um escritório técnico e de apoio dentro do Porto do Itaqui para assessorar e acompanhar as empresas de transporte que operam na área portuária em sua transição para modelos mais sustentáveis. Esse escritório oferecerá informações sobre regulamentações ambientais, acesso a incentivos ou financiamento para renovação de frotas, adoção de combustíveis alternativos, capacitação em boas práticas e suporte técnico para a implementação de soluções de baixo carbono.
Tipo de medida	Logística verde
Âmbito de aplicação	Caminhões
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,23
Benefícios adicionais	• Apoio à modernização da frota terrestre que opera no Porto do Itaqui. • Fomento à cooperação e fortalecimento das relações institucionais para a transição energética. • Redução da poluição atmosférica associada ao transporte terrestre. • Aumento da conformidade ambiental entre os operadores que acessam o porto.
Orçamento (MR\$)	5
Horizonte temporal	1M27–2M30
Departamento responsável	Meio Ambiente
Indicadores de acompanhamento	• Número de empresas atendidas pelo escritório • Número de iniciativas sustentáveis implementadas por operadores com apoio do escritório
Exemplos de implementação	Porto de Hamburgo, Porto de Los Angeles

Código	F21
Medida	Grupo de trabalho de logística e digitalização das operações ferroviárias
Descrição	Criação de um grupo de trabalho técnico composto pela EMAP, operadores ferroviários, terminais, empresas logísticas e entidades governamentais, com o objetivo de melhorar a eficiência do transporte ferroviário no Porto do Itaqui por meio de soluções logísticas avançadas e ferramentas de digitalização. O grupo abordará temas como o intercâmbio de dados em tempo real, a rastreabilidade das cargas, a coordenação de horários e o uso de plataformas digitais para otimizar a gestão ferroviária.
Tipo de medida	Logística verde
Âmbito de aplicação	Ferrovias
Potencial de redução de emissões/ano (kt CO₂)	0,06
Benefícios adicionais	• Aumento da eficiência e competitividade do transporte ferroviário de cargas. • Redução do tráfego rodoviário e das emissões associadas aos caminhões. • Maior integração do modal ferroviário nos processos logísticos portuários.
Orçamento (MR\$)	0,75
Horizonte temporal	1M26–2M40
Departamento responsável	Operações
Indicadores de acompanhamento	• Número de reuniões realizadas e ações implementadas pelo grupo de trabalho. • Aumento do volume de carga transportada por ferrovia.
Exemplos de implementação	Porto de Roterdã, Porto de Hamburgo

Anexo II - Estudo do potencial solar, necessidade de armazenamento e produção local de hidrogênio no Porto do Itaqui

1. Introdução

Contexto e objetivos do estudo

Como parte do Plano de Descarbonização proposto para o Porto do Itaqui, desenvolvido no âmbito da colaboração entre a EMAP e a Fundación Valenciaport, inclui-se o estudo sobre o potencial renovável do porto e a produção de combustíveis renováveis, em especial o hidrogênio verde. O estudo contribuirá para uma tomada de decisão informada sobre os investimentos necessários em infraestrutura energética, com o objetivo de reduzir a pegada de carbono do porto e melhorar sua competitividade em um ambiente internacional cada vez mais regulado em termos ambientais.

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Identificar as áreas dentro do porto com maior potencial para instalação de painéis solares;
- Quantificar a capacidade de geração de energia solar e definir os parâmetros técnicos para sua implementação (**Subtarefa 1**);
- Avaliar as necessidades de armazenamento de energia a curto e longo prazo para otimizar o uso da energia gerada (**Subtarefa 2**);
- Analisar o potencial de produção local de hidrogênio e propor soluções tecnológicas e de infraestrutura para seu armazenamento e uso, de acordo com as necessidades energéticas estabelecidas no presente Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui (**Subtarefa 3**).

Escopo

O escopo do presente estudo se concentra em três áreas-chave para a transição energética do Porto do Itaqui:

1. A avaliação do potencial solar;
2. A identificação das necessidades de armazenamento de energia;
3. O estudo da produção local de hidrogênio.

A primeira área foca em identificar e avaliar zonas dentro do porto adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos, com o objetivo de maximizar a geração de energia solar. A segunda trata da análise das tecnologias de armazenamento mais apropriadas, considerando soluções tanto de curto prazo (como baterias), quanto de longo prazo (como a produção de hidrogênio). A terceira área dedica-se ao estudo da viabilidade da produção de hidrogênio no próprio local, incluindo a localização de uma planta de eletrólise e a avaliação de sua capacidade com base em diferentes cenários de demanda.

Este estudo não se limitará à viabilidade técnica das soluções propostas, mas também analisará sua rentabilidade econômica e as condições de financiamento necessárias para sua implementação. As recomendações decorrentes estarão alinhadas com os objetivos de sustentabilidade do porto, bem como com as políticas energéticas e ambientais, tanto locais quanto internacionais.

A abordagem metodológica do estudo combinará técnicas qualitativas e quantitativas, integrando experiência técnica com uma análise rigorosa de dados. Primeiramente, será feita uma revisão abrangente da literatura e de estudos anteriores sobre geração solar, armazenamento de energia e produção de hidrogênio em portos similares, com o intuito de identificar boas práticas e lições aprendidas aplicáveis ao Porto do Itaquí.

Em seguida, será realizada uma avaliação do potencial solar utilizando ferramentas de análise geoespacial para identificar as áreas do porto com maior exposição solar. A geração de eletricidade será modelada com base em dados meteorológicos locais, considerando variações sazonais e diárias, e serão simulados perfis de potência que avaliem a eficiência de diferentes configurações tecnológicas, como orientação e inclinação dos painéis.

A análise das necessidades de armazenamento de energia basear-se-á na avaliação da capacidade de armazenamento necessária para equilibrar a geração e o consumo de energia no porto. Serão analisadas a viabilidade técnica e econômica de diversas tecnologias de armazenamento, tanto de curto quanto de longo prazo, e serão projetados diferentes cenários de armazenamento com base na demanda energética prevista e na variabilidade da geração solar.

Quanto à produção de hidrogênio, será identificada a localização ideal para uma planta de eletrólise dentro do porto e avaliada sua capacidade de produção, considerando diferentes cenários de demanda, como abastecimento de embarcações (bunkering) e operações portuárias. Será realizada uma análise de custos associada à instalação e operação da planta de hidrogênio, incluindo as tecnologias de armazenamento necessárias.

Por fim, será realizado um estudo econômico-financeiro, que incluirá a estimativa dos custos de investimento e operação para cada uma das soluções propostas. Serão avaliadas oportunidades de financiamento público e privado, bem como incentivos fiscais e subsídios disponíveis. Além disso, serão analisados o retorno sobre o investimento (ROI) e os prazos de amortização.

A validação e revisão dos resultados será feita em colaboração com especialistas e partes interessadas do Porto do Itaqui, ajustando as recomendações conforme as observações recebidas e as condições de mercado. O relatório final reunirá as conclusões, recomendações e um plano de ação detalhado para a implementação das soluções propostas.

2. Subtarefa 1: potencial solar

2.1. Metodologia

Este estudo tem como objetivo analisar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica no Porto do Itaqui e suas áreas de influência, considerando especificamente a viabilidade de instalação de sistemas solares sobre coberturas de edifícios administrativos, estacionamentos em processo de reforma e outras áreas sob gestão da Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP), inclusive fora do perímetro portuário, como o terminal de passageiros ou terrenos adjacentes.

Dada a elevada irradiância solar característica do estado do Maranhão e o compromisso do porto com a descarbonização e a sustentabilidade energética, esta análise busca identificar oportunidades concretas para o aproveitamento da energia solar como fonte limpa e estratégica para suprir suas operações.

Para estimar o potencial de geração solar nas áreas identificadas do Porto do Itaqui, foi adotada uma metodologia baseada na análise da superfície disponível, nos dados de irradiância solar média anual e na eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Primeiramente, foi feita uma estimativa preliminar das superfícies úteis em telhados de edifícios administrativos, estruturas de estacionamento e terrenos externos viáveis, com base em imagens de satélite e plantas do porto.

Em seguida, considerou-se a irradiância solar média em São Luís, que varia entre 3,03 (março) e 5,49 (agosto) kWh/m²/dia, com média anual de 4,366 kWh/m²/dia [1], bem como um rendimento médio do sistema entre 15% e 18% [2], levando em conta perdas por temperatura, orientação, sombreamento e conversão. Esses parâmetros permitem calcular a produção teórica anual de energia para cada tipo de área e avaliar sua contribuição potencial ao consumo elétrico do porto.

Figura 62 - Irradiação considerada para o Porto de Itaqui.

Daily Total Averages of the Direct Normal Irradiation for the State of MARANHÃO

(Wh/m².day)

Search: 81200

ID	Lon	Lat	Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
61200	-44.249	-2.5005	4355	3902	3487	3032	3105	3804	4679	4990	5496	5378	4722	4804	4863

Fonte: Fundación Valenciaport.

2.2. Identificação de áreas com potencial para painéis fotovoltaicos

A identificação de áreas adequadas para instalação de sistemas fotovoltaicos no Porto do Itaqui foi baseada em critérios de disponibilidade física, acessibilidade, orientação, ausência de sombreamento significativo e titularidade pública. Três categorias principais de espaços foram consideradas, todos sob gestão da EMAP ou vinculados ao Governo do Estado do Maranhão:

1. **Coberturas de edifícios administrativos:** superfícies planas ou levemente inclinadas, geralmente sem obstruções e com infraestrutura elétrica próxima. Foram priorizadas as coberturas dos edifícios da sede, salas técnicas e armazéns logísticos.
2. **Estacionamentos em processo de reforma:** a instalação de estruturas fotovoltaicas tipo carport sobre estacionamentos representa uma solução duplamente eficiente, pois além de gerar eletricidade renovável, também oferece sombra e conforto térmico aos veículos. As áreas selecionadas incluem estacionamentos para funcionários, visitantes e frotas de serviço, atualmente em processo de renovação ou expansão.
3. **Áreas fora da poligonal portuária:** zonas com potencial para abrigar plantas solares de maior escala, especialmente terrenos sem uso definido ou com baixa ocupação. Foram indicadas como áreas potenciais, a depender de decisão final da EMAP sobre a destinação concreta dos terrenos.

2.3. Proposta inicial: áreas internas

O procedimento de dimensionamento das áreas seguiu um processo sequencial. Primeiramente, foi determinada a área disponível em zonas sob controle direto da EMAP. Essas áreas foram classificadas como tipologias 1 e 2 e definem o espaço disponível para a geração fotovoltaica instalável a curto prazo.

Figura 63 - Áreas disponíveis para instalação de painéis fotovoltaicos em zonas controladas pela EMAP.



Fonte: Fundación Valenciaport.

Após a análise detalhada das infraestruturas e superfícies disponíveis no recinto do Porto do Itaqui, foi determinado que a área potencialmente aproveitável para a instalação de painéis fotovoltaicos soma **14.810 m²**. Essa superfície está dividida entre **7.320 m²** de coberturas de edifícios administrativos e logísticos, e **7.490 m²** em áreas de estacionamento atualmente em renovação.

Para refletir com maior precisão a fração efetivamente utilizável, foram aplicados fatores de adequação de 80% para as coberturas (considerando obstáculos, inclinação ou zonas inacessíveis) e 90% para os estacionamentos (em razão da disposição estrutural e do espaçamento entre fileiras). Como resultado, a superfície útil líquida estimada para a instalação de painéis solares é de **12.597 m²**, que representa a base para o dimensionamento da planta fotovoltaica dentro do perímetro portuário.

Tabela 16 - Superfícies identificadas no terreno da EMAP.

		Extensão (m ²)	Fator	Superfície (m ²)
Edifícios	Edifício EMAP 1	2620	0,8	2096
	Edifício EMAP 2	1700	0,8	1360
	Edifício EMAP 3	600	0,8	480
	Edifício EMAP 4	1000	0,8	800
	Edifício EMAP 5	1400	0,8	1120
Parques	Parque 1	1240	0,9	1116
	Parque 2	5400	0,9	4860
	Parque 3	850	0,9	765
Total		14810		12597

Fonte: Fundación Valenciaport.

Para dimensionar a instalação fotovoltaica mais adequada ao espaço disponível no Porto do Itaqui, foram analisados diferentes modelos comerciais de painéis solares de alta eficiência disponíveis atualmente no mercado brasileiro. Especificamente, foram comparados três módulos representativos da tecnologia monocristalina PERC de **550 Wp**: *Tensite EM550-PH*, *Jinko Solar Tiger Pro 550W* e *Canadian Solar HiKu6 CS6W-550MS*. As características técnicas desses equipamentos estão disponíveis em [3], [4] e [5].

Todos os modelos selecionados utilizam células “half-cut”, que melhoram o desempenho em condições de sombreamento parcial, reduzem perdas por resistência e aumentam a confiabilidade do sistema. Além disso, apresentam eficiências superiores a 21%, o que os torna especialmente adequados para espaços limitados, como telhados e estacionamentos.

As dimensões e pesos dos três modelos são semelhantes, o que facilita a padronização da montagem. Para uma superfície útil de 12.597 m², assumindo uma densidade típica de instalação de 0,53 kWp/m², a potência fotovoltaica máxima instalável seria de aproximadamente **6,7 MWp**. Isso se traduz na necessidade de aproximadamente **12.138 módulos de 550 Wp**, independentemente do modelo, já que todos possuem a mesma potência unitária.

A escolha final do módulo dependerá de fatores adicionais como disponibilidade local, condições comerciais, garantias e compatibilidade com os sistemas de montagem e inversores. De qualquer forma, todos os modelos analisados são tecnicamente adequados para o ambiente portuário, com conformidade com padrões internacionais de qualidade e ampla aplicação em instalações industriais de grande porte.

Com isso, considerando uma irradiância solar média anual no Porto de Itaqui de 4.366 kWh/m²/dia e um rendimento global do sistema fotovoltaico estimado entre 15% e 18%, a produção anual esperada para a superfície útil disponível situa-se na faixa entre 3.011.168 kWh/ano e 3.613.402 kWh/ano.

Esse valor supera o consumo anual da EMAP (2.601.926,13 kWh no ano de 2022), de modo que o excedente de energia estaria disponível para atender consumos alternativos, sejam eles dos terminais ou para fornecer serviços de OPS, quando estes se tornarem uma realidade no Porto de Itaqui.

Para garantir o desempenho ideal, a segurança e a durabilidade do sistema fotovoltaico projetado no Porto de Itaqui, recomenda-se seguir uma série de boas práticas técnicas, alinhadas com normas nacionais e internacionais. Em primeiro lugar, deve-se realizar um estudo detalhado de sombreamento e obstáculos, especialmente em coberturas com equipamentos, guarda-corpos ou estruturas auxiliares, a fim de otimizar a distribuição dos módulos e minimizar perdas por sombreamento parcial.

A orientação recomendada para São Luís é voltada para o norte geográfico, com inclinação próxima à latitude local (~2,5°), embora configurações coplanares em coberturas planas também possam ser viáveis caso a densidade energética seja prioritária.

Além disso, toda a instalação deve contar com projetos aprovados por um engenheiro eletricista registrado no CREA e cumprir com os procedimentos de acesso da distribuidora local (Equatorial Maranhão), conforme a Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023 sobre micro e minigeração distribuída.

No ambiente portuário, também se recomenda coordenar com as autoridades de segurança operacional (ANVISA, Receita Federal, Marinha do Brasil) caso haja interferência em áreas sensíveis ou protegidas.

Por fim, aconselha-se integrar um sistema de monitoramento remoto em tempo real para garantir o acompanhamento do desempenho, a detecção precoce de falhas e o planejamento eficiente das atividades de manutenção preventiva.

2.4. Abordagem ampliada: áreas externas à poligonal portuária

Após a análise da superfície disponível dentro do recinto do Porto de Itaqui, estimou-se que é possível instalar um sistema fotovoltaico de aproximadamente 6,7 MWp sobre um total de 12.597 m² úteis, distribuídos entre coberturas de edifícios e áreas de estacionamento. No entanto, essa capacidade representa apenas uma fração do

potencial técnico de injeção que a infraestrutura elétrica existente permite — em especial, a subestação equipada com uma cela modular de média tensão Schneider Electric SM6, configurada para operar a 13,8 kV com corrente nominal de 630 A.

Por isso, este estudo propõe, como etapa inicial, a maximização da geração fotovoltaica até o limite da capacidade da rede interna de distribuição do Porto de Itaquí.

A estratégia consiste em combinar as superfícies internas já identificadas com novas áreas externas complementares que possibilitem atingir essa capacidade sem a necessidade de modificar a infraestrutura existente de média tensão. Essa abordagem de projeto não apenas maximiza o uso dos ativos já disponíveis, como também otimiza o retorno energético e econômico do sistema, ao distribuir os custos fixos de infraestrutura sobre um maior volume de geração renovável — sem implicar alterações na rede elétrica do porto que exigiriam investimentos de ordem superior.

Figura 64 - Painel de média tensão da EMAP [6].



Fonte: Fundación Valenciaport.

A capacidade máxima de injeção de energia por meio dessa cela foi calculada a partir de sua potência aparente trifásica, utilizando a seguinte expressão:

$$S = \sqrt{3} * V * I_n = \sqrt{3} * 13.800 * 630 = 15,05 \text{ MVA}$$

Considerando um fator de potência típico de 0,95 em sistemas fotovoltaicos modernos, a potência ativa efetiva que pode ser evacuada sem sobrecarregar a cela é de:

$$P = S * \cos(\varphi) = 15,05 * 0,95 = 14.3 \text{ MW}$$

Este valor é adotado como limite superior de projeto para a instalação fotovoltaica total do Porto de Itaqui, considerando que todas as unidades estejam conectadas à rede de média tensão.

Portanto, subtraindo a potência já gerada pelas instalações internas, restam disponíveis 7,6 MWp.

Para atender a esses 7,6 MWp remanescentes, seria necessária uma superfície útil estimada de aproximadamente **14.340 m²**, assumindo uma densidade típica de instalação de 0,53 kWp/m², como nas instalações internas. Essas áreas externas deverão atender a uma série de requisitos técnicos, operacionais e jurídicos, entre os quais se destacam:

1. **Titularidade pública ou disponibilidade de uso:** terão prioridade os terrenos pertencentes ao Governo do Estado do Maranhão ou sob gestão da EMAP, localizados em áreas adjacentes ao porto, como antigos espaços logísticos, pátios ferroviários em desuso ou regiões próximas ao terminal de passageiros.
2. **Proximidade da infraestrutura elétrica do porto:** com o objetivo de minimizar perdas por distância e facilitar a conexão ao ponto comum de entrega na subestação SM6, recomenda-se que a usina externa esteja localizada a uma distância, no máximo, 1,5 a 2 km do centro de carga.
3. **Condições topográficas e de irradiação:** os terrenos devem apresentar baixa declividade, ausência de sombreamento, acesso viável para máquinas de instalação e baixa suscetibilidade a inundações, comuns em algumas áreas do entorno portuário.
4. **Viabilidade de conexão:** será necessário projetar uma conexão em média tensão — preferencialmente aérea ou subterrânea, conforme viabilidade técnica — até a cela disponível na subestação existente, com dimensionamento adequado das proteções e seccionamentos, conforme a norma NBR 14039 (instalações elétricas em média tensão).

Com isso, o espaço requerido para a maximização, sob o ponto de vista técnico, da infraestrutura de distribuição do Porto de Itaqui está apresentado a seguir.

Tabela 17 - Superfícies necessárias para a geração fotovoltaica.

		Extensão (m²)	Fator	Superfície (m²)
Edifícios	Edifício EMAP 1	2620	0,8	2096
	Edifício EMAP 2	1700	0,8	1360
	Edifício EMAP 3	600	0,8	480
	Edifício EMAP 4	1000	0,8	800
	Edifício EMAP 5	1400	0,8	1120
Parques	Parque 1	1240	0,9	1116
	Parque 2	5400	0,9	4860
	Parque 3	850	0,9	765
Total		14810		12597
Áreas fora da poligonal		15933	0,9	14340
Total		30743		26937

Fonte: Fundación Valenciaport.

A tabela a seguir apresenta um resumo das características técnicas das instalações previstas.

Tabela 18 - Características técnicas das instalações previstas.

Parâmetro	Instalação interna	Instalação externa
Superfície disponível efetiva (m²)	12.597	14.340
Potência máxima instalada (kWp)	6.676,4	7.600,2
Número de módulos (550 W)	12.138	13.818
Produção anual mínima estimada (kWh)	3.011.168	3.427.812
Produção anual máxima estimada (kWh)	3.613.402	4.113.375

Fonte: Fundación Valenciaport.

A produção máxima estimada é de **7.726.777 kWh por ano**.

2.5. Considerações econômicas

Esta seção apresenta uma avaliação econômico-financeira do sistema fotovoltaico projetado para o Porto de Itaquí, considerando uma potência total prevista distribuída em três modalidades construtivas: instalações sobre coberturas de edifícios, estruturas tipo *carport* em estacionamentos e uma usina solar externa instalada em solo, em terrenos adjacentes ao porto.

A análise baseia-se em dados atualizados do mercado brasileiro e, em especial, incorpora o valor da tarifa de energia elétrica aplicável a consumidores industriais — referência mais realista para estimar os benefícios econômicos do projeto dentro do contexto operacional do porto.

Tabela 19 - Componentes do custo da eletricidade estimáveis para o Porto de Itaqui.

Componente	Percentual estimado	Valor em R\$/kWh	Referência
Tarifa de Energia (TE)	40 % – 50 %	R\$ 0,284 – 0,355	[7]
TUSD – Distribuição/Transmissão	30 % – 35 %	R\$ 0,213 – 0,249	[8]
Impostos e encargos	15 % – 25 %	R\$ 0,107 – 0,178	[9], [10]

Fonte: Fundación Valenciaport.

A análise baseia-se em um preço de referência de **R\$ 0,711/kWh**, representativo do custo real pago por consumidores industriais de alta tensão no Maranhão, incluindo geração, distribuição e componentes regulados.

2.6. Investimento inicial

O investimento inicial constitui um dos fatores críticos para determinar a viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico. Neste caso, foi realizado um detalhamento considerando as diferenças substanciais nos custos de instalação entre as três tipologias previstas. Essa metodologia permite não apenas aprimorar os cálculos, como também viabilizar uma possível implementação por fases.

A primeira categoria corresponde à instalação sobre coberturas de edifícios administrativos e logísticos dentro do recinto portuário. Essa modalidade aproveita espaços já existentes, minimizando o impacto físico e urbanístico, e permite integração direta com os consumos elétricos locais. Estima-se uma área útil de 7.320 m², permitindo a instalação de aproximadamente 3.883 kWp.

O custo por kWp instalado em coberturas industriais geralmente é menor do que em outras modalidades, mas neste caso foram consideradas particularidades técnicas (impermeabilização, acesso, estrutura de suporte), assumindo-se um intervalo de preços entre **R\$ 4.600 e R\$ 5.800/kWp**, o que resulta em um investimento total entre **R\$ 17,8 milhões e R\$ 22,5 milhões**.

A segunda modalidade considera a instalação de painéis em áreas de estacionamento, por meio de estruturas metálicas tipo *carport*. Além de gerar energia, essa solução proporciona sombra e conforto térmico a veículos e pessoas, melhorando a operação no local.

A superfície identificada é de 7.490 m², com potencial para 3.970 kWp. Como essas estruturas exigem fundações reforçadas e maior altura, o custo por kWp é estimado entre **R\$ 4.800 e R\$ 6.000**, resultando em um investimento de **R\$ 19,1 milhões a R\$ 23,8 milhões**.

Por fim, o componente de maior porte será uma usina terrestre instalada em solo, em terrenos externos ao porto, com potência estimada de 7.600 kWp, distribuída em 14.340 m² úteis. Essa instalação é considerada necessária para atingir o limite máximo de capacidade de injeção permitido pela subestação de média tensão existente.

Essa modalidade envolve custos adicionais com adequação do terreno (nivelamento, drenagem, acessos) e com a construção de uma linha de média tensão que conecte a usina à subestação interna. Por isso, o custo estimado por kWp é mais elevado, entre **R\$ 5.000 e R\$ 6.500**, resultando em um investimento projetado entre **R\$ 38,0 milhões e R\$ 49,4 milhões**.

No total, o **investimento estimado** para o sistema situa-se entre **R\$ 74,9 milhões e R\$ 95,7 milhões**, a depender das soluções técnicas adotadas e das condições comerciais na contratação.

Tabela 20 - Custo por tipo de instalação.

Tipo de instalação	Potência (kWp)	Custo por kWp (R\$)	Investimento estimado (R\$)
Coberturas (telhados)	3.883	4.600 – 5.800	17.846.000 – 22.521.400
Estacionamentos (<i>carports</i>)	3.970	4.800 – 6.000	19.056.000 – 23.820.000
Solo (externo) [11]	7.600	5.000 – 6.500	38.000.000 – 49.400.000
TOTAL	14.276		74.902.000 – 95.741.400

Fonte: Fundación Valenciaport.

2.7. Economia anual estimada

A principal vantagem econômica de uma instalação fotovoltaica está na economia gerada ao evitar a compra de eletricidade da rede. Neste caso, o preço médio considerado é de **R\$ 0,711/kWh**, valor representativo do custo real pago por consumidores industriais, conforme explicado anteriormente.

Com base nesse dado, a economia anual estimada proveniente da autoprodução de energia elétrica varia entre **R\$ 4.578.032 e R\$ 5.491.633**, dependendo do volume de energia gerado. Essa economia impacta diretamente na fatura energética do porto, reduzindo os custos operacionais fixos e liberando recursos para outros investimentos ou melhorias logísticas.

Além disso, contribui para mitigar a exposição à volatilidade das tarifas de energia elétrica — um risco relevante em ambientes industriais e em infraestruturas críticas como os portos.

É importante também considerar vantagens que, embora não diretamente quantificáveis, agregam valor ao projeto. Destacam-se a independência energética proporcionada por uma instalação própria, que fortalece a resiliência operacional da infraestrutura, bem como os benefícios sociais associados à maior disponibilidade de energia para usos alternativos.

2.8. Período de retorno do investimento (ROI)

A análise de rentabilidade no longo prazo baseia-se no cálculo do Retorno sobre o Investimento (ROI), que indica quantos anos são necessários para recuperar o valor investido por meio das economias geradas. Com base nos valores apresentados anteriormente, o período de retorno do sistema completo varia entre **13,6 anos** no cenário

mais favorável (menor investimento e maior produção) e **20,9 anos** no cenário mais conservador (maior investimento e menor produção).

Esses resultados indicam que o sistema é economicamente viável mesmo sem incentivos fiscais, e que poderá ser totalmente amortizado dentro de sua vida útil estimada de 25 anos. A partir do ano de retorno, o sistema passa a gerar benefícios líquidos para a autoridade portuária.

2.9. Custos de manutenção

As condições ambientais específicas do Porto de Itaqui exigem um enfoque mais intensivo quanto à manutenção do sistema. A presença constante de poeira em suspensão, típica das operações logísticas com granéis, associada à salinidade do ambiente costeiro, pode acelerar a sujeira nos módulos e comprometer a eficiência de conversão se não houver protocolos regulares de limpeza.

Por isso, o estudo considera um custo de manutenção anual equivalente a **2% do investimento inicial**, valor ligeiramente acima das referências médias do setor, que geralmente variam entre 1% e 1,5%.

2.10. Perfis anuais de geração com granularidade horária

O objetivo desta seção é obter o perfil horário de geração elétrica de uma usina fotovoltaica instalada no Porto de Itaqui, a fim de avaliar a distribuição temporal da produção de energia, seu comportamento sazonal e fornecer subsídios para estudos econômicos, modelagem de autoconsumo e análise de impacto na rede elétrica.

Para isso, foi utilizado o sistema de modelagem **Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)** [12], desenvolvido pelo Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia (JRC). Essa ferramenta fornece estimativas horárias de produção energética para sistemas fotovoltaicos, com base em bancos de dados climatológicos satelitais e modelos físicos validados para diversas regiões do mundo. Trata-se de uma aplicação online de acesso público e gratuito.

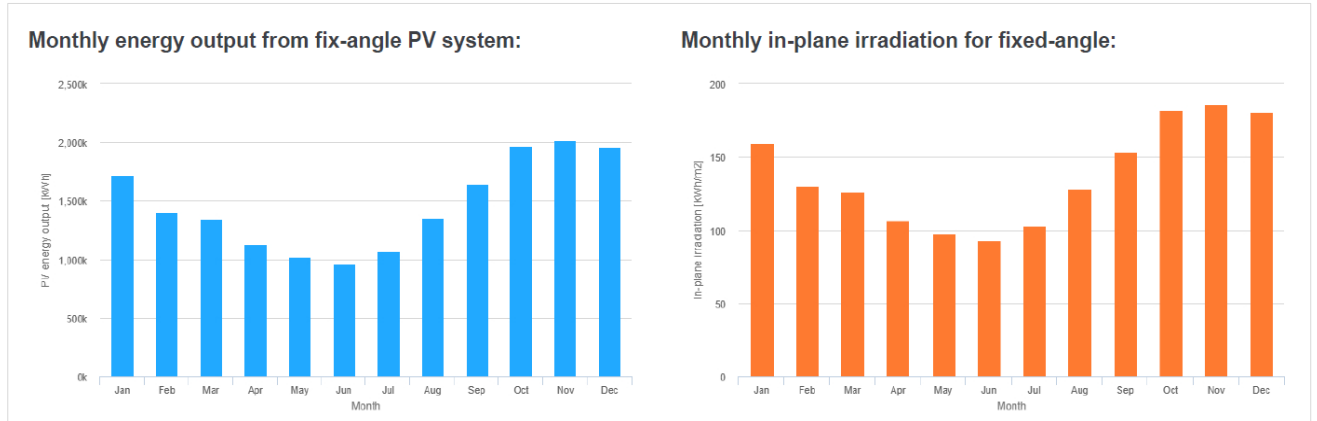
O PVGIS permite estimar a produção horária para uma localização geográfica específica, considerando variáveis como radiação solar, inclinação e orientação dos módulos, perdas do sistema e temperatura ambiente.

Tabela 21 - Parâmetros de entrada no PVGIS.

Parâmetro	Valor utilizado
Localização	Porto de Itaqui, São Luís, Maranhão (Brasil)
Coordenadas	Latitude -2,5692°, Longitude -44,3658°
Potência nominal instalada	14,3 MWp (para fins de análise, escalado para 1 kWp)
Inclinação do sistema	15°
Orientação (azimute)	0° (orientação para o norte — ideal para o Brasil)
Perdas do sistema	14% (considerando temperatura, sujeira, cabeamento etc.)
Período selecionado	Ano meteorológico típico (TMY – <i>Typical Meteorological Year</i>)
Saída desejada	Perfil horário (8.760 dados anuais)

Fonte: Fundación Valenciaport.

Figura 65 - Produção e irradiação solar mensal calculadas pelo software PVGIS.



Fonte: Fundación Valenciaport.

A seguir, são apresentados os perfis de geração normalizada, ou seja, em termos de Wh por kWp, como referência para o primeiro dia do ano, a primeira semana de agosto e, por fim, o perfil completo de geração ao longo do ano.

Figura 66 - Perfil horário de geração diária (janeiro).

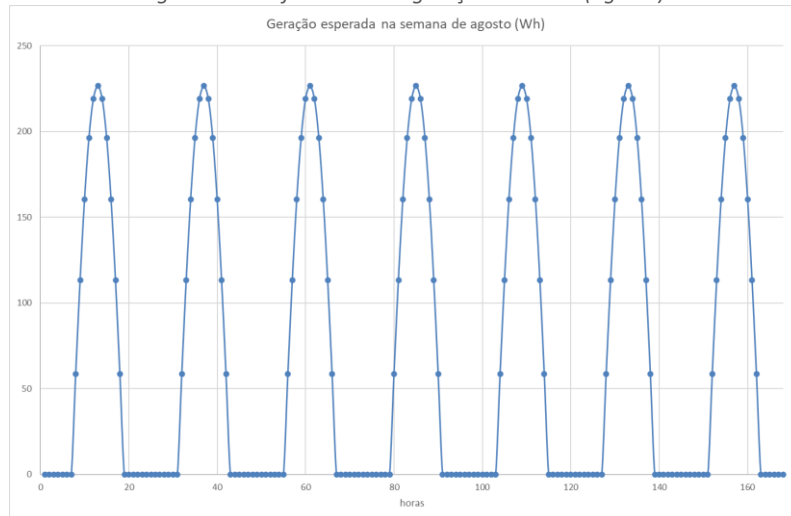
Geração prevista para 1º de janeiro do ano padrão (Wh)



Fonte: Fundación Valenciaport.

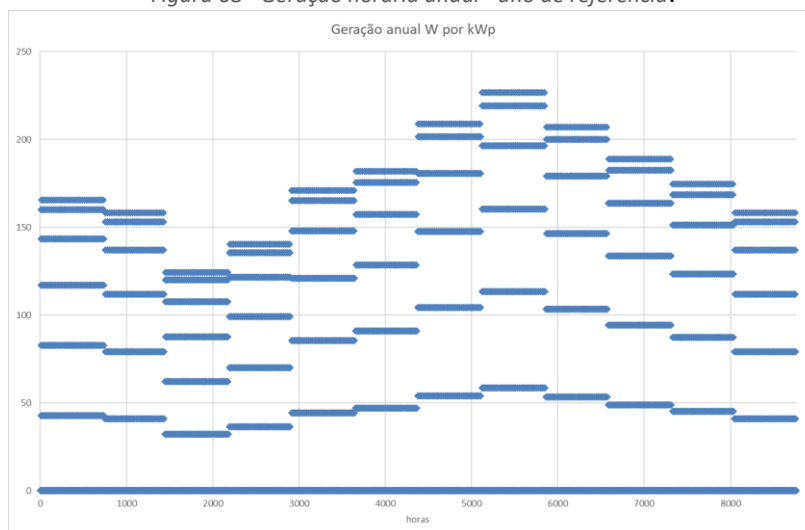
Figura 67 - Perfil horário de geração semanal (agosto).

Geração esperada na semana de agosto (Wh)



Fonte: Fundación Valenciaport.

Figura 68 - Geração horária anual - ano de referência.



Fonte: Fundación Valenciaport.

A análise horária da geração fotovoltaica correspondente ao Porto de Itaqui permite concluir que o sistema projetado apresenta uma produção bem distribuída ao longo do ano, com sazonalidade moderada e um padrão diário típico de regiões tropicais úmidas — caracterizado por amanheceres gradativos, picos de geração entre 11h e 14h, e queda suave ao final da tarde.

A variabilidade mensal acompanha as oscilações da radiação solar, sendo agosto e setembro os meses mais produtivos, enquanto março e abril apresentam os menores volumes de geração, o que está alinhado com os ciclos regionais de nebulosidade e precipitação.

Como a geração é nula durante o período noturno e 100% concentrada nas horas solares, para maximizar o autoconsumo ou gerenciar excedentes, recomenda-se estudar medidas complementares como:

- sistemas de armazenamento de energia,
- ajuste de perfis de carga, ou
- estratégias de gestão da demanda.

De forma integrada, o perfil horário obtido representa uma ferramenta essencial para o dimensionamento elétrico, avaliação econômica e integração eficaz do sistema fotovoltaico à operação energética do porto.

3. Subtarefa 2: necessidade de armazenamento

3.1. Avaliação das necessidades de armazenamento energético

Durante o ano de 2022, a EMAP registrou um consumo energético total de 2,6 GWh, segundo dados fornecidos pela administração portuária. Este valor corresponde ao conjunto de instalações operacionais e administrativas do recinto atendidas pela EMAP.

Esse volume de consumo permite estabelecer uma primeira aproximação da magnitude energética do complexo, que pode ser considerada moderada em termos industriais, o que abre caminho para uma estratégia de cobertura parcial ou até mesmo total por meio de fontes de geração renovável.

O sistema fotovoltaico proposto para instalação no porto, com potência total de 14,3 MWp, foi modelado com dados climáticos específicos do local utilizando o software PVGIS. Com base nesse modelo, foi estimada uma produção anual entre 6.438.848 e 7.726.618 kWh, dependendo do rendimento efetivo do sistema (intervalo estimado entre 15 % e 18 %).

A comparação direta entre a produção estimada e o consumo registrado permite extrair algumas conclusões-chave:

- A planta projetada geraria entre 2,47 e 2,97 vezes o consumo atual do porto.
- Isso implica um superávit energético significativo, o que exigirá avaliar cuidadosamente os cenários de gestão dos excedentes.
- Sob um esquema de autoconsumo direto, a instalação poderia cobrir 100 % da demanda atual gerida pela EMAP, inclusive nos meses de menor irradiação solar.

Este resultado destaca o enorme potencial de autossuficiência energética da EMAP, com possibilidade de contribuir para o abastecimento complementar do porto, reforçando a viabilidade técnica e ambiental do projeto fotovoltaico — desde que se adote uma arquitetura de rede flexível e se considere a possível evolução da demanda energética futura, como crescimento operacional, eletrificação de equipamentos, implantação de sistemas de refrigeração e eletrificação de frotas.

O dimensionamento da planta fotovoltaica proposto neste estudo, com potência instalada de 14,3 MWp, permitirá gerar uma quantidade de energia anual significativamente superior às necessidades atuais do recinto portuário. Em comparação com o consumo registrado em 2022, de 2,6 GWh, a instalação solar terá capacidade de gerar entre 6,4 e 7,7 GWh/ano, dependendo das condições operacionais e do desempenho efetivo do sistema.

Isso significa que, mesmo em um cenário conservador, a geração será mais do que o dobro do consumo atual, o que exige uma análise criteriosa sobre como gerenciar os excedentes de energia que não forem diretamente consumidos pelas cargas internas do porto.

No primeiro cenário, considera-se um modelo híbrido baseado no autoconsumo instantâneo, com a possibilidade de injetar os excedentes na rede pública. Essa estratégia está em conformidade com diversas normas brasileiras de geração distribuída, sendo viável mediante acordo técnico-comercial com a distribuidora local, Equatorial Maranhão.

Nesse modelo, toda a produção é conectada à rede interna do porto; a energia é consumida em tempo real e o excedente é exportado via subestação ou outro ponto habilitado, conforme o projeto de evacuação. Essa solução exige compatibilidade técnica, sistema de medição bidirecional e proteções específicas para evitar vertimento não controlado ou formação de ilhas elétricas. Embora seja tecnicamente viável e operacionalmente simples, sua eficiência econômica dependerá do modelo de compensação e dos custos pelo uso da rede.

A segunda alternativa consiste no armazenamento local dos excedentes por meio de baterias industriais. Nesse caso, a energia não consumida durante o dia é armazenada para uso posterior, como durante a noite ou em picos de demanda. Essa estratégia aumenta o índice de autoconsumo, reforça a autossuficiência energética e reduz a dependência da rede externa, mas apresenta maiores exigências técnicas e financeiras.

Seria necessário um dimensionamento preciso da capacidade de armazenamento com base no perfil de geração e consumo horário, além de espaço físico adequado, protocolos de operação seguros e manutenção adequada. Também devem ser considerados os custos de ciclo de vida das baterias, sua substituição e eventual descarte. Apesar do alto investimento inicial, os benefícios adicionais incluem maior resiliência, controle de picos e estabilidade da rede.

Além disso, esse cenário permite encarar os excedentes não como problema, mas como oportunidade estratégica para transformar o modelo energético do porto. Em vez de apenas gerenciar a energia excedente, propõe-se expandir a base de consumo elétrico, eletrificando novas cargas para absorver diretamente essa energia, sem necessidade de exportação ou armazenamento. Essa estratégia pode incluir:

- implantação de infraestrutura de recarga para veículos internos,
- substituição de consumos térmicos por tecnologias elétricas eficientes, como bombas de calor.

Essa abordagem aumenta a utilização local da energia renovável, contribui para os objetivos de descarbonização, reduz a pegada de carbono das operações e melhora a competitividade ambiental do porto.

A implementação das medidas analisadas neste estudo de descarbonização, como a eletrificação do consumo dos navios atracados (cold ironing / OPS), aumentaria significativamente a demanda base do Porto. Esses excedentes de geração elétrica poderiam ser integrados diretamente, sem necessidade de armazenamento intermediário, e possibilitariam a expansão da geração renovável instalada. Contudo, isso exigiria uma infraestrutura interna de distribuição mais robusta, o que ultrapassa o escopo deste estudo.

3.2. Estudo técnico sobre o potencial de armazenamento (Cenários)

Com o objetivo de avaliar de forma rigorosa e realista a viabilidade técnico-econômica do aproveitamento da energia solar fotovoltaica no Porto de Itaqui, o presente estudo foi estruturado em dois casos de análise diferenciados.

Essa divisão responde à necessidade de comparar o desempenho, o impacto e a rentabilidade de diferentes estratégias de implementação de geração renovável, levando em consideração tanto as limitações físicas do ambiente portuário quanto o cenário tarifário e tecnológico vigente.

Com base nos perfis de geração e considerando a demanda de referência (distribuída uniformemente como suposição inicial), será realizada a otimização econômica do dimensionamento das baterias, considerando os seguintes pressupostos:

- A geração projetada neste caso permite cobrir uma parte substancial do consumo elétrico atual do porto através de autoconsumo direto, reduzindo significativamente a conta de energia, com um custo de energia evitada estimado em R\$ 0,711 por kWh, conforme as tarifas industriais vigentes no Estado do Maranhão.
- No entanto, devido à limitação da superfície disponível, essa solução não permite o aproveitamento total do potencial fotovoltaico do enclave, nem a cobertura completa da demanda portuária em determinados períodos. Adicionalmente, a curva horária de geração nem sempre coincide com a curva de consumo, o que evidencia a necessidade de considerar opções de armazenamento elétrico complementar para melhorar o índice de autossuficiência.
- Dado o custo atual de armazenamento em baterias estacionárias, estimado em R\$ 2.000 por kWh instalado [13], foi analisada neste caso a capacidade ótima de baterias que permita deslocar a energia solar das horas de máxima geração para as horas de maior demanda, sem incorrer em superdimensionamentos injustificados.
- O equilíbrio entre o custo de investimento em armazenamento e a economia gerada pela redução do consumo de energia da rede é crucial para determinar a viabilidade final deste cenário.
- O objetivo da otimização é a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) do investimento, considerando uma taxa interna de desconto de 4 %.

Para realizar a otimização, foi utilizada uma ferramenta de otimização de baterias desenvolvida pela Fundación Valenciaport.

Caso de estudo 1: instalação fotovoltaica em edifícios e estacionamentos próprios da EMAP

Neste primeiro cenário, considera-se apenas a instalação de sistemas fotovoltaicos sobre as coberturas dos edifícios administrativos e nas áreas de estacionamento previamente identificadas como tecnicamente viáveis dentro do recinto portuário. Esta opção representa uma estratégia de aproveitamento de áreas já urbanizadas, com mínimo impacto sobre o solo, menor complexidade de licenciamento e máxima integração arquitetônica.

Os resultados da otimização são apresentados na tabela a seguir:

Figura 69 - Parâmetros técnico-econômicos da otimização da capacidade de armazenamento (Caso de estudo 1).

DEMANDA (2022)	INSTALAÇÃO		
1000	POTENCIA DE ARMAZENAMENTO	307,2795715	kW
	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	2230,082314	kWh
	INSTALAÇÃO SOLAR	6,6	MW
	INSTALAÇÃO EÓLICA	0	Aero
GERAÇÃO RENOVÁVEL	PRODUÇÃO SOLAR	3205,88	MWh
	GERAÇÃO SOLAR MÁXIMA	1,50	MW
	PRODUÇÃO EÓLICA	0,00	MWh
	GERAÇÃO EÓLICA MÁXIMA	0,00	MW
DEMANDA	DEMANDA TOTAL	2592,88	MWh
	DEMANDA MÉDIA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÁXIMA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÍNIMA ANUAL	0,30	MWh/h
ARMAZENAMENTO	ENERGIA VERTIDA SEM ARMAZENAMENTO	2030,34	MWh
	ENERGIA VERTIDA COM ARMAZENAMENTO	1094,23	MWh
	HORAS AÑO DESIQUILIBRIO	3642	h
	ENERGIA ARMazenADA	936,11	MWh
	PERCENTUAL RENOVÁVEL ARMazenADO	29,20%	%
	ENERGIA COMPRADA DA REDE COM ARMAZENAMENTO	622,03	MWh
	ENERGIA COMPRADA DA REDE SEM ARMAZENAMENTO	1417,33	MWh
	NÚMERO DE CICLOS	364	Ciclos
	PERCENTUAL DE CARGA DA BATERIA	38,17%	%
ECONÔMICOS	UTILIZAÇÃO MÉDIA DE POTÊNCIA DE BATERIA	83,65%	%
	INVESTIMENTO EM ARMAZENAMENTO (ESTIMADO)	614.559,14	R\$
	INVESTIMENTO EM GERAÇÃO SOLAR (ESTIMADO)	-	R\$
	INVESTIMENTO EM GERAÇÃO EÓLICA (ESTIMADO)	-	R\$
	INVESTIMENTO TOTAL (ESTIMADO)	614.559,14	R\$
	PREÇO DE COMPRA DA ELETRICIDADE	0,711	R\$/kWh
	ECONOMIA ANUAL COM COMPRA DE ELETRICIDADE	565.458,04	R\$
	OPEX	21.249,89	R\$
	FLUXO DE CAIXA	565.458,04	R\$
	TAXA DE DESCONTO	4%	
	VAN	3971812,08	R\$

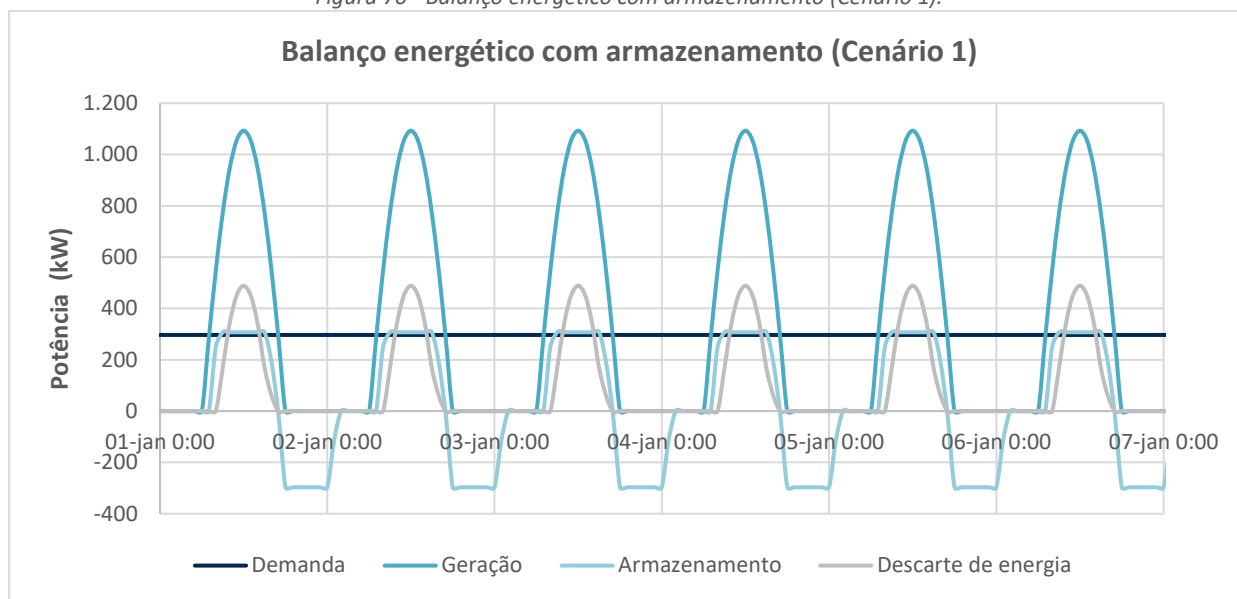
Fonte: Fundación Valenciaport.

Para o primeiro caso de estudo, obtém-se um valor otimizado de 307 kW de potência de armazenamento necessária e uma capacidade total de 2.230 kWh, o que representa um investimento de R\$ 614.559 para a aquisição do sistema de baterias. Com essa configuração, é gerada uma economia anual de R\$ 565.458 na compra de eletricidade da rede.

Além disso, ocorre uma redução significativa nos vertimentos de energia renovável (energia gerada não aproveitada por limitação da rede), que passam de 2.030 MWh (63% da geração) para 1.094 MWh (34%). Os custos de manutenção da instalação de armazenamento são estimados em R\$ 21.249 por ano [14].

A seguir, apresenta-se o gráfico de balanço energético referente à primeira semana do ano considerado como base.

Figura 70 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 1).



Fonte: Fundación Valenciaport.

Caso de estudo 2: instalação fotovoltaica considerando a instalação completa

No segundo cenário, amplia-se o escopo da instalação fotovoltaica com a inclusão de uma planta adicional em solo, localizada em áreas externas ao recinto imediato, mas ainda dentro da área de gestão portuária ou do Governo do Estado, como explanadas adjacentes ou zonas de expansão logística.

Essa alternativa permite atingir uma capacidade instalada significativamente maior, o que não apenas garante a cobertura total do consumo atual do porto, mas também viabiliza novos vetores de consumo energético, como:

- Produção de hidrogênio verde.
- Eletrificação de equipamentos portuários.
- Fornecimento de energia a terceiros.

Essa maior capacidade de geração inevitavelmente gera um volume superior de excedentes solares diários, tornando mais relevante a necessidade de armazenamento elétrico. No entanto, também se abre a possibilidade de empregar parte dessa energia adicional em usos flexíveis, como a produção de hidrogênio, carregamento noturno ou sistemas de refrigeração, o que reduz a pressão sobre o sistema de baterias.

Dessa forma, este caso permite não apenas avaliar uma estratégia de aproveitamento energético em maior escala, como também avançar em direção a um modelo de autossuficiência energética integral e de geração distribuída com valor agregado.

Figura 71 - Parâmetros técnico-econômicos da otimização da capacidade de armazenamento (Caso de estudo 2).

DEMANDA (2022)	INSTALAÇÃO		
1000	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	568,1136626	kW
	POTENCIA DE ARMAZENAMENTO	6650,266962	kWh
	INSTALAÇÃO SOLAR	14,3	MW
	INSTALAÇÃO EÓLICA	0	Aero
GERAÇÃO RENOVÁVEL	PRODUÇÃO SOLAR	6946,08	MWh
	GERAÇÃO SOLAR MÁXIMA	3,24	MW
	PRODUÇÃO EÓLICA	0,00	MWh
	GERAÇÃO EÓLICA MÁXIMA	0,00	MW
DEMANDA	DEMANDA TOTAL	2592,88	MWh
	DEMANDA MÉDIA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÁXIMA ANUAL	0,30	MWh/h
	DEMANDA MÍNIMA ANUAL	0,30	MWh/h
ARMAZENAMENTO	ENERGIA VERTIDA SEM ARMAZENAMENTO	5757,68	MWh
	ENERGIA VERTIDA COM ARMAZENAMENTO	4102,07	MWh
	HORAS ANO DESIQUILÍBRIO	4004	h
	ENERGIA ARMAZENADA	1655,61	MWh
	PERCENTUAL RENOVÁVEL ARMAZENADO	23,84%	%
	ENERGIA COMPRADA DA REDE COM ARMAZENAMENTO	2,08	MWh
	ENERGIA COMPRADA DA REDE SEM ARMAZENAMENTO	1404,47	MWh
	NÚMERO DE CICLOS	1	Ciclos
	PERCENTUAL DE CARGA DA BATERIA	73,50%	%
	UTILIZAÇÃO MÉDIA DE POTÊNCIA DE BATERIA	72,78%	%
ECONÔMICOS	INVESTIMENTO EM ARMAZENAMENTO (ESTIMADO)	1.136.227,33	R\$
	INVESTIMENTO EM GERAÇÃO SOLAR (ESTIMADO)	-	R\$
	INVESTIMENTO EM GERAÇÃO EÓLICA (ESTIMADO)	-	R\$
	INVESTIMENTO TOTAL (ESTIMADO)	1.136.227,33	R\$
	PREÇO DE COMPRA DA ELETRICIDADE	0,711	R\$/kWh
	ECONOMIA ANUAL COM COMPRA DE ELETRICIDADE	997.104,45	R\$
	OPEX	46.041,43	R\$
	FLUXO DE CAIXA	997.104,45	R\$
	TAXA DE DESCONTO	4%	
	VAN	6951182,97	R\$

Fonte: Fundación Valenciaport.

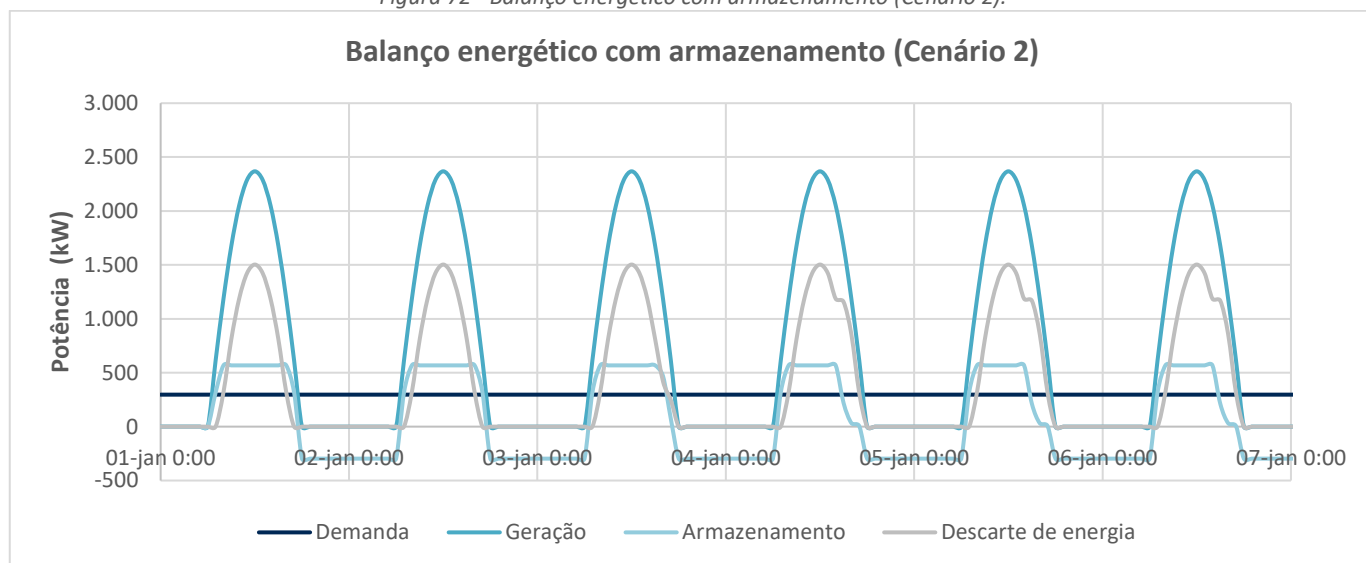
Obtém-se, para o segundo caso de estudo, um valor de otimização de 568 kW de potência de armazenamento necessária e capacidade de 6.650 KWh, o que implica um investimento de R\$ 1.136.227 para a aquisição das baterias. Com isso, gera-se uma economia anual na compra de eletricidade de R\$ 996.755

Os vertimentos de energia renovável (devido à incapacidade de absorção pela rede) são reduzidos de 5.757 MWh (equivalente a 82 % da geração) para 4.105 MWh (59 %). Os custos de manutenção da instalação são estimados em R\$ 46.041, proporcionais à escala da solução proposta.

Esse resultado evidencia que, mesmo com armazenamento otimizado, uma parte significativa da energia renovável gerada não pode ser aproveitada sem a adoção de novas medidas de flexibilização do sistema.

A seguir, apresenta-se o gráfico com o balanço energético projetado para a primeira semana do ano considerado como base:

Figura 72 - Balanço energético com armazenamento (Cenário 2).



Em termos comparativos, o primeiro caso apresenta uma melhor eficiência relativa no aproveitamento energético, com um investimento menor e uma maior proporção de autoconsumo.

Por outro lado, o segundo caso, embora menos eficiente do ponto de vista do uso relativo da energia, permite alcançar maiores volumes absolutos de energia aproveitada e maior economia total, graças à maior escala da geração solar instalada.

Ambos os cenários demonstram a viabilidade técnica e econômica da combinação entre geração solar e armazenamento elétrico no ambiente portuário. No entanto, também evidenciam a necessidade de desenvolver estratégias complementares — como o uso de hidrogênio verde, a eletrificação de equipamentos ou a implementação de micro redes — para aproveitar a energia renovável excedente que não pode ser absorvida pela rede nem armazenada de forma eficiente.

4. Subtarefa 3: produção local de hidrogênio

4.1. Avaliação do potencial de geração de hidrogênio no Porto

O Porto de Itaquí, graças ao seu potencial solar identificado e à infraestrutura energética projetada, apresenta condições técnicas favoráveis para a implementação de uma instalação local de produção de hidrogênio verde. A usina fotovoltaica proposta, com capacidade instalada de 14,3 MWp e produção estimada entre 6,4 e 7,7 GWh por ano, oferece uma base energética renovável suficiente para alimentar, de forma parcial ou total, uma planta de eletrólise dedicada à geração de hidrogênio.

Nesse contexto, propõe-se o dimensionamento de uma unidade de eletrólise com capacidade produtiva máxima de 450 kg de hidrogênio por dia, o que corresponde a uma produção anual aproximada de 150.000 kg, considerando um regime de operação contínua durante os 365 dias do ano.

Essa quantidade de hidrogênio poderia ser destinada ao abastecimento de equipamentos móveis portuários, frotas logísticas internas, sistemas auxiliares ou veículos externos vinculados à operação portuária. Isso permitiria o suprimento de aproximadamente 10 máquinas de logística portuária já identificadas no plano de descarbonização.

Optou-se por este plano de alcance moderado levando em consideração o nível de maturidade da tecnologia, bem como o grau de implementação dessas soluções no ambiente portuário, que ainda é bastante limitado.

4.2. Capacidade proposta para a planta de eletrólise

Com base na estratégia de descarbonização do Porto de Itaquí e no potencial renovável identificado no presente estudo, considerou-se como ponto de partida o dimensionamento de uma planta de eletrólise capaz de produzir um máximo de 450 quilogramas de hidrogênio por dia. Essa capacidade está alinhada com um cenário de desenvolvimento progressivo da demanda portuária e logística, garantindo ao mesmo tempo uma escala suficientemente representativa para demonstrar viabilidade técnica e econômica.

Para atingir essa taxa de produção diária, é necessário estabelecer primeiro a relação entre o consumo energético do eletrólizador e o rendimento do processo. Os sistemas comerciais atuais apresentam consumos energéticos que oscilam entre 50 e 55 kWh por cada quilograma de hidrogênio produzido, dependendo da tecnologia utilizada, da pureza da água de alimentação e da pressão de saída. Assumindo um valor médio de 52,5 kWh/kg H₂, a produção de 450 kg diários exigirá um consumo elétrico de 23.625 kWh por dia.

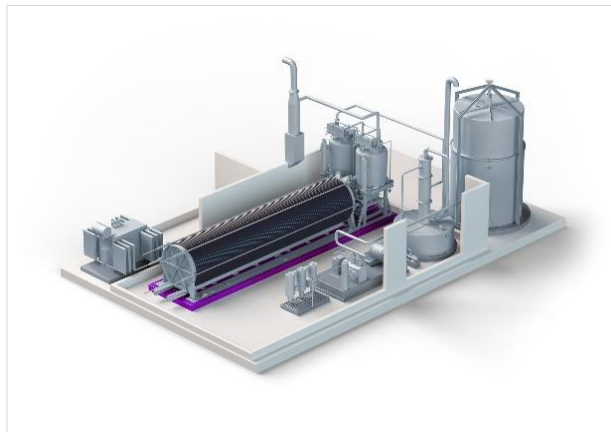
Essa demanda energética diária equivale, em termos de potência nominal, a 984 kW de carga contínua durante 24 horas. No entanto, dado que a energia renovável — neste caso, solar fotovoltaica — não está disponível de forma contínua ao longo do dia e considerando a necessidade de flexibilidade operacional (por manutenção, variabilidade da irradiância ou desconexões), propõe-se a instalação de um eletrólizador com uma potência nominal de 1 MW.

O eletrólizador poderá operar de forma ajustada à curva de geração solar do porto ou manter uma operação mais estável por meio do uso de energia complementar da rede elétrica. Essa flexibilidade é crítica para garantir o abastecimento contínuo de hidrogênio sem a necessidade de sobre dimensionar o sistema de armazenamento.

Em relação à tecnologia de eletrólise, consideram-se duas alternativas principais atualmente consolidadas no mercado:

Eletrólise Alcalina (AWE): tecnologia madura e amplamente disponível, com custos de investimento relativamente baixos. Sua principal limitação está na menor capacidade de resposta frente às variações de carga elétrica, o que pode dificultar a integração direta com fontes renováveis intermitentes como a solar fotovoltaica.

Figura 73 - Eletrolisador Alcalino Atmosférico | Nel Hydrogen.



Fonte: Nel Hydrogen.

Eletrólise PEM (PEM): tecnologia mais recente, adequada para ambientes com geração elétrica variável. Oferece tempos de partida mais rápidos, maior densidade energética e facilidade de operação em pressões elevadas, embora com um custo de aquisição ligeiramente superior ao da opção alcalina.

Figura 74 - Eletrolisador PEM ITM de 1 MW.



Fonte: ITM Power.

Considerando que a planta estará parcialmente conectada à geração fotovoltaica, com perfis de produção flutuantes, e priorizando a flexibilidade operacional, recomenda-se a adoção da tecnologia PEM para esta primeira instalação piloto no Porto de Itaquí. Essa escolha permite maximizar o aproveitamento da energia solar disponível, reduzir o risco de perda de produção devido à instabilidade da fonte energética e facilitar futuras ampliações modulares do sistema.

No caso de uma produção diária de 450 kg de hidrogênio, estima-se, portanto, uma necessidade hídrica de aproximadamente 5.000 a 6.750 litros por dia, o que equivale a entre 5 e 6,75 m³/dia. Deve-se garantir o fornecimento desse recurso a partir da rede de abastecimento de água do Porto de Itaquí.

4.3. Tecnologias propostas para o armazenamento de hidrogênio

Como sistema de armazenamento e abastecimento diretamente conectado à produção descrita na seção anterior, propõe-se a implementação de uma estação de abastecimento de hidrogênio (Hydrogen Refuelling Station – HRS), especificamente adaptada ao ambiente portuário, seguindo o modelo operacional testado no projeto europeu **H₂PORTS**, atualmente em operação no Porto de Valência.

A solução implementada no H₂PORTS demonstrou viabilidade técnica e operacional em um ambiente logístico complexo, atendendo com sucesso a equipamentos portuários pesados, como um Reach Stacker e um cavalo mecânico equipado com célula a combustível. A proposta para o Porto de Itaqui consiste em replicar essa solução como base tecnológica, ajustando sua capacidade de armazenamento à demanda energética prevista neste estudo.

Especificamente, propõe-se **triplicar a capacidade de armazenamento de hidrogênio em baixa pressão**, passando dos **150 kg utilizados em Valência para 450 kg em Itaqui**, com o objetivo de atender a uma operação diária mais intensiva e contínua.

Figura 75 - Hidrogeneradora do projeto H₂Ports localizada no Porto de Valência.



Fonte: Fundación Valenciaport.

A HRS proposta será composta pelos seguintes subsistemas principais:

- **Unidade de armazenamento em baixa pressão (30–40 bar):** sistema composto por racks de cilindros projetados para conter até **450 kg de hidrogênio**. Essa capacidade cobriria aproximadamente um dia completo de operação, coincidindo com o ritmo de produção da planta de eletrólise dimensionada. O armazenamento em baixa pressão permite maior segurança em ambientes operacionais complexos e reduz os requisitos técnicos dos equipamentos de transferência.
- **Sistema de compressão e abastecimento:** módulo de compressores que eleva a pressão do hidrogênio desde o armazenamento primário até os níveis requeridos para o abastecimento (350 ou 700 bar, dependendo do tipo de veículo ou equipamento). Essa unidade será equipada com um sistema de controle

automatizado, refrigeração e gestão de vazão, além de um ou mais dispensadores com conexão padronizada.

- **Sistema de controle, segurança e SCADA:** integração de sensores, válvulas de corte, detectores de vazamentos, sistemas de ventilação e extinção, assim como um sistema de monitoramento remoto em tempo real (SCADA) para a operação segura do sistema.
- **Contêiner técnico modular (*plug & play*):** todos os sistemas serão integrados em uma estrutura compacta e transportável, permitindo sua instalação em diferentes áreas do recinto portuário sem necessidade de obras civis intensivas. A estação poderá ser deslocada, escalada ou replicada facilmente em outras zonas do porto.

Do ponto de vista funcional, essa HRS poderá atender o abastecimento de equipamentos logísticos pesados, frotas de serviço portuário, ou até mesmo caminhões de transporte regional ou de longa distância que operem no entorno do porto. A capacidade de armazenamento diário de 450 kg coincide com o volume máximo de hidrogênio produzido pela planta de eletrólise prevista, o que permite fechar um ciclo completo de geração, armazenamento e consumo local, sem excedentes e sem necessidade de evacuação externa.

4.4. Dimensionamento econômico

A implementação de uma infraestrutura completa de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio verde no Porto de Itaquí exige não apenas uma base tecnológica sólida, mas também um planejamento econômico rigoroso e detalhado. Esta seção apresenta o dimensionamento econômico global do sistema proposto, considerando os diferentes componentes que integram a cadeia de valor do hidrogênio: desde a eletrólise da água com energia renovável até o armazenamento intermediário e a dispensação final para aplicações portuárias ou logísticas.

O modelo adotado foi desenvolvido com base em critérios de modularidade, escalabilidade e replicabilidade, tomando como referência direta o projeto europeu H₂PORTS, adaptado às condições operacionais, climáticas e regulatórias do contexto brasileiro. Como base, considera-se uma planta de eletrólise com potência nominal de 1 MW, com capacidade de produção de até 450 kg de hidrogênio por dia, além de um sistema de armazenamento em tanques de baixa pressão com capacidade equivalente para garantir a operação contínua diária. A estação de abastecimento de hidrogênio (Hydrogen Refuelling Station – HRS) também foi dimensionada para atender equipamentos portuários e veículos pesados.

Os custos aqui apresentados incluem todos os elementos necessários para uma solução “chave na mão”: aquisição de equipamentos, tratamento de água, sistemas de compressão, segurança, obra civil, integração e instalação. Essa abordagem oferece uma visão clara do esforço de investimento necessário para a implementação do sistema, além de auxiliar no planejamento futuro de ampliação, operação e manutenção.

A estimativa econômica proposta não é apenas uma ferramenta de análise técnica, mas também um insumo estratégico essencial para a avaliação da viabilidade financeira, captação de recursos públicos ou privados e tomada de decisões no contexto da transição energética do porto.

Tabela 22 - Estimativa de custos por bloco funcional para sistema de hidrogênio verde.

Bloco funcional	Componente	Descrição técnica	Custo estimado (R\$)
Geração	Eletrólizador PEM de 1 MW	Sistema completo, inclui stack, inversores, controle e integração. Produção: ~450 kg/dia.	R\$ 11.000.000
	Sistema de tratamento de água	Osmose reversa, para produção de ~8 m³/dia de água ultrapura.	R\$ 700.000
	Balanceamento de planta e infraestrutura	Obras civis, sistemas elétricos, refrigeração, controles e integração geral.	R\$ 2.500.000
Subtotal – Geração			R\$ 14.200.000
Armazenamento	3 tanques de baixa pressão (150 kg cada)	Tanques cilíndricos horizontais, em aço certificado. Capacidade total: 450 kg @ 30–40 bar.	R\$ 1.600.000
	Sistema de instrumentação e segurança	Válvulas, sensores de pressão, controle de temperatura e purga, integrados ao SCADA.	Incluído em outros blocos
Subtotal – Armazenamento			R\$ 1.600.000
Dispensação	Compressor de alta pressão (350–700 bar)	Compressor multietapas, refrigerado, para alimentação de dispensador para veículos ou equipamentos.	R\$ 2.000.000
	Dispensador (1 ponto de carga)	Dispensador padronizado com mangueira, acoplamento e refrigeração interna.	R\$ 600.000
	Contêiner técnico + integração	Sistema <i>plug & play</i> em skid contêiner com climatização, segurança e SCADA.	R\$ 1.600.000
	Instalação e comissionamento	Transporte, licenças, montagem, documentação e capacitação.	R\$ 600.000
Subtotal – Dispensação			R\$ 4.800.000
TOTAL			R\$ 20.600.000

Fonte: Fundación Valenciaport.

4.5. Cálculo do LCOH – custo nivelado do hidrogênio no Porto de Itaqui

O Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH, na sigla em inglês) representa o custo médio por quilograma de hidrogênio produzido ao longo de toda a vida útil de uma planta, considerando tanto o investimento inicial quanto os custos de operação, manutenção, água e energia elétrica. Trata-se de um indicador essencial para avaliar a competitividade econômica de projetos de hidrogênio renovável e compará-los com outras tecnologias de produção ou vetores energéticos convencionais.

Para o caso do Porto de Itaqui, foi dimensionada uma instalação com capacidade de produzir até 450 kg de hidrogênio por dia, o que representa uma produção anual de 164.250 kg. Ao longo de uma vida útil estimada de 15 anos, a planta geraria um total acumulado de 2.463.750 kg de hidrogênio. O sistema se baseia em eletrólise alimentada por energia elétrica, com um consumo específico de 52,5 kWh por kg de hidrogênio, resultando em uma demanda elétrica anual de aproximadamente 8.621.000 kWh.

Para o cálculo econômico, foi considerado o cenário de investimento mais exigente, com custo total de implantação de R\$ 20.600.000, incluindo o sistema de eletrólise, tratamento de água, tanques de armazenamento de baixa pressão e a estação de abastecimento completa. Aos custos de capital somam-se os custos operacionais anuais, principalmente com energia elétrica, estimados em R\$ 6.125.000/ano com base na tarifa industrial vigente no estado do Maranhão (R\$ 0,711/kWh). Adicionalmente, foram considerados custos anuais entre R\$ 750.000 e R\$ 1.000.000 para operação e manutenção, incluindo água ultrapura, inspeções, substituição de componentes e supervisão técnica.

Projetando esses gastos ao longo dos 15 anos de vida útil, têm-se aproximadamente R\$ 91.880.000 em custos com energia elétrica e até R\$ 15.000.000 em operação e manutenção, o que resulta em um custo total acumulado de R\$ 127.480.000 ao somar a investimento inicial de R\$ 20.600.000. Ao dividir esse valor pela produção total estimada de 2.463.750 kg de hidrogênio, obtém-se um LCOH de aproximadamente R\$ 51,74 por kg de hidrogênio.

Embora esse valor ainda seja superior ao do hidrogênio cinza ou azul, enquadra-se dentro da faixa considerada razoável para projetos pioneiros de média escala parcialmente conectados à rede elétrica. O componente energético representa mais de 70% do custo total, o que reforça a importância estratégica de utilizar a planta solar projetada para o Porto de Itaqui como fonte primária de energia para o eletrólizador. A integração com geração renovável permitirá reduzir o custo do hidrogênio a médio prazo, aumentar sua competitividade e posicionar o porto como um nó logístico de baixo carbono no norte do Brasil.

4.6. Integração com a Geração Renovável do Porto

Um dos pilares fundamentais do sistema de produção de hidrogênio proposto para o Porto de Itaqui é sua integração direta com a planta solar fotovoltaica de 14,3 MWp avaliada neste estudo. Essa instalação, concebida especificamente para uso em ambiente portuário, possui um potencial de geração elétrica anual estimado entre 6,4 e 7,7 GWh, energia suficiente para alimentar uma planta de eletrólise de 1 MW e permitir a produção diária de até 450 kg de hidrogênio verde.

A geração solar fotovoltaica apresenta disponibilidade horária limitada e variável, concentrada entre 8h e 17h, com picos de produção ao meio-dia. Essa curva de geração, típica de regiões tropicais como o Maranhão, coincide de forma razoável com o perfil de operação da eletrólise, especialmente se configurada para funcionar nas horas solares, aproveitando os meses com maior irradiância.

Por essa razão, foi selecionada a tecnologia PEM (Proton Exchange Membrane), que se destaca pela capacidade de operar com boa eficiência em cargas parciais e responder rapidamente às variações da geração renovável. Essa tecnologia permite partidas e paradas frequentes sem comprometer a durabilidade do stack, sendo ideal para o acoplamento com fontes intermitentes como a solar.

Durante os períodos de maior geração fotovoltaica, a planta poderá atender diretamente grande parte da demanda do eletrólizador, reduzindo o consumo da rede elétrica e, consequentemente, o custo final do hidrogênio produzido. Em períodos com menor geração solar (por clima, excesso de demanda ou fora do horário solar), o sistema poderá utilizar a rede elétrica como apoio, assegurando a continuidade da operação sem necessidade de superdimensionar o armazenamento.

Para gerenciar de forma eficiente esse balanço dinâmico entre geração, consumo e armazenamento, recomenda-se a implementação de um Sistema de Gestão Energética (EMS), capaz de controlar em tempo real a produção solar, o funcionamento do eletrólizador, o estado de carga dos tanques de hidrogênio e as previsões de consumo. Essa ferramenta permitirá maximizar o uso da energia renovável, otimizar a eficiência global do sistema e garantir segurança e estabilidade operacional.

O estudo comparativo evidência que a integração entre a produção de hidrogênio verde e a planta fotovoltaica melhora significativamente o aproveitamento da energia solar:

- **Cenário 1 (apenas geração distribuída – coberturas e estacionamentos):** O aproveitamento da energia gerada passa de **73,6%** para **88,5%** com a inclusão do eletrólizador, o que representa uma melhoria de **14,9%** na eficiência do sistema.
- **Cenário 2 (com inclusão da planta solar em solo):** O aproveitamento aumenta de **25,2%** para **46,7%**, um ganho de **21,5%**, graças à capacidade do sistema de hidrogênio de absorver excedentes de geração renovável.

Esses resultados comprovam que o hidrogênio atua como um vetor estratégico para valorizar a energia renovável não consumida em tempo real, contribuindo para um modelo energético mais eficiente, flexível e sustentável.

A integração funcional e energética entre a planta fotovoltaica e o sistema de produção de hidrogênio permite fechar um ciclo de produção local, livre de emissões, adaptado ao ambiente operacional portuário e com alto valor estratégico. Essa sinergia posiciona o Porto de Itaquí como referência nacional e latino-americana na transição energética do setor portuário, com um modelo replicável, escalável e alinhado com os objetivos de descarbonização nacionais e internacionais.

5. Conclusão

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica, energética e estratégica de uma proposta integrada de geração renovável local, com base em energia solar fotovoltaica, aliada à produção de hidrogênio verde como vetor complementar de descarbonização. Por meio de uma análise detalhada da infraestrutura existente, das condições climáticas locais e do perfil de consumo do recinto portuário, foi definido um modelo energético robusto, escalável e adaptado às características operacionais de um ambiente logístico marítimo em expansão.

A caracterização do potencial solar do porto evidenciou a disponibilidade de áreas suficientes para a instalação de sistemas fotovoltaicos distribuídos em coberturas de edifícios, estacionamentos e terrenos externos adjacentes. Essa capacidade instalada permite atingir um volume de geração renovável superior ao consumo elétrico atual da EMAP, abrindo caminho não apenas para a autossuficiência energética, mas também para o desenvolvimento de novas aplicações elétricas ou o fornecimento de vetores energéticos alternativos.

No tocante ao armazenamento de energia, o estudo identificou a oportunidade de incorporar soluções com baterias como componente essencial da planta fotovoltaica projetada. Essa solução torna-se especialmente relevante diante da variabilidade horária da geração solar, que, embora abundante, é intermitente. A implementação de sistemas de armazenamento permitiria maximizar o aproveitamento da energia renovável gerada nas horas de maior radiação, possibilitando seu uso em momentos de menor geração ou maior demanda. Além disso, o armazenamento contribuiria para a estabilidade operacional do sistema elétrico interno do porto, reduziria a dependência da rede em situações críticas e reforçaria a segurança energética da instalação.

A planta de produção de hidrogênio proposta foi concebida como uma solução proporcional, realista e tecnicamente viável, compatível com o estado atual da tecnologia, planejada para operar de forma integrada com a geração solar local e em consonância com as necessidades energéticas do porto. Sua implantação possibilita não apenas reduzir o impacto ambiental de determinados processos logísticos, como também posicionar o Porto de Itaquí como um polo demonstrador de tecnologias limpas, capaz de atrair investimentos, projetos de inovação e fluxos comerciais sustentáveis.

Em seu conjunto, o projeto propõe uma rota clara para um modelo portuário de baixo carbono, sustentado por tecnologias maduras, economicamente justificáveis e ambientalmente responsáveis. O Porto de Itaquí dispõe dos recursos naturais, infraestrutura técnica e contexto estratégico necessários para liderar essa transformação — consolidando-se como um referencial nacional e internacional na transição energética aplicada ao setor marítimo-portuário.

6. Referências

- [1] https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_MA-en.html
- [2] https://wcti.fb.utfpr.edu.br/anais/individuais/2023/3_25_anais.pdf
- [3] https://www.tensite-energy.com/wp-content/uploads/2023/10/Ficha-tecnica-EM550-PH_V1.pdf
- [4] <https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-%28V%29-F1-EN.pdf>
- [5] https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/02103821/Canadian_Solar-Datasheet-CS6W-MB-AG-520-550-V1.0C3_AU.pdf
- [6] [Databook de la Obra de Construcción y Modernización de la Subestación Receptora del Puerto de Itaqui Itaqui - EMAP – Empresa Maranhense de Administração Portuária- 2022](#)
- [7] <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet-2024.pdf>
- [8] <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243376ti.pdf>
- [9] ICMS <https://www.sefaz.ma.gov.br>
- [10] PASEP/CONFIS <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br>
- [11] <https://publications.iadb.org/publications/portuguese/document/O-Custo-Nivelado-da-Energia-LCOE-e-o-Futuro-da-Geração-Fotovoltaica-na-América-Latina-e-Caribe.pdf>
- [12] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/
- [13] <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-record-low-of-139-kwh/>
- [14] <https://www.irena.org/publications/2022/Dec/Electricity-storage-and-renewables>