



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

**ESTRUTURAÇÃO DE UM CLUSTER PORTUÁRIO
DE HIDROGÊNIO VERDE: PROPOSTA
METODOLÓGICA E ANÁLISE DOS IMPACTOS
URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS**

Ana Caroline Lima Silva Tomaz

Orientadora: Profa. PhD. Yaeko Yamashita

Brasília
2026



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

ESTRUTURAÇÃO DE UM CLUSTER PORTUÁRIO DE HIDROGÊNIO VERDE: PROPOSTA METODOLÓGICA E ANÁLISE DOS IMPACTOS URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS

Ana Caroline Lima Silva Tomaz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Banca Composta Por:

Profa. PhD. Yaeko Yamashita

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UnB, Orientadora.

Prof. PhD. Joaquim José Guilherme de Aragão

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UnB, Examinador Interno.

Prof. PhD. Cristiano Farias Almeida

Faculdade de Ciências e Tecnologia, UFG, Examinador Externo.

Brasília, fevereiro de 2026.

RESUMO

A dissertação investiga a concepção de um cluster portuário de hidrogênio verde, analisando seus impactos urbanos, sociais e ambientais, a partir da articulação entre planejamento urbano, dinâmica produtiva e transição energética. O estudo parte do contexto contemporâneo de descarbonização da economia e da crescente centralidade dos portos como plataformas logísticas e industriais estratégicas, capazes de integrar cadeias de valor complexas e atividades de alto valor agregado. O objetivo central consiste em desenvolver e aplicar uma proposta metodológica de análise e estruturação de clusters produtivos em áreas portuárias, com ênfase nos efeitos territoriais e urbanos decorrentes da implantação de empreendimentos associados ao hidrogênio verde e seus derivados. A metodologia adotada combina pesquisa bibliográfica e documental, análise de cadeias produtivas e de negócios, definição de indicadores urbanos, sociais e ambientais e aplicação empírica em estudo de caso, tomando como referência o Porto do Itaqui/MA, um porto brasileiro de grande relevância logística e industrial. A proposta metodológica estrutura-se em etapas que abrangem a caracterização do território, a avaliação da infraestrutura existente, a identificação de oportunidades a partir da cadeia de negócios e da análise da demanda de mercado, a análise de impactos e a definição de parâmetros de desempenho urbano e territorial. Os resultados demonstram que a implantação de um cluster portuário de hidrogênio verde apresenta elevada aderência ao território analisado, em função da disponibilidade de infraestrutura logística, da proximidade com atividades industriais demandantes de hidrogênio, da capacidade de reconversão de áreas subutilizadas e do potencial de fortalecimento das economias locais. Observa-se que a adoção de indicadores específicos permite evidenciar ganhos em densidade funcional, diversificação produtiva, geração de empregos e mitigação de impactos ambientais. Conclui-se que a proposta metodológica contribui para o avanço do debate sobre planejamento urbano e portuário na transição energética, oferecendo subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas e estratégias de atração de investimentos, ao integrar de forma sistemática as dimensões urbana, produtiva e ambiental na estruturação de clusters de hidrogênio verde.

Palavras-chave: Cluster portuário; Hidrogênio verde; Planejamento urbano sustentável; Transição energética.

ABSTRACT

This dissertation investigates the conception of a green hydrogen port cluster, analyzing its urban, social, and environmental impacts through the articulation between urban planning, productive dynamics, and the energy transition. The study is grounded in the contemporary context of economic decarbonization and the increasing centrality of ports as strategic logistical and industrial platforms capable of integrating complex value chains and high value-added activities. The main objective is to develop and apply a methodological framework for the analysis and structuring of productive clusters in port areas, with emphasis on the territorial and urban effects resulting from the implementation of projects associated with green hydrogen and its derivatives. The adopted methodology combines bibliographic and documentary research, analysis of productive and business chains, definition of urban, social, and environmental indicators, and empirical application through a case study, taking the Port of Itaquí (MA), a Brazilian port of high logistical and industrial relevance, as reference. The methodological proposal is structured in stages that include territorial characterization, assessment of existing infrastructure, identification of opportunities based on the business chain and market demand analysis, impact assessment, and the definition of urban and territorial performance parameters. The results demonstrate that the implementation of a green hydrogen port cluster shows a high degree of adherence to the analyzed territory, due to the availability of logistical infrastructure, proximity to hydrogen-demanding industrial activities, the capacity to reconvert underutilized areas, and the potential to strengthen local economies. The adoption of specific indicators makes it possible to identify gains in functional density, productive diversification, job creation, and mitigation of environmental impacts. It is concluded that the proposed methodological framework contributes to advancing the debate on urban and port planning within the energy transition, providing technical support for public policy formulation and investment attraction strategies by systematically integrating urban, productive, and environmental dimensions in the structuring of green hydrogen clusters.

Keywords: Port cluster; Green hydrogen; Sustainable urban planning; Energy transition.

RESUMÉN

La presente disertación investiga la concepción de un clúster portuario de hidrógeno verde, analizando sus impactos urbanos, sociales y ambientales a partir de la articulación entre la planificación urbana, la dinámica productiva y la transición energética. El estudio se inscribe en el contexto contemporáneo de descarbonización de la economía y de la creciente centralidad de los puertos como plataformas logísticas e industriales estratégicas, capaces de integrar cadenas de valor complejas y actividades de alto valor agregado. El objetivo principal consiste en desarrollar y aplicar una propuesta metodológica para el análisis y la estructuración de clústeres productivos en áreas portuarias, con énfasis en los efectos territoriales y urbanos derivados de la implantación de emprendimientos asociados al hidrógeno verde y sus derivados. La metodología adoptada combina investigación bibliográfica y documental, análisis de cadenas productivas y de negocios, definición de indicadores urbanos, sociales y ambientales, y aplicación empírica mediante un estudio de caso, tomando como referencia el Puerto de Itaqui (MA), un puerto brasileño de gran relevancia logística e industrial. La propuesta metodológica se estructura en etapas que abarcan la caracterización del territorio, la evaluación de la infraestructura existente, la identificación de oportunidades a partir de la cadena de negocios y del análisis de la demanda de mercado, el análisis de impactos y la definición de parámetros de desempeño urbano y territorial. Los resultados demuestran que la implantación de un clúster portuario de hidrógeno verde presenta una elevada adecuación al territorio analizado, debido a la disponibilidad de infraestructura logística, la proximidad a actividades industriales demandantes de hidrógeno, la capacidad de reconversión de áreas subutilizadas y el potencial de fortalecimiento de las economías locales. Se observa que la adopción de indicadores específicos permite evidenciar avances en densidad funcional, diversificación productiva, generación de empleo y mitigación de impactos ambientales. Se concluye que la propuesta metodológica contribuye al avance del debate sobre la planificación urbana y portuaria en el marco de la transición energética, ofreciendo insumos técnicos para la formulación de políticas públicas y estrategias de atracción de inversiones, al integrar de manera sistemática las dimensiones urbana, productiva y ambiental en la estructuración de clústeres de hidrógeno verde.

Palabras clave: Clúster portuario; Hidrógeno verde; Planificación urbana sostenible; Transición energética.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.6.1: Estrutura da dissertação	19
Figura 3.2.1: Diamante de Porter	34
Figura 4.3.1: Tipos e processo de produção de hidrogênios	45
Figura 4.4.1: Processo de eletrólise para produção de Hidrogênio Verde	47
Figura 4.5.1: Geração de Energia elétrica por fonte no Brasil	51
Figura 4.5.2: Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil	52
Figura 4.6.1: Rotas tecnológicas do Hidrogênio Verde	55
Figura 5.3.1: Representação gráfica do conceito de Cadeia de Negócio	58
Figura 6.2.1: Modelo Conceitual do Cluster portuário de Hidrogênio Verde	66
Figura 7.2.1: Etapas do método proposto	73
Figura 7.3.1.1: Detalhamento da primeira fase da Etapa 1	75
Figura 7.3.2.1: Detalhamento da segunda fase da Etapa 1	80
Figura 7.3.3.1: Detalhamento da terceira fase da Etapa 1	85
Figura 7.4.1: Detalhamento da etapa 2	87
Figura 7.5.1: Detalhamento da etapa 3	90
Figura 8.1: Localização do Porto de Itaqui	94
Figura 8.1.1.1.1: Potencial de água subterrânea e recarga direta na região do Porto do Itaqui	97
Figura 8.1.1.1.2: Mapa de irradiação solar média anual (GHI) da Ilha de São Luís	101
Figura 8.1.1.1.3: Áreas potenciais para implantação de sistemas fotovoltaicos na poligonal do Porto	101
Figura 8.1.1.1.4: Mapa de velocidade média dos ventos na região de São Luís	104
Figura 8.1.1.1.5: Unidades de Conservação no território do Porto do Itaqui (MMA)	108
Figura 8.1.1.2.1: Infraestrutura de acostagem do Porto do Itaqui, localização dos berços	111
Figura 8.1.1.2.2: Localização dos terminais de granéis líquidos e áreas de tanques no Porto do Itaqui	113
Figura 8.1.1.2.3: <i>Hinterlândia</i> do Porto do Itaqui	116
Figura 8.1.1.2.4: Malha ferroviária do complexo portuário do Itaqui	117
Figura 8.1.1.2.5: Localização das rodovias da <i>hinterlândia</i> do Porto do Itaqui	119
Figura 8.1.1.2.6: Acessos dutoviários internos do Porto do Itaqui	121
Figura 8.1.1.2.7: Hidrovias de acesso ao Porto do Itaqui e TUPs adjacentes	122
Figura 8.1.2.1.1: Mapa de Macrozoneamento do Plano Diretor de São Luís	126
Figura 8.1.2.1.2: Zoneamento no Porto do Itaqui e retroárea	128
Figura 8.1.2.2.1: Áreas arrendadas	132
Figura 8.1.2.2.2: Áreas arrendáveis	133
Figura 8.1.3.1: Resultados da pegada de carbono do Porto de Itaqui em 2022	137
Fonte: Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui, 2025	137
Figura 8.1.3.2: Sobreposição dos limites do Disal (1980, 2002, 2004)	140
Figura 8.1.3.3: Módulos do Disal	141
Figura 8.1.3.4: Áreas retroportuárias	143
Figura 8.2.1.1: Cadeia de Negócio do Hidrogênio Verde associada ao Porto de Itaqui	151
Figura 8.2.4.1: Áreas sugeridas para implantação do cluster	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.4.1: Comparação entre eletrolisadores do tipo Alcalino e PEM	49
Tabela 8.1.1.1.1: Síntese das alternativas de abastecimento hídrico para produção de hidrogênio verde	99
Tabela 8.1.1.1.2: Síntese dos parâmetros de geração solar fotovoltaica na Ilha de São Luís	102
Tabela 8.1.1.1.3: Comparação entre geração solar <i>onshore</i> e <i>offshore</i> no contexto do Porto do Itaqui	103
Tabela 8.1.1.1.4: Comparação entre geração eólica <i>onshore</i> e <i>offshore</i> no contexto do Porto do Itaqui	105
Tabela 8.1.1.1.5: UCs identificadas em um raio de 10 km na região do Porto do Itaqui	106
Tabela 8.1.1.2.1: Características dos Berços do Porto de Itaqui	111
Tabela 8.1.1.2.2: Síntese da tancagem instalada com potencial de interface com derivados do H ₂	114
Tabela 8.1.2.1.1: Síntese dos parâmetros urbanísticos e dos usos permitidos nas zonas incidentes	130
Tabela 8.1.2.2.1: Síntese da situação das áreas no Porto de Itaqui	134
Tabela 8.1.3.1: Terminais e indústrias instalados no Porto do Itaqui e potencial de demanda de mercado	139
Tabela 8.1.3.2: Unidades industriais, logísticas e de armazenagem na retroárea	144
Tabela 8.2.2.1: Parâmetros de produção	154
Tabela 8.2.2.2: Síntese da infraestrutura energética	159

LISTA DE SIGLAS

AEL: *Anion Exchange Layer* (Camada de Troca Aniônica)
AEM: *Anion Exchange Membrane* (Membrana de Troca Aniônica)
ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANTAQ: Agência Nacional de Transportes Aquaviários
APPs: Áreas de Preservação Permanente
CAGED: Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CAP: Conselho de Autoridade Portuária
CAPEX: Capital Expenditure (Despesa de Capital)
CCS: *Carbon Capture and Storage* (Captura e Armazenamento de Carbono)
CDP: Companhia Docas do Pará
CNAE: Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CODESP: Companhia Docas do Estado de São Paulo
DNPRC: Departamento Nacional de Portos, Rios e Canais
DRI: *Direct Reduced Iron*
EPE: Empresa de Pesquisa Energética
GHIC: *Green Hydrogen Industrial Cluster*
GLP: Gás Liquefeito de Petróleo
GNL: Gás Natural Liquefeito
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET: Instituto Nacional de Meteorologia
INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MMA: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
NDC: Contribuições Nacionalmente Determinadas
ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDZ: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento Portuário
PEM: *Proton Exchange Membrane* (Membrana de Troca de Prótons)
RAIS: Relação Anual de Informações Sociais
SIN: Sistema Interligado Nacional
TUPs: Terminais de Uso Privado
UCs: Unidades de Conservação
UNIDO: Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
ZPE: Zona de Processamento de Exportação

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
RESUMÉN	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE SIGLAS	8
SUMÁRIO	9
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	12
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2. JUSTIFICATIVA	13
1.3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.4. HIPÓTESE	16
1.5. METODOLOGIA DE PESQUISA	16
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
CAPÍTULO 2. DINÂMICA PORTUÁRIA: ESTRUTURA, FUNÇÃO E INTEGRAÇÃO URBANA	20
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
2.2. INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA	21
2.2.1. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS	22
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS PORTOS	23
2.3.1. QUANTO A LOCALIZAÇÃO	24
2.3.2. QUANTO A UTILIZAÇÃO	25
2.3.3. QUANTO A FUNÇÃO	26
2.4. DIMENSÃO LEGAL	27
2.5. DIMENSÃO TECNOLÓGICA	28
2.6. TÓPICOS CONCLUSIVOS	29
CAPÍTULO 3. CLUSTERS PORTUÁRIOS	31
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
3.2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS E EVOLUÇÃO DA TEORIA DOS CLUSTERS	31
3.3. DINÂMICAS ESPACIAIS DO CLUSTER PORTUÁRIO	34
3.4. CONCEITO E EVOLUÇÃO DOS CLUSTER PORTUÁRIOS	35
3.5. CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E OPERACIONAIS	37
3.6. IMPACTOS SOCIAIS E ECONÔMICOS	38
3.7. CONTEXTO GLOBAL E BRASILEIRO	39
3.8. SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO	41
3.9. TÓPICOS CONCLUSIVOS	43
CAPÍTULO 4. HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	44
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	44
4.2. HIDROGÊNIO: CARACTERÍSTICAS, USOS E POTENCIAIS	44

4.3.	CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE SEGUNDO SUA MATRIZ ENERGÉTICA	45
4.4.	PROCESSO DE PRODUÇÃO: ELETRÓLISE	47
4.5.	CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO E FONTES RENOVÁVEIS	50
4.6.	ROTAS TECNOLÓGICAS DO HIDROGÊNIO VERDE	53
CAPÍTULO 5. CADEIA DE NEGÓCIO: PERSPECTIVA INTEGRADA		56
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	56
5.2.	CONCEITO, EVOLUÇÃO E DISTINÇÕES TEÓRICAS	56
5.3.	ESTRUTURA DA CADEIA DE NEGÓCIO	58
5.4.	IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES E POLÍTICAS PÚBLICAS	60
5.5.	VETOR DE ESTRUTURAÇÃO TERRITORIAL DE CLUSTERS	62
5.6.	TÓPICOS CONCLUSIVOS	63
CAPÍTULO 6. MODELO CONCEITUAL DE CLUSTER PORTUÁRIO DE HIDROGENIO VERDE		65
6.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	65
6.2.	MODELO CONCEITUAL	65
6.3.	TERRITÓRIO COMO ESTRUTURA CONDICIONADORA	66
6.4.	BASE NATURAL E TERRITORIAL	67
6.5.	INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA	67
6.6.	NÚCLEO PRODUTIVO	68
6.7.	CADEIA DE CONSUMO	68
6.8.	GOVERNANÇA COMO SISTEMA REGULADOR TRANSVERSAL	69
6.9.	APLICABILIDADE DO MODELO	70
6.10.	TÓPICOS CONCLUSIVOS	71
CAPÍTULO 7. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO		73
7.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	73
7.2.	MÉTODO PARA DESENVOLVIMENTO DE UM CLUSTER PORTUÁRIO DE HIDROGÊNIO VERDE	73
7.3.	ETAPA 1: IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES	74
7.3.1.	FASE 1: CARACTERIZAÇÃO DO PORTO	74
7.3.1.1.	COMPOSIÇÃO NATURAL	75
7.3.1.2.	COMPOSIÇÃO NÃO NATURAL	77
7.3.2.	FASE 2: LEVANTAMENTO DA LEGISLAÇÃO URBANA E DO PORTO	79
7.3.2.1.	PLANO DIRETOR	80
7.3.2.2.	PLANO DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO DO PORTO – PDZ	82
7.3.3.	FASE 3: ANÁLISE DA DEMANDA	84
7.3.3.1.	DEMANDA DE MERCADO	85
7.4.	ETAPA 2: AGREGAÇÃO DE VALOR	85
7.4.1.	CADEIA DE NEGÓCIOS DO HIDROGÊNIO VERDE	87
7.4.2.	ATIVIDADE ÂNCORA	88
7.4.3.	ATIVIDADES SECUNDÁRIAS	88
7.4.4.	ATIVIDADES DE APOIO	89
7.5.	ETAPA 3: ANÁLISE DOS IMPACTOS URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS	89
7.5.1.	INDICADORES URBANOS	90

7.5.2.	INDICADORES SOCIAIS _____	91
7.5.3.	INDICADORES AMBIENTAIS _____	92
CAPÍTULO 8. ESTUDO DE CASO _____		94
8.1.	IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES _____	96
8.1.1.	CARACTERIZAÇÃO DO PORTO _____	96
8.1.1.1.	COMPOSIÇÃO NATURAL _____	96
8.1.1.2.	COMPOSIÇÃO NÃO NATURAL _____	109
8.1.2.	LEVANTAMENTO DA LEGISLAÇÃO URBANA E DO PORTO _____	124
8.1.2.1.	PLANO DIRETOR _____	124
8.1.2.2.	PLANO DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO _____	131
8.1.3.	DEMANDA DE MERCADO _____	136
8.2.	AGREGAÇÃO DE VALOR _____	148
8.2.1.	CADEIA DE NEGÓCIO _____	148
8.2.2.	ATIVIDADE ÂNCORA _____	153
8.2.3.	ATIVIDADES SECUNDÁRIAS _____	160
8.2.4.	ATIVIDADES DE APOIO _____	162
8.3.	ANÁLISE DOS IMPACTOS URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS _____	164
8.3.1.	IMPACTOS URBANOS _____	164
8.3.2.	IMPACTOS SOCIAIS _____	167
8.4.	TÓPICOS CONCLUSIVOS _____	171
CAPÍTULO 9. DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS _____		172
9.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS _____	172
9.2.	ADERÊNCIA DO PORTO DE ITAQUI AO MODELO CONCEITUAL DO CP-H ₂ V _____	172
9.3.	CONDIÇÕES NATURAIS E TERRITORIAIS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE _____	173
9.4.	INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA, CONECTIVIDADE LOGÍSTICA E ENQUADRAMENTO NORMATIVO _____	173
9.5.	ESTRUTURAÇÃO DA CADEIA DE NEGÓCIOS E POTENCIAL DE ADENSAMENTO PRODUTIVO _____	174
9.6.	IMPACTOS URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS DO CLUSTER PROPOSTO _____	175
9.7.	TÓPICOS CONCLUSIVOS _____	175
CAPÍTULO 10. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FINAIS _____		177
10.1.	SÍNTESE DA TRAJETÓRIA DA PESQUISA _____	177
10.2.	ALCANCE DOS OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO _____	177
10.3.	VALIDADE E POTENCIAL DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA _____	178
10.4.	SÍNTESE CRÍTICA DO ESTUDO DE CASO DO PORTO DE ITAQUI _____	178
10.5.	LIMITAÇÕES DA PESQUISA _____	179
10.6.	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS _____	179
10.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	181
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____		182
ANEXOS _____		192

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O debate sobre a transição energética tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionado pela urgência global de mitigação das mudanças climáticas e pela busca por soluções sustentáveis no setor industrial e logístico. Entre as alternativas mais promissoras, o hidrogênio verde destaca-se como vetor estratégico para a descarbonização de cadeias produtivas e a transformação de sistemas energéticos intensivos em carbono (Sousa; Fiche; Sato, 2023). Nesse contexto, os portos emergem como espaços centrais dessa reconfiguração, tanto por sua função logística quanto por seu papel estruturante na adaptação da infraestrutura territorial às novas demandas da economia de baixo carbono.

Os portos desempenham um papel fundamental na organização espacial, econômica e social das cidades e regiões em que estão inseridos. Tradicionalmente vistos como infraestruturas logísticas voltadas ao comércio e transporte de mercadorias, esses complexos evoluíram para se tornarem centros dinâmicos que influenciam diretamente o desenvolvimento urbano, a sustentabilidade ambiental e a integração territorial (MONIOS; WILMSMEIER, 2021). O crescimento das cadeias globais de valor, a intensificação dos fluxos de mercadorias e a busca por modelos de desenvolvimento sustentável ampliaram o escopo das funções portuárias, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada que considere as dimensões urbanísticas e ambientais em sua gestão e planejamento.

No âmbito específico do transporte marítimo e das atividades portuárias, organismos internacionais e nacionais estabeleceram metas claras de descarbonização que influenciam diretamente o planejamento estratégico do setor. A Organização Marítima +Internacional (IMO) definiu, em sua estratégia revisada de 2023, a redução das emissões absolutas de gases de efeito estufa em pelo menos 20% até 2030 e a busca por uma redução de 70% até 2040, em comparação com os níveis de 2008, com a meta de alcançar a neutralidade em carbono por volta de 2050 (IMO, 2023). No cenário brasileiro, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) e o Plano Nacional de Logística Portuária vêm alinhando diretrizes para eficiência energética, incentivo ao uso de combustíveis alternativos e integração das políticas de transição energética ao setor portuário (ANTAQ, 2021).

No contexto internacional, portos localizados em regiões com potencial para produção renovável vêm sendo convertidos em plataformas industriais de energia limpa, tornando-se núcleos de exportação de hidrogênio e seus derivados, como amônia, metanol e combustíveis sintéticos (UNIDO, 2023). No Brasil, país que apresenta uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo e vasta disponibilidade de recursos naturais, observa-se um movimento recente de formulação de estratégias nacionais para inserção do hidrogênio verde como parte das políticas de transição energética (EPE, 2022). A posição

geográfica estratégica, combinada à extensa rede portuária nacional, cria condições propícias para o país se consolidar como exportador de derivados verdes.

Contudo, a literatura especializada e os documentos técnicos apontam que, para que essa transição se concretize, é necessário reestruturar os portos brasileiros para além de sua função logística tradicional. Ao integrar atividades industriais de baixo carbono, centros de pesquisa e armazenamento de vetores energéticos, os portos podem operar como catalisadores territoriais da inovação e da sustentabilidade (Sousa; Fiche; Sato, 2023). Nesse sentido, o conceito de cluster portuário se apresenta como um modelo promissor.

A cadeia de negócios do hidrogênio verde, por sua vez, configura-se como um arranjo complexo e interdependente, no qual diversos atores — produtores de energia, operadores logísticos, indústrias químicas, agentes financeiros, centros de pesquisa e órgãos reguladores — se articulam para viabilizar desde a geração do insumo até sua conversão em derivados e posterior distribuição (UNIDO, 2023). A lógica desse arranjo não reside na centralização por uma única empresa, mas na coordenação flexível e na complementaridade entre os elos produtivos, o que exige um planejamento territorial que reconheça e integre tais dinâmicas à infraestrutura portuária (Yamashita et al., 2024).

Diante desse cenário, a presente dissertação propõe o desenvolvimento de um método para a estruturação de clusters portuários de hidrogênio verde, orientado pela busca de maior vantagem competitiva e pela consolidação de ambientes portuários capazes de atrair investimentos e induzir inovações sustentáveis. Como estudo de caso, adota-se o Porto do Itaqui/MA. A pesquisa é relevante pela ausência de abordagens integradas que articulem a lógica da cadeia de negócios com o ordenamento territorial portuário em contexto de transição energética. Ao propor um modelo de cluster ancorado em análises espaciais, legais, operacionais e ambientais, este trabalho busca oferecer subsídios práticos para o planejamento urbano-industrial de portos brasileiros, sobretudo em regiões com vocação energética renovável e potencial para exportação de derivados verdes.

1.2. JUSTIFICATIVA

A crescente demanda global por fontes energéticas sustentáveis e os compromissos assumidos por diversos países no enfrentamento às mudanças climáticas impõem aos sistemas produtivos e logísticos uma reestruturação de base. No Brasil, esse cenário se mostra promissor diante de uma matriz elétrica majoritariamente renovável, de ampla disponibilidade de recursos naturais e de uma rede portuária estratégica, capaz de operar como plataforma de exportação de vetores energéticos de baixo carbono, como o hidrogênio verde. Nesse contexto, o país tem avançado na formulação de políticas públicas, como demonstram os documentos do Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2), publicados pelo Ministério de Minas e Energia, que estabelecem diretrizes para a consolidação da economia do hidrogênio no território nacional (EPE, 2022; MME, 2022).

Ainda que o tema venha sendo objeto de crescente atenção institucional, observa-se na literatura uma lacuna metodológica relevante no que tange à articulação entre a cadeia de negócios do hidrogênio verde e os territórios portuários. Os estudos existentes concentram-se, em sua maioria, nos aspectos técnico-produtivos da geração de hidrogênio, sem avançar significativamente na compreensão territorial das condições necessárias para sua viabilização em escala industrial (IEMA; Instituto E+, 2021; Ipea, 2022). Esta dissertação propõe contribuir para a superação dessa lacuna, ao desenvolver uma abordagem integrada entre o planejamento logístico-portuário e os fundamentos da cadeia de negócios do hidrogênio verde, com vistas a consolidar modelos de desenvolvimento regional sustentável.

A pesquisa apresenta, ainda, relevância prática, ao propor um método aplicável à estruturação de clusters industriais voltados à produção de hidrogênio verde em portos brasileiros. Tais clusters, se bem planejados, podem articular cadeias produtivas intensivas em inovação tecnológica e baseadas em fontes renováveis, promovendo eficiência econômica, redução de impactos ambientais e dinamização da economia local. Ao incorporar variáveis logísticas, legais, territoriais e institucionais, o modelo proposto poderá subsidiar gestores públicos e agentes privados na tomada de decisão sobre investimentos e políticas de infraestrutura sustentável.

No plano social, a pesquisa se justifica por seu potencial de contribuir para a promoção de um modelo de desenvolvimento urbano-industrial sustentável. A estruturação de um cluster portuário baseado em energia limpa pode gerar empregos qualificados, fomentar a economia verde e induzir práticas industriais de baixo carbono, em consonância com os compromissos ambientais assumidos pelo Brasil. Trata-se, portanto, de um estudo oportuno e inovador, que articula ciência aplicada, planejamento territorial e política energética no contexto portuário.

1.3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A crise climática e os compromissos internacionais firmados em prol da transição energética impõem profundas mudanças nas formas de planejamento portuário, especialmente em países como o Brasil, cuja matriz exportadora depende fortemente da infraestrutura marítima. Segundo Dantas (2016), a subutilização dos portos brasileiros está diretamente associada à ausência de planejamento estratégico integrado, à baixa capacidade de investimento e à frágil articulação entre os portos e as dinâmicas urbanas que os cercam. Em um cenário de exigências por redução de emissões e economia de baixo carbono, tais deficiências tornam-se ainda mais críticas.

A emergência do hidrogênio verde como vetor estratégico para a descarbonização das cadeias produtivas tem evidenciado a necessidade de reconverter os sistemas logísticos e industriais portuários. Entretanto, a estruturação de clusters voltados à cadeia do hidrogênio enfrenta entraves estruturais, como a carência de infraestrutura adaptada, a desarticulação entre políticas públicas setoriais e a ausência de metodologias que

considerem as especificidades territoriais da cadeia do hidrogênio (IEMA; Instituto E+, 2021; MME, 2022). Esses desafios dificultam o planejamento eficaz de plataformas logísticas energéticas nos portos nacionais

A atividade portuária, quando dissociada do ordenamento territorial e das políticas de sustentabilidade, tende a intensificar impactos ambientais significativos. Abreu (2012) destaca que os portos concentram fontes de poluição atmosférica, hídrica e sonora, comprometendo a saúde pública e o equilíbrio dos ecossistemas urbanos e costeiros. Ainda que sejam vetores logísticos indispensáveis à economia nacional, os portos brasileiros frequentemente geram pressões sobre serviços urbanos essenciais como transporte, habitação e saneamento (MONTEIRO, 2015), evidenciando a necessidade de um novo paradigma de integração entre infraestrutura e território.

No campo do planejamento produtivo, a literatura consagrou o conceito de cluster como uma estratégia para promover arranjos territoriais cooperativos e produtivos. Porter (1998) definiu clusters como concentrações geográficas de empresas interligadas por complementariedades e competição em um setor específico. Contudo, ao aplicar esse modelo ao contexto portuário, observa-se a limitação de pensar o cluster apenas como uma aglomeração de empresas em um mesmo perímetro espacial. A rigidez dessa concepção ignora as características territoriais específicas dos portos e desconsidera o papel estratégico da retroárea, que é precisamente o elo possível entre o porto e o planejamento urbano.

Martins (2013) sustenta que, no caso dos portos, o conceito de cluster deve ser adaptado à lógica territorial das cadeias logísticas e produtivas, reconhecendo a retroárea como extensão funcional do porto e como espaço potencial para instalação de indústrias limpas, centros de inovação tecnológica e infraestruturas associadas à economia verde. A ocupação estratégica dessas áreas não apenas racionaliza o uso do solo, mas também minimiza conflitos com a malha urbana, amplia a capacidade operativa do porto e favorece o uso de tecnologias ambientalmente responsáveis.

Essa perspectiva de reconfiguração territorial encontra ressonância nos estudos mais recentes sobre transição energética. A *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO, 2023) argumenta que o avanço do hidrogênio verde como vetor energético exige a criação de zonas industriais descentralizadas, conectadas ao porto, que permitam o armazenamento, a transformação e a exportação de produtos derivados. Tais zonas, quando bem planejadas, têm o potencial de reorganizar o espaço retroportuário em função das novas cadeias de valor, promovendo ganhos ambientais e sociais.

Além disso, segundo Vasconcellos e Duarte (2010), a fragmentação entre políticas urbanas e políticas portuárias tem sido um dos principais entraves para o desenvolvimento integrado das cidades portuárias brasileiras. A ausência de mecanismos institucionais que articulem essas esferas de planejamento perpetua a segregação socioespacial e a

ineficiência logística. A formação de um cluster que contemple tanto o sítio portuário quanto sua retroárea, vinculado à cadeia de negócios do hidrogênio verde, desponta como alternativa para articular a infraestrutura logística aos objetivos de sustentabilidade urbana.

Portanto, indaga-se: Como o conceito de cluster pode ser concebido para funcionar como instrumento integrador entre infraestrutura portuária, cidade e meio ambiente, especialmente quando voltado à dinâmica de produção do hidrogênio verde?

1.4. HIPÓTESE

A hipótese que fundamenta esta pesquisa considera que: A estruturação de um cluster portuário e industrial orientado ao desenvolvimento do hidrogênio verde tem o potencial de integrar o ambiente portuário ao tecido urbano e às estratégias de transição energética, promovendo sinergias ambientais, sociais e econômicas por meio da articulação entre atores logísticos, produtivos e institucionais, da racionalização de processos e do fomento à inovação de baixo carbono.

Objetivo Geral:

Desenvolvimento e aplicação de um método para a estruturação de um cluster portuário e industrial orientado a produção do hidrogênio verde, integrando o desenvolvimento urbano e a transição energética por meio da cadeia de negócios.

Objetivos Específicos:

- Analisar o papel dos portos na transição energética e na consolidação de novos arranjos produtivos territoriais.
- Examinar os fundamentos teóricos e conceituais de clusters portuários e industriais, com foco em sua função integradora entre infraestrutura, meio ambiente e desenvolvimento urbano.
- Caracterizar as potencialidades e condicionantes do Porto do Itaqui/MA para o desenvolvimento de um cluster voltado ao hidrogênio verde.
- Validar a aplicação do método a partir do estudo de caso do Porto do Itaqui/MA, avaliando seus potenciais impactos e sinergias territoriais.

1.5. METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa adota o método hipotético-dedutivo como base lógica para a construção do conhecimento. Esse método parte da formulação de um problema e de uma hipótese preliminar. A partir dessa hipótese, deduzem-se proposições e consequências lógicas, que são posteriormente confrontadas com evidências empíricas e fundamentos teóricos. Esse procedimento permite não apenas testar a validade da hipótese, mas também promover avanços conceituais e metodológicos.

O método conduz a elaboração de uma proposta método para estruturação do cluster, cujas fases são analisadas de forma progressiva. Cada fase é concebida como desdobramento lógico da hipótese central e será validada à luz de dados concretos extraídos do estudo de caso.

A aplicação empírica se dá no contexto do Porto de Itaqui, no estado do Maranhão. A análise desse território será baseada em fontes secundárias e dados públicos. A triangulação entre a revisão bibliográfica, a proposição metodológica e o estudo de caso permitirá testar a hipótese e, ao final, avaliar sua consistência teórica e sua aplicabilidade prática em contextos semelhantes.

Essa abordagem metodológica busca, portanto, não apenas responder à pergunta de pesquisa, mas também oferecer um modelo replicável de planejamento territorial voltado à economia verde, com base em uma lógica dedutiva, sustentada por evidências, e orientada à inovação.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente proposta de dissertação está organizada em quatro partes principais, com o intuito de estruturar a pesquisa de forma clara, lógica e objetiva.

A primeira etapa é composta por cinco capítulos. O **Capítulo 1** corresponde à Introdução, na qual são apresentados a contextualização do tema a partir das considerações iniciais, a justificativa da pesquisa, a caracterização do problema, a formulação da hipótese dos objetivos geral e específicos, além da descrição da metodologia e estrutura do trabalho. A revisão bibliográfica, que fundamenta teoricamente a pesquisa, é apresentada nos quatro capítulos posteriores. O **Capítulo 2** trata da conceituação dos portos enquanto infraestruturas estratégicas no contexto logístico e territorial. O **Capítulo 3** aborda os conceitos de clusters portuários. O **Capítulo 4** apresenta a cadeia de negócios como ferramenta de agregação de valor. Já o **Capítulo 5** é dedicado ao hidrogênio verde, importante vetor energético na transição para uma economia de baixo carbono. O objetivo desta etapa é consolidar o referencial teórico necessário para a formulação da proposta metodológica de estruturação do cluster.

A segunda etapa é composta por dois capítulos: o **Capítulo 6**, que apresenta o modelo conceitual do cluster portuário e estabelece a representação geral das relações entre território, infraestrutura, agentes e cadeia produtiva, e o **Capítulo 7**, que descreve o método desenvolvido para sua estruturação dividido em três fases:

1. **Identificação de Oportunidades** reúne: a caracterização do porto, com base em Nonato (2025); o levantamento da legislação urbana e portuária aplicável; e a análise da demanda, que orienta a identificação de oportunidades de negócio segundo o conceito de cadeia de negócios de Yamashita et al. (2024).
2. **Agregação de Valor** corresponde ao mapeamento e organização da cadeia de negócio do hidrogênio verde, permitindo estruturar o conjunto de agentes e processos que compõem o cluster, bem como sua elaboração.

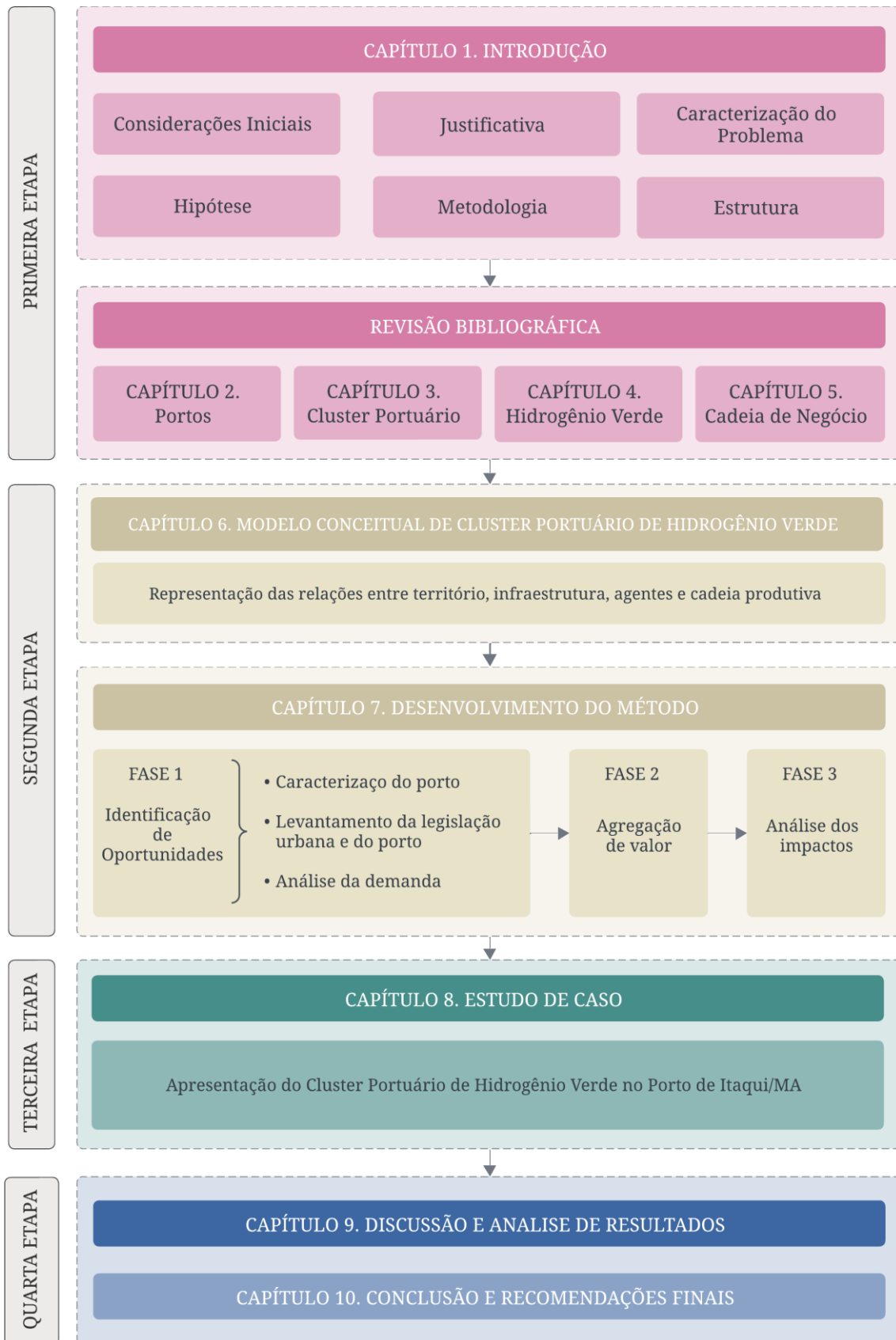
3. **Análise dos Impactos** contempla a avaliação dos impactos urbanos, sociais e ambientais decorrentes da implantação do cluster, com base em indicadores apresentados por Ferreira (2021) e Nonato (2025).

A terceira etapa, tratada no **Capítulo 8**, compreende o estudo de caso aplicado ao Porto de Itaqui/MA. Nessa fase, será realizada a aplicação do método desenvolvido nas etapas anteriores, a fim de propor o desenho esquemático de um cluster portuário de hidrogênio verde, considerando as especificidades territoriais da região.

Por fim, a quarta etapa é composta pelos Capítulos 9 e 10. O **Capítulo 9** apresenta a discussão e análise dos resultados obtidos, com o objetivo de verificar a validade da hipótese e debater as possíveis contribuições do cluster para o desenvolvimento regional sustentável. O **Capítulo 10** traz as considerações finais, destacando as conclusões da pesquisa, as limitações do estudo e as recomendações para futuras investigações e aprimoramentos do modelo proposto.

A Figura 1.6.1 apresenta o esquema metodológico adotado nesta dissertação, detalhando as etapas e procedimentos que nortearam a condução da pesquisa.

Figura 1.6.1: Estrutura da dissertação



Fonte: elaboração própria

CAPÍTULO 2. DINÂMICA PORTUÁRIA: ESTRUTURA, FUNÇÃO E INTEGRAÇÃO URBANA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo tem como objetivo analisar a dinâmica portuária a partir da compreensão de sua estrutura física, funções logísticas e articulação com o território urbano. Parte-se da premissa de que os portos, além de equipamentos estratégicos para o comércio exterior, desempenham papel determinante na configuração socioespacial das cidades em que se inserem. A abordagem enfatiza as transformações recentes associadas à globalização econômica e à crescente demanda por eficiência e sustentabilidade. Esta análise busca fornecer fundamentos para compreender o papel dos portos na transição para uma economia de baixo carbono e sua importância como infraestrutura de suporte ao desenvolvimento de novos arranjos produtivos.

Os portos são infraestruturas essenciais para a logística global, funcionando como nós estratégicos de conexão entre os modos de transporte marítimo, terrestre e aéreo. De acordo com Monié e Vidal (2006), um porto pode ser definido como um espaço geográfico dotado de infraestrutura e superestrutura adequadas para a movimentação de cargas e passageiros, desempenhando um papel crucial no comércio exterior e na dinâmica urbana das cidades portuárias. Como centros logísticos, os portos integram diversos elementos, incluindo terminais especializados, armazéns, equipamentos de movimentação de cargas e acessos rodoviários, ferroviários ou hidroviários.

Para além de sua função econômica e logística, os portos desempenham um papel fundamental na estruturação das cidades e no desenvolvimento regional. Segundo Monié e Vidal (2006), um porto não pode ser entendido apenas como uma infraestrutura isolada, mas como parte de um ecossistema urbano que influencia a mobilidade, a ocupação do solo e a geração de empregos. A interação entre porto e cidade varia conforme a configuração espacial e o modelo de governança portuária adotado, podendo resultar em diferentes padrões de integração ou segregação territorial.

Os portos podem ser classificados de acordo com diversos critérios, tais como localização, função e tipo de carga movimentada. Em relação à localização, distinguem-se os portos interiores, situados em baías ou rios, os portos costeiros, diretamente conectados ao oceano, e os portos *offshore*, que operam em plataformas marítimas distantes do continente. Já em termos de função, os portos podem ser especializados, dedicados à movimentação de cargas específicas, como contêineres, grãos, combustíveis ou veículos, ou podem ser portos multipropósito, capazes de atender a diferentes demandas logísticas simultaneamente (MONIÉ; VIDAL, 2006).

A configuração espacial dos portos é composta por três áreas principais: a infraestrutura marítima, que inclui canais de acesso, áreas de fundeio e bacias de evolução; a infraestrutura terrestre, formada por pátios de armazenamento, rodovias e ferrovias internas; e a superestrutura, composta por guindastes, esteiras transportadoras e demais

equipamentos de movimentação de carga (FERREIRA et al., 2009). A integração eficiente desses elementos é determinante para a competitividade de um porto e sua capacidade de atrair investimentos.

Outro aspecto relevante na definição de um porto é a sua *hinterlândia*, ou seja, a área de influência econômica e logística do porto. Segundo Vasconcellos e Duarte (2010), a *hinterlândia* de um porto abrange não apenas sua área imediata, mas também as regiões de produção e consumo conectadas a ele por rodovias, ferrovias e hidrovias. A eficiência da infraestrutura de acesso terrestre e a qualidade dos serviços oferecidos são fatores que determinam a competitividade de um porto e sua capacidade de atrair novos fluxos comerciais.

Os avanços tecnológicos e as transformações logísticas das últimas décadas também impactaram a caracterização dos portos. A automação portuária, o uso de *big data* e inteligência artificial na gestão das operações e a crescente adoção de práticas sustentáveis têm redefinido o conceito de porto moderno (FRANKEL, 2015). A transição para portos inteligentes e sustentáveis implica a adoção de novas tecnologias, a otimização do consumo energético e a implementação de práticas de economia circular nas atividades portuárias.

Dessa forma, os portos podem ser compreendidos como infraestruturas dinâmicas e multifuncionais, cuja relevância transcende sua função logística e abrange aspectos urbanos, ambientais e econômicos. A maneira como um porto é planejado e administrado influencia diretamente sua interação com a cidade, sua capacidade de gerar desenvolvimento e sua sustentabilidade no longo prazo. Os aspectos relacionados à infraestrutura, classificação, investimentos, legislação e função urbana dos portos serão detalhados nas seções a seguir.

2.2. INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA

Sob uma perspectiva estrutural, que considera dimensões e características da infraestrutura portuária e das operações portuárias, um porto é uma área abrigada (natural ou artificialmente) das ondas e correntes, localizada à beira de um oceano, de um mar, lago ou rio, destinada à atracação de barcos e navios, e com pessoal e serviços necessários ao carregamento e descarregamento de carga e à armazenagem temporária dessas cargas, e em alguns casos, terminais especialmente designados para acomodação de passageiros. Em consonância com este conceito, Rodrigue; Comtois; Slack (2013) apresentam o seguinte conceito:

Porto é uma interface entre os sistemas de transporte terrestre e aquaviário, dotado de infraestrutura para atracação de embarcações e de facilidades operacionais para o transbordo de passageiros e cargas.

Os autores também observam a importância das condições de abrigo da área que podem ou não estar naturalmente presentes e, não estando, é inerente ao processo de implantação

do porto a garantia das condições de abrigo e acessibilidades ao local escolhido, bem como a área de retroporto disponível e os impactos ambientais provocados.

A infraestrutura portuária é composta pelos ativos fixos sobre os quais é realizada a movimentação de cargas entre os navios e os modos terrestres, e os componentes dessa infraestrutura são definidos e classificados em função de sua imobilidade, ou seja, não podem ser colocados facilmente em uso em outros lugares ou em outras atividades.

2.2.1. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

A infraestrutura portuária é composta por diferentes elementos que asseguram a funcionalidade e a eficiência das operações logísticas. Os principais componentes são o anteporto, o porto e o retroporto, que atuam de forma complementar na recepção, movimentação e distribuição de cargas e passageiros (SILVA; COSTA, 2021).

A. ANTEPORTO

O anteporto corresponde à área de transição entre o mar aberto e as instalações portuárias, fundamental para a organização e segurança da navegação (CÉLERIER, 1962). Nessa região, ocorrem o controle de tráfego, inspeções operacionais e a adaptação das embarcações à profundidade do canal de acesso. O anteporto, também chamado de barra, delimita a entrada do porto e exige sistemas de sinalização eficientes para orientar os navios (SILVA; ALMEIDA, 2021).

O fundeadouro, ou ancoradouro de espera, é uma área regulamentada pela autoridade marítima, destinada ao ancoramento seguro das embarcações enquanto aguardam autorização para acessar o porto. A organização dessas zonas leva em conta o calado das embarcações e a demanda por serviços portuários, sendo fundamental para evitar congestionamentos e reduzir riscos operacionais (SILVA; COSTA, 2021). Um exemplo prático é o Complexo Portuário da Baía de Todos os Santos, cuja disposição das zonas de fundeio é adaptada ao porte das embarcações e às necessidades logísticas locais (COSTA, 2020).

O canal de acesso, por sua vez, conecta o mar aberto às instalações portuárias, sendo essencial para a entrada e saída segura das embarcações. Sua configuração depende das características geográficas e hidrodinâmicas do porto, exigindo dragagens periódicas para manter a profundidade operacional. O práctico, profissional especializado, orienta as manobras de entrada e saída, garantindo segurança e eficiência (SILVA; ALMEIDA, 2021).

B. PORTO

O porto propriamente dito é o núcleo operacional, onde ocorre a movimentação direta de cargas e passageiros e a integração entre os modais marítimo e terrestre. A eficiência portuária depende da capacidade de atender a diversos tipos de mercadorias e da modernização de suas instalações (COSTA, 2020). A bacia de evolução permite as

manobras de atracação e desatracação dos navios, devendo ser dimensionada conforme o porte das embarcações para garantir segurança e fluidez (SILVA; ALMEIDA, 2021).

Já a bacia de fundeio é destinada ao ancoramento prolongado de embarcações que aguardam liberação para atracação ou necessitam de reparos, sendo definida pela autoridade marítima (COSTA, 2020). O cais é a plataforma onde os navios atracam para embarque e desembarque de cargas e passageiros, conectando o transporte marítimo aos modais terrestres. Equipamentos como defensas e cabeços de amarração são indispensáveis para a segurança e estabilidade das operações, enquanto os berços de atracação otimizam o fluxo de embarcações, permitindo operações simultâneas e eficientes (OLIVEIRA, 2020; SANTOS; OLIVEIRA, 2020).

Estruturas como diques e píeres complementam a infraestrutura, oferecendo ambientes para manutenção de embarcações e alternativas para atracação em áreas de baixa profundidade ou com restrições geográficas (SANTOS; LIMA, 2020). Os *dolphins* são estruturas fixas que auxiliam na amarração e atracação, especialmente em locais onde não é viável a construção de cais completos. Dársenas, pequenas baías artificiais, proporcionam ambientes protegidos para operações de carga e descarga, otimizando o espaço portuário e a segurança das operações (SANTOS; LIMA, 2020).

C. RETROPORTO

O retroporto é a área localizada além das instalações portuárias, funcionando como espaço de apoio logístico para armazenamento e distribuição de cargas. Inclui pátios, terminais intermodais, centros de distribuição e infraestrutura de transporte terrestre, integrando o porto ao interior do território e otimizando o fluxo de mercadorias (FERREIRA; OLIVEIRA, 2019).

A infraestrutura retroportuária abrange pátios de triagem, armazéns, áreas de contêineres e prédios administrativos, essenciais para a eficiência das operações. O desenvolvimento dessas áreas permite maior flexibilidade operacional, redução de custos e aumento da segurança. A integração com rodovias, ferrovias e dutovias é crucial para evitar gargalos logísticos e garantir a fluidez das operações (OLIVEIRA; MENDES, 2021).

A falta de infraestrutura adequada nos acessos portuários pode gerar congestionamentos e comprometer a competitividade logística, como exemplificado pelo Porto de Santos. O planejamento eficaz do retroporto proporciona benefícios como a redução de congestionamentos, melhor controle aduaneiro, maior flexibilidade operacional e sustentabilidade nas operações portuárias, sendo determinante para atender à crescente demanda do comércio global (SILVA; LIMA, 2021).

2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS PORTOS

Os portos podem ser classificados com base em diversos critérios, incluindo sua localização geográfica e utilização. A posição de um porto em relação ao mar, rios ou outras formações naturais influencia diretamente sua funcionalidade, acessibilidade e

desafios operacionais. Essa classificação é essencial para compreender as particularidades de cada tipo de porto, bem como suas vantagens estratégicas e desafios específicos em termos de operação e manutenção (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2013)

2.3.1. QUANTO A LOCALIZAÇÃO

A localização dos portos determina suas condições operacionais e a infraestrutura necessária para garantir a segurança e eficiência das operações portuárias. A seguir, são apresentadas as principais categorias de portos conforme sua localização:

A. PORTOS INTERIORES

São aqueles situados no interior de baías, ao longo de rios navegáveis ou em lagunas. Esses portos oferecem condições naturais de abrigo, proporcionando proteção contra intempéries e garantindo maior estabilidade para operações de carga e descarga. No entanto, sua dependência de canais de acesso e dragagens periódicas pode representar desafios logísticos e ambientais, especialmente em regiões sujeitas ao assoreamento. Exemplos desse tipo de porto incluem o Porto de Manaus, localizado no rio Amazonas, e o Porto de Antuérpia, que opera em águas interiores conectadas ao mar. Além disso, esses portos são essenciais para o escoamento da produção agrícola e mineral, reduzindo os custos logísticos do transporte terrestre (SANTOS; OLIVEIRA, 2020).

B. PORTOS AO LARGO (*OFFSHORE*)

Caracterizam-se por estarem localizados além da linha de costa, fora da zona de arrebentação das ondas. Muitos desses portos são construídos sem abrigo natural, exigindo a instalação de estruturas artificiais, como quebra-mares, para garantir a segurança das operações. Essa configuração permite que embarcações de grande calado operem em locais onde a profundidade natural da costa não seria suficiente. Os portos *offshore* geralmente são utilizados para operações de extração e transporte de petróleo e gás natural, como o Porto do Açú, no Brasil. Um exemplo desse modelo é o Porto de Pecém, no Ceará, cujos píeres são protegidos por um quebra-mar em formato de “L”, permitindo a operação de grandes embarcações mesmo em condições marítimas adversas (COSTA; ALMEIDA, 2019).

C. PORTOS EXTERIORES

São aqueles localizados diretamente na costa, em contato com o mar aberto. Podem ser subdivididos em duas categorias principais:

- **Portos Encravados em Terra (Ganhos à Terra):** Construídos a partir de escavações que formam dársenas, canais ou bacias abrigadas, permitindo a atracação de embarcações em áreas protegidas. Esse tipo de porto é vantajoso para reduzir a exposição às condições climáticas adversas e otimizar as operações logísticas. Além disso, sua estrutura favorece a criação de zonas industriais adjacentes, impulsionando a economia regional. O Porto de Roterdã, na Holanda, é um exemplo clássico desse modelo, com extensos canais que conectam diferentes

áreas operacionais, possibilitando a movimentação eficiente de cargas entre terminais especializados (FERREIRA, 2020).

- **Portos Salientes à Costa (Ganhos à Água):** Implantados por meio de aterros que avançam sobre o mar, criando áreas operacionais e aumentando a capacidade de movimentação de cargas. Esse modelo é especialmente útil em regiões onde a geografia costeira não permite a expansão da infraestrutura em terra. O Porto do Rio Grande, no Brasil, exemplifica essa tipologia, pois sua expansão ocorreu sobre aterros marítimos, permitindo a ampliação da capacidade portuária sem comprometer áreas urbanas adjacentes. Essa configuração também favorece a instalação de terminais de contêineres e corredores logísticos eficientes, reduzindo o tempo de permanência das embarcações e otimizando o fluxo de mercadorias (SILVA; MARTINS, 2022).

A escolha do tipo de porto e sua localização estratégica são determinantes para a competitividade e eficiência do setor portuário. Fatores como condições naturais da costa, necessidade de dragagens, investimentos em infraestrutura e integração com modais de transporte terrestre e ferroviário influenciam diretamente a viabilidade e o desempenho operacional de cada tipo de porto. Dessa forma, compreender as classificações dos portos possibilita um planejamento mais eficiente e sustentável para atender às demandas do comércio marítimo global. Além disso, a escolha adequada do modelo portuário impacta diretamente a logística nacional e internacional, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência das cadeias produtivas (LIMA; SANTOS, 2021).

2.3.2. QUANTO A UTILIZAÇÃO

Os portos também podem ser classificados com base na natureza das operações que realizam e nos tipos de cargas que movimentam. Essa categorização permite compreender a especialização das infraestruturas portuárias e sua adequação às demandas logísticas de diferentes setores produtivos. A seguir, são apresentados os principais tipos de portos conforme sua utilização:

A. PORTOS DE CARGA GERAL

Destinados à movimentação de cargas fracionadas, ou seja, mercadorias que não são transportadas a granel e que necessitam de acondicionamento específico. Essas cargas podem ser embaladas em sacarias, fardos, barris, caixas, bobinas, big bags, paletes, entre outros. Em razão da diversidade de mercadorias que operam, os portos de carga geral requerem infraestrutura versátil, capaz de atender a diferentes requisitos de armazenagem e manuseio. Nos últimos anos, tem-se observado uma crescente tendência de unitização dessas cargas em contêineres, visando otimizar as operações portuárias. Um exemplo de porto de carga geral no Brasil é o Porto de Salvador, que movimenta contêineres, carga geral, veículos e granel, desempenhando um papel estratégico na logística nacional (COSTA; FERREIRA, 2020).

B. PORTOS ESPECIALIZADOS

São portos ou terminais projetados para atender a demandas específicas de movimentação de carga. Diferentemente dos portos de carga geral, esses portos possuem infraestrutura e equipamentos voltados predominantemente para determinado tipo de mercadoria, o que permite maior eficiência operacional. Entre os principais tipos de portos especializados, destacam-se:

- **Portos de Granéis Sólidos:** Movimentam cargas sem embalagem, como minérios, grãos e fertilizantes. Esses portos contam com sistemas de esteiras transportadoras e equipamentos de descarga especializados para garantir o fluxo contínuo de grandes volumes de mercadorias.
- **Portos de Granéis Líquidos:** Dedicados à movimentação de combustíveis, produtos químicos e derivados do petróleo. Possuem dutos e tanques de armazenamento apropriados para garantir a segurança das operações.
- **Portos de Contêineres:** Projetados especificamente para operações de carga containerizada, esses portos possuem terminais equipados com guindastes de alta capacidade, pátios de armazenagem e sistemas informatizados para controle logístico.
- **Portos Pesqueiros:** Voltados para a atividade pesqueira, esses portos oferecem infraestrutura para desembarque, processamento e comercialização de pescados, contribuindo para o setor de alimentos e a economia regional.

A especialização dos portos permite maior eficiência nas operações logísticas e contribui para a diversificação econômica das cidades portuárias. A escolha do tipo de porto adequado para cada região depende da vocação econômica local, da demanda de transporte e das condições geográficas disponíveis (LIMA; SANTOS, 2021).

2.3.3. QUANTO À FUNÇÃO

Além das classificações baseadas na localização e na utilização, os portos podem ser analisados a partir de sua função econômico-territorial, isto é, segundo o papel que desempenham na estrutura produtiva regional e na inserção do território nas cadeias globais de valor. Essa abordagem desloca o foco da dimensão morfológica ou operacional para a articulação entre infraestrutura, atividades produtivas e estratégias de desenvolvimento (HOYLE, 1989; RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2013). Nessa perspectiva, destacam-se duas configurações principais:

A. PORTO-INDÚSTRIA

caracteriza-se pela integração funcional entre o porto e plantas industriais localizadas em sua retroárea, formando complexos produtivos voltados à transformação e agregação de valor. O porto deixa de atuar apenas como ponto de transbordo e passa a constituir plataforma produtiva articulada a cadeias industriais específicas, como siderurgia,

petroquímica ou energia. Trata-se de um arranjo territorial associado à lógica de economias de aglomeração e de especialização produtiva (HOYLE, 1989; MONIÉ; VIDAL, 2006).

B. PORTO-PLATAFORMA LOGÍSTICA (*HUB* LOGÍSTICO):

Configura-se como nó estratégico de redes globais de transporte, com forte vocação para redistribuição de cargas e operações de transbordo, mas com menor grau de transformação industrial local. Nesse modelo, a centralidade territorial decorre da conectividade intermodal e da inserção nas rotas internacionais, reforçando o papel do porto como articulador logístico regional ou global (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2013).

Diferentemente das classificações anteriores, essas tipologias não são excludentes nem determinadas pela localização ou pelo tipo de carga movimentada. Um porto pode ser interior, exterior ou offshore e, simultaneamente, assumir função industrial ou logística conforme sua estratégia territorial e produtiva.

2.4. DIMENSÃO LEGAL

A infraestrutura portuária desempenha um papel estratégico na economia global e nacional, sendo um dos principais pilares do comércio exterior. A necessidade de modernização e expansão dos portos brasileiros, conforme preconizado pela Lei nº 12.815/2013, reflete a busca por maior eficiência e competitividade no setor. No entanto, segundo Ferreira e Lima (2021), o avanço dessa infraestrutura exige a convergência entre os interesses públicos e privados, além de um arcabouço normativo e regulatório sólido que possibilite segurança jurídica e previsibilidade para os investimentos.

A legislação portuária brasileira passou por diversas transformações ao longo dos séculos, buscando adaptar-se às mudanças na dinâmica do comércio marítimo e às novas exigências logísticas globais. O primeiro marco regulatório remonta ao Decreto nº 8.027, de 1881, que estabeleceu normas básicas para a administração e exploração dos portos nacionais. No início do século XX, a crescente necessidade de organização do setor portuário levou à criação do Departamento Nacional de Portos, Rios e Canais (DNPRC) em 1934, com a função de supervisionar e planejar o desenvolvimento da infraestrutura portuária do país.

No contexto do modelo desenvolvimentista adotado a partir da década de 1970, foi instituída a Empresa de Portos do Brasil S.A. – Portobrás, por meio da Lei nº 6.222, de 1975, com a finalidade de centralizar o planejamento, a coordenação e a gestão do sistema portuário nacional. A Portobrás consolidou um arranjo institucional centralizado, concentrando decisões estratégicas, investimentos e diretrizes operacionais. Sua extinção, em 1990, no âmbito da reforma administrativa do Estado, marcou a transição para um modelo menos centralizado e abriu caminho para a reestruturação institucional que culminaria na modernização normativa da década seguinte.

A modernização da gestão portuária teve um avanço significativo com a Lei nº 8.630/1993, conhecida como Lei dos Portos, que descentralizou a administração dos portos, permitindo maior participação da iniciativa privada na exploração e operação da infraestrutura portuária. Segundo Costa e Oliveira (2022), essa legislação foi um divisor de águas ao introduzir o modelo de concessões e arrendamentos portuários, possibilitando maior eficiência e competitividade no setor.

A atual regulação do setor está fundamentada na Lei nº 12.815/2013, que revogou a antiga Lei dos Portos e consolidou um novo marco regulatório para o setor. Essa lei estabelece diretrizes para a exploração da infraestrutura portuária, regulando concessões, arrendamentos e autorizações de terminais privados. Estão suas principais diretrizes:

- Maior participação da iniciativa privada na administração e operação dos portos.
- Criação de novas modalidades de exploração portuária, incluindo Terminais de Uso Privado (TUPs), que podem ser construídos e operados sem necessidade de licitação.
- Maior autonomia para as autoridades portuárias na gestão dos portos organizados.
- Aprimoramento da governança portuária, reforçando o papel da regulação federal e promovendo maior transparência e eficiência administrativa (FERREIRA; MARTINS, 2021).

A administração e regulação dos portos brasileiros envolvem diversas entidades que desempenham funções essenciais na formulação e implementação da política portuária, bem como na fiscalização das operações. Os principais órgãos reguladores do setor são:

- Ministério dos Portos e Aeroportos (MPor): Responsável pela formulação e implementação das políticas públicas para o setor portuário e pelo planejamento estratégico de longo prazo.
- Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ): Regula, fiscaliza e normatiza as atividades do setor, garantindo a prestação eficiente e competitiva dos serviços portuários.
- Autoridades Portuárias: Administram os portos organizados, sendo responsáveis pela gestão operacional, planejamento e desenvolvimento da infraestrutura.
- Companhias Docas: Empresas públicas vinculadas ao governo federal que gerenciam diversos portos no país, como a Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP) e a Companhia Docas do Pará (CDP).
- Conselhos de Autoridade Portuária (CAP): Fóruns consultivos que reúnem representantes do setor público e privado, atuando na formulação de políticas e diretrizes para os portos organizados.

2.5. DIMENSÃO TECNOLÓGICA

A modernização da infraestrutura portuária não pode ser dissociada dos avanços tecnológicos que permitem maior eficiência nas operações, redução de custos e otimização da gestão logística. A engenharia portuária enfrenta desafios complexos na

concepção e manutenção da infraestrutura, especialmente no que diz respeito à viabilidade econômica e ambiental de cada projeto. Segundo Oliveira e Almeida (2023), a concepção da infraestrutura portuária deve ser orientada por critérios de risco e retorno sobre investimento, garantindo que os aportes financeiros sejam direcionados a portos que possuam potencial consolidado de trocas comerciais e desenvolvimento econômico.

A integração de novas tecnologias nos portos tem sido um fator determinante na competitividade do setor. Desde a automação de terminais até a implementação de sistemas de monitoramento e controle digital, a revolução tecnológica tem permitido que os portos operem com maior precisão e eficiência. Um exemplo é a adoção de *Port Community Systems* (PCS), plataformas digitais que integram diversos agentes da cadeia logística, facilitando a troca de informações em tempo real e melhorando a gestão do tráfego de cargas (FERREIRA; COSTA, 2022).

O equilíbrio entre inovação e viabilidade econômica é um dos principais desafios da modernização portuária. Para Silva e Martins (2022), o setor público tende a apresentar maior resistência à adoção de novas tecnologias devido às limitações orçamentárias e processos administrativos mais rígidos. Já o setor privado, por estar diretamente vinculado à competitividade global, investe constantemente em soluções inovadoras para reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência logística.

Outro aspecto fundamental da modernização portuária é a sustentabilidade. A transição para portos verdes (*green ports*) tem sido uma prioridade global, com investimentos em fontes de energia renováveis, eletrificação de equipamentos e políticas de redução de emissões de carbono. Em países como Holanda e Cingapura, os portos já operam com diretrizes ambientais rigorosas, tornando-se referências na implementação de práticas sustentáveis (NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021).

No Brasil, a modernização tecnológica dos portos ainda avança de forma desigual. Enquanto alguns terminais já adotam práticas de automação avançada, outros ainda dependem de processos tradicionais e pouco eficientes. A criação de incentivos para inovação, o fortalecimento da governança digital e a integração dos portos brasileiros às cadeias logísticas globais são medidas essenciais para garantir que o país acompanhe a evolução do setor portuário internacional.

2.6. TÓPICOS CONCLUSIVOS

Os portos consolidam-se como nós estratégicos das redes de transporte, conectando modais marítimos, terrestres e, em alguns casos, aéreos, e garantindo a fluidez do comércio exterior. Ao mesmo tempo, sua inserção no tecido urbano os caracteriza como elementos estruturantes da cidade, influenciando padrões de uso do solo, mobilidade e organização socioespacial das regiões portuárias.

A decomposição em anteporto, porto e retroporto evidencia que a eficiência logística depende de uma arquitetura integrada, na qual canais de acesso, bacias, cais e zonas retroportuárias funcionam de maneira articulada. A noção de *hinterlândia* reforça que a

competitividade de um porto não se limita à área molhada, mas envolve sua rede de conexões terrestres e a capacidade de organizar corredores logísticos para amplos espaços de produção e consumo.

A classificação dos portos por localização (interiores, *offshore*, exteriores) e por utilização (carga geral, especializados) demonstra que diferentes soluções de implantação e desenho físico respondem a condicionantes geográficos, econômicos e operacionais. Essa tipologia permite alinhar vocações regionais e perfis de carga à infraestrutura disponível, orientando decisões de investimento, estratégias de especialização e políticas públicas de desenvolvimento logístico-industrial.

A evolução normativa – do Decreto nº 8.027/1881 à Lei nº 12.815/2013 – mostra um movimento gradual de modernização, abertura ao capital privado e redefinição de papéis entre União, autoridades portuárias e operadores. O atual marco regulatório busca articular expansão e modernização da infraestrutura com maior concorrência, segurança jurídica e transparência, elementos indispensáveis para destravar investimentos e elevar a competitividade do sistema portuário brasileiro.

A incorporação de automação, sistemas digitais e soluções de monitoramento em tempo real redefine o porto como plataforma inteligente, capaz de operar com maior precisão, menor custo e melhor coordenação entre atores logísticos. Paralelamente, a agenda de “*green ports*” aponta para a convergência entre inovação tecnológica, eficiência energética e redução de emissões, reposicionando os portos como vetores centrais da transição para uma economia de baixo carbono.

Ao integrar dimensões física, funcional, jurídica, tecnológica e ambiental, o capítulo evidencia que os portos são infraestruturas dinâmicas e multifuncionais, cuja governança influencia diretamente desenvolvimento urbano, regional e competitividade nacional. Esses elementos constituem o alicerce para, em capítulos posteriores, tratar os portos como bases materiais e institucionais para a formação de clusters logístico-industriais e de novos arranjos produtivos associados, inclusive, à economia de baixo carbono e ao hidrogênio verde.

CAPÍTULO 3. CLUSTERS PORTUÁRIOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como objetivo discutir os conceitos de cluster no contexto do planejamento territorial e da integração logística-industrial. A partir da teoria dos clusters e de sua adaptação à realidade portuária, analisa-se como a concentração geográfica de agentes interdependentes pode fomentar inovação, ganhos de escala e desenvolvimento regional.

Este capítulo apresenta os conceitos de cluster e cadeia de negócios no contexto do planejamento territorial e da integração logístico-industrial, com foco especial no ambiente portuário marítimo e na transição energética. Embora existam múltiplos tipos de clusters na literatura, o termo cluster portuário já se consolidou para descrever aglomerações em que a necessidade de importação e exportação de produtos exige um complexo processo logístico-operacional dentro e no entorno do porto, agregando serviços de transporte, armazenagem, indústria de apoio, financiamento, tecnologia e regulação.

Nessa perspectiva, compreender o conceito de cluster portuário, suas fronteiras e limitações analíticas é fundamental, pois ele funciona como instrumento viabilizador da produção, circulação e exportação do hidrogênio verde e de outros vetores energéticos sustentáveis, ao articular infraestrutura física, operadores logísticos, cadeias industriais e mercados globais. A articulação entre cluster portuário e cadeia de negócios permite enxergar o porto não apenas como nó logístico, mas como plataforma territorial de agregação de valor, onde empresas compartilham ativos, conhecimento e riscos ao longo de toda a rota do hidrogênio verde, desde a geração renovável até os usos finais industriais e energéticos.

A integração desses conceitos sustenta a proposta metodológica deste trabalho, orientada a analisar como a configuração de um cluster industrial portuário pode alavancar projetos de hidrogênio verde, organizar corredores logísticos verdes e ancorar estratégias de reindustrialização e desenvolvimento regional sustentável. Assim, o capítulo estabelece as bases teóricas e territoriais necessárias para, nos tópicos seguintes, detalhar dinâmicas espaciais, características estruturais e operacionais, impactos socioeconômicos, além dos desafios de governança, inovação e sustentabilidade associados a clusters voltados à economia de baixo carbono.

3.2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS E EVOLUÇÃO DA TEORIA DOS CLUSTERS

O estudo dos clusters, presente na economia e na geografia urbana, busca compreender como a concentração de empresas e instituições em um mesmo território pode impulsionar o desenvolvimento econômico e social. De acordo com Porter (1998), os

clusters são definidos como aglomerações de empresas e instituições interconectadas que atuam em um mesmo campo, promovendo ganhos de eficiência, inovação e competitividade. Esses agrupamentos podem ocorrer em diversos setores, desde a indústria manufatureira até os serviços de alta tecnologia, influenciando a dinâmica econômica de regiões e países.

Do ponto de vista econômico, os clusters são motores de inovação e competitividade regional. A concentração de empresas em uma determinada área permite a criação de economias de escala, o desenvolvimento de uma força de trabalho especializada e o fortalecimento das redes de fornecedores. Esses fatores são essenciais para a geração de vantagens competitivas sustentáveis, permitindo que determinadas regiões se tornem referências em setores específicos no cenário global (PORTER, 1998). Além disso, a proximidade entre empresas facilita a disseminação de conhecimento e inovação, criando um ambiente propício ao desenvolvimento tecnológico e ao aprimoramento dos processos produtivos (AUDRETSCH & FELDMAN, 2004).

Os impactos sociais dos clusters também são significativos. Segundo Storper (1997), a formação de clusters pode estimular a geração de empregos qualificados e fortalecer a coesão social, uma vez que as oportunidades econômicas se expandem localmente. Nas cidades, os clusters urbanos ajudam a moldar o tecido econômico e social, transformando determinadas áreas em centros dinâmicos de inovação e crescimento sustentável. A globalização e o avanço das tecnologias de comunicação intensificaram esse fenômeno, tornando a análise dos clusters essencial para o planejamento urbano e a formulação de políticas públicas eficazes (GLAESER, 2011).

O termo "cluster" foi popularizado por Michael Porter na década de 1990, embora suas raízes estejam em teorias econômicas anteriores, como as de Alfred Marshall no final do século XIX. Marshall introduziu o conceito de "distritos industriais", descrevendo áreas onde empresas de um mesmo setor se concentram geograficamente, resultando em economias de escala e de aglomeração. Ele destacou três vantagens principais dessas concentrações: a criação de uma força de trabalho especializada, a presença de fornecedores especializados e a rápida difusão de inovações e conhecimentos (MARSHALL, 1890).

Primeiramente, a criação de uma força de trabalho especializada ocorre devido à alta demanda por habilidades específicas, o que atrai e forma trabalhadores com competências direcionadas às necessidades das empresas do cluster. Em segundo lugar, a presença de fornecedores especializados é facilitada pela proximidade geográfica, permitindo que as empresas obtenham insumos e serviços específicos com maior eficiência e menor custo. Por fim, a rápida difusão de inovações e conhecimentos é promovida pela constante interação entre as empresas e os trabalhadores, que compartilham experiências e tecnologias, acelerando o processo de inovação dentro do cluster.

Porter, por sua vez, expandiu a noção de clusters ao vinculá-la à competitividade regional e nacional. Para ele, clusters são "concentrações geográficas de empresas inter-relacionadas, fornecedores especializados, prestadores de serviços, empresas em setores

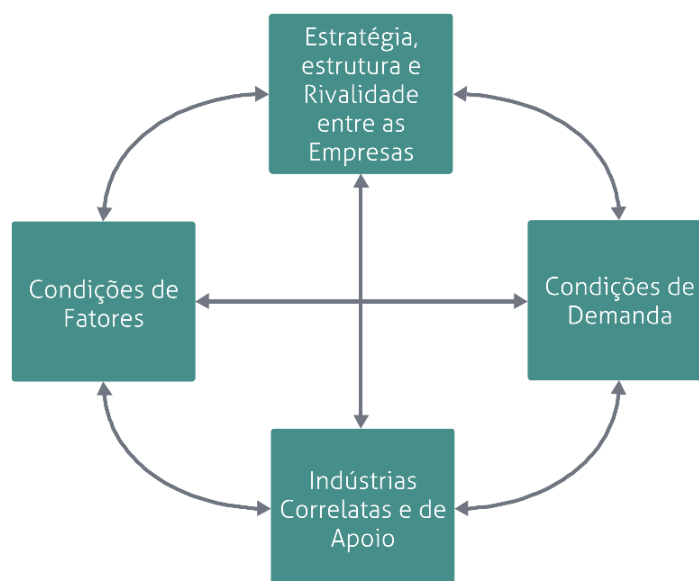
correlatos e instituições associadas (como universidades, agências de normatização e associações comerciais) em determinados campos que competem, mas também cooperam" (Porter, 1998). A teoria de Porter enfatiza a importância das interações entre as empresas e instituições para a inovação e a produtividade, contribuindo para a competitividade de um determinado local.

O autor desenvolve a relação entre a teoria de clusters e a formação da vantagem competitiva por meio de quatro fatores determinantes, que compõem um sistema conhecido como o "diamante de Porter". Os fatores determinantes da vantagem competitiva no modelo do diamante são:

- **Condição dos Fatores:** Contrariando a premissa de que a vantagem competitiva de uma nação se baseia em fatores de produção herdados, como mão-de-obra, terra, recursos naturais, capital e infraestrutura. Porter argumenta que uma economia avançada cria os fatores de produção mais relevantes para sua competitividade. Isso inclui trabalho especializado e infraestrutura avançada, essenciais para competir em determinadas indústrias.
- **Condições de Demanda:** A natureza da demanda interna é mais crucial do que seu tamanho. Demandas provenientes de consumidores exigentes obrigam as empresas a continuamente superar desafios, proporcionando uma visão clara e antecipada das necessidades emergentes do mercado.
- **Indústrias Correlatas e de Apoio:** A presença de indústrias fornecedoras e correlatas internacionalmente competitivas é outra fonte de vantagem. Essas indústrias podem fornecer métodos de produção avançados e promover a inovação e a atualização tecnológica.
- **Estratégia, Estrutura e Rivalidade das Empresas:** Este fator refere-se às condições nacionais que influenciam a criação, organização e gestão das empresas, bem como a natureza da rivalidade interna. A intensa concorrência doméstica estimula as empresas a inovar e melhorar continuamente.

Porter argumenta que esses quatro fatores interagem de maneira dinâmica, criando um ambiente propício para o desenvolvimento da competitividade dos clusters. A Figura 3.2.1 apresenta o diagrama do diamante de Porter:

Figura 3.2.1: Diamante de Porter



Fonte: adaptado de Porter (1998).

3.3. DINÂMICAS ESPACIAIS DO CLUSTER PORTUÁRIO

Os clusters portuários têm se consolidado como elementos fundamentais para o desenvolvimento econômico e a competitividade logística, especialmente em regiões costeiras. Conceituados como aglomerações geográficas de empresas inter-relacionadas, instituições e infraestruturas voltadas às atividades portuárias, esses clusters promovem interações que aumentam a eficiência operacional e criam oportunidades de inovação e cooperação estratégica (CUTRIM, 2017). No cenário contemporâneo, marcado por uma crescente interdependência global e desafios econômicos e ambientais, a criação e desenvolvimento desses clusters surgem como uma resposta estratégica para lidar com uma ampla gama de desafios socioeconômicos.

Historicamente, os portos foram descritos como interfaces entre o mar e a terra, desempenhando um papel central no transporte e comércio. Contudo, a globalização e a inovação tecnológica ampliaram o escopo dessas estruturas, deslocando o foco para uma abordagem mais integrada e sistêmica. Nesse contexto, os clusters portuários tornaram-se centrais na análise das dinâmicas econômicas e sociais que moldam as regiões portuárias (BRITO, SILVA; 2019). Além de facilitar o comércio internacional, os clusters contribuem significativamente para o desenvolvimento regional, elevando o nível de emprego, atraindo investimentos, gerando renda local e aumentando a arrecadação tributária (BRITO, SILVA; 2019).

A economia mundial, nas últimas décadas, experimentou uma aceleração nas trocas comerciais, impulsionada por uma crescente demanda global e avanços tecnológicos. Nesse cenário, os portos deixaram de ser meros pontos de entrada e saída de mercadorias para se tornarem *hubs* multifuncionais de atividade econômica. De acordo com Smith et al. (2020):

Um cluster portuário não se limita às operações de carga e descarga; ele abrange um ecossistema complexo de empresas, serviços e infraestruturas interconectados, desde operadores portuários e empresas de logística até indústrias de manufatura e tecnologia.

Essa transformação reflete uma mudança estratégica: os clusters portuários agora são vistos como centros neurálgicos na geração de valor econômico. Eles desempenham um papel essencial na otimização das cadeias de suprimento, melhoria da eficiência logística e promoção de práticas sustentáveis. Como observado pela OECD (2014):

Esses clusters não apenas agregam valor às operações portuárias, tornando-as mais eficientes e sustentáveis, mas também geram oportunidades econômicas significativas.

Ademais, os clusters portuários integram-se às estratégias nacionais de desenvolvimento econômico, consolidando políticas industriais e de comércio exterior (FERREIRA, 2021). Essa relevância decorre de sua capacidade de criar ecossistemas de inovação e colaboração, essenciais para a competitividade em um mercado global dinâmico. A OECD (2021) destaca que a crescente interdependência econômica entre as nações é uma característica marcante do cenário atual, impulsionada pela globalização e pelas tecnologias de informação, e os clusters portuários são cruciais para lidar com essas dinâmicas.

Portanto, os clusters portuários representam não apenas uma solução para os desafios impostos pela economia global, mas também uma oportunidade de capitalizar sobre novas realidades socioeconômicas. A integração das atividades portuárias em um contexto mais amplo de desenvolvimento regional e global reforça seu papel estratégico como catalisadores de crescimento econômico, inovação e sustentabilidade.

3.4. CONCEITO E EVOLUÇÃO DOS CLUSTER PORTUÁRIOS

A noção de cluster portuário, embora recente, integra-se à evolução dos sistemas portuários e logísticos, que gradualmente passaram a ser vistos como componentes essenciais das redes globais de produção e comércio. O conceito de cluster remonta às teorias econômicas de Michael Porter sobre aglomerações geográficas de empresas interligadas que competem e colaboram em um campo específico, proporcionando benefícios competitivos por meio de economias de escala, eficiência e inovação (PORTER, 1998).

Quando aplicado ao setor portuário, o cluster abrange empresas, organizações e instituições localizadas nas áreas adjacentes aos portos, engajadas em atividades como movimentação de cargas, logística, transporte e serviços industriais e comerciais (DE LANGEN, 2003). Um cluster portuário é muito mais do que apenas um conjunto de instalações e serviços em um porto; é um ecossistema complexo que desempenha um papel vital na economia global. Diversos autores ao longo do tempo têm contribuído com diferentes definições e perspectivas sobre o que constitui um cluster portuário, refletindo a multifacetada natureza desse conceito.

De Langen (2003) definiu um cluster portuário como um agrupamento estratégico de empresas, organizações e instituições em uma região portuária, promovendo cooperações, eficiência operacional e competitividade, impulsionando o desenvolvimento econômico da área. Notteboom & Rodrigue (2005), por outro lado, enfatizaram a concentração de atividades marítimas e logísticas em uma área geográfica específica, envolvendo interações entre operadores, empresas de transporte, infraestrutura e serviços, visando melhorar a eficiência da cadeia de suprimentos e a competitividade portuária.

Pallis & De Langen (2010) trouxeram a perspectiva de uma rede interconectada de empresas, agências governamentais, fornecedores e prestadores de serviços que compartilham recursos e colaboram em uma determinada região portuária. Essa colaboração promove a competitividade, inovação e desenvolvimento econômico local. Ng et al. (2016) acrescentaram que um cluster portuário é uma concentração estratégica de atividades portuárias e logísticas em uma região, com o objetivo de maximizar eficiência, competitividade e inovação por meio da colaboração entre membros, incluindo operadores portuários, empresas de transporte e autoridades portuárias.

Smith et al. (2020) destacaram a concentração geográfica de empresas, instituições e serviços relacionados ao transporte marítimo e à logística, que operam em estreita proximidade física e colaborativa, facilitando a troca de conhecimento, inovação e eficiência nas operações portuárias. Por fim, Rodrigue et al. (2017) descreveram os clusters portuários como ecossistemas complexos de empresas, organizações e infraestruturas relacionadas, situados em uma área geográfica específica, que otimizam logística, distribuição e gestão de cargas por meio da proximidade física.

A proximidade geográfica é uma característica essencial dos clusters portuários, pois facilita a interação entre diferentes agentes econômicos, como operadores portuários, indústrias locais, fornecedores de serviços logísticos e instituições públicas. Essa proximidade reduz custos de transporte e comunicação, além de permitir maior agilidade na resposta às demandas do mercado. Por exemplo, empresas situadas próximas a um cluster podem compartilhar infraestrutura e recursos, otimizando o uso de terminais, armazéns e sistemas de transporte (DE LANGEN, 2003).

A interconexão econômica refere-se à relação entre os diversos atores que compõem o cluster. Essa interdependência econômica cria um ambiente no qual o desempenho de uma organização influencia diretamente os resultados das outras. Em clusters portuários, essa interconexão é evidente na cadeia logística, onde operadores portuários dependem de serviços de transporte terrestre e marítimo, enquanto as indústrias locais utilizam as operações do porto como ponto estratégico para exportação e importação. Essa relação integrada fomenta a eficiência, reduz custos operacionais e estimula a inovação tecnológica e organizacional (HAEZENDONCK, 2001).

A funcionalidade diversificada é outro componente-chave, indicando a ampla gama de atividades realizadas dentro do cluster. Além das operações portuárias primárias, que incluem a movimentação de cargas e a gestão de terminais, os clusters portuários também abrigam atividades secundárias, como o processamento industrial de produtos, e

terciárias, como serviços financeiros, comerciais e tecnológicos. Essa diversidade funcional permite que os clusters atendam a uma variedade de necessidades econômicas, tornando-os centros de desenvolvimento e inovação.

Ao combinar essas três características, os clusters portuários não apenas aumentam a competitividade dos portos, mas também contribuem para o desenvolvimento econômico e social das regiões em que estão inseridos. A integração de atividades primárias, secundárias e terciárias em um espaço geográfico restrito promove economias de escala e escopo, além de criar um ambiente favorável à troca de conhecimento e à colaboração estratégica entre os atores. Assim, os clusters portuários se estabelecem como pilares fundamentais para o comércio global e a conectividade logística em um mundo cada vez mais interdependente.

Historicamente, os portos desempenharam papéis de conexão entre sistemas marítimos e terrestres. No entanto, transformações tecnológicas e a intensificação da globalização na segunda metade do século XX reposicionaram os portos como nós essenciais nas cadeias logísticas globais. Esses fatores levaram ao surgimento do conceito de *port city* (cidade-portuária), onde a interdependência entre porto e cidade se torna mais evidente, influenciando não apenas a economia local, mas também a organização espacial (DUCRUET, 2011; CRUZ, LEAL E PINHO, 2016).

O modelo de clusters portuários evoluiu em resposta às demandas contemporâneas por eficiência logística e integração modal. A implementação de sistemas de transporte intermodal, aliados a políticas públicas voltadas para a modernização portuária, têm favorecido a formação de clusters em países europeus onde a combinação de infraestrutura avançada e governança eficaz resultou em portos altamente competitivos (FERREIRA, 2021; SOUZA, 2017).

No Brasil, a concepção e o desenvolvimento de clusters portuários ainda enfrentam desafios estruturais e institucionais. A falta de integração entre políticas industriais e comerciais, combinada com a insuficiência de investimentos em infraestrutura, limita a plena realização do potencial competitivo dos portos brasileiros. Apesar disso, casos como o Porto de Santos e o Complexo Industrial e Portuário de Suape demonstram que os clusters podem contribuir significativamente para o desenvolvimento regional e nacional, destacando-se como uma estratégia viável para superar gargalos logísticos e promover a reindustrialização do país (SOUZA, 2017; DE LANGEN, 2003).

3.5. CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E OPERACIONAIS

Os clusters portuários são estruturas logísticas altamente especializadas que operam de maneira integrada para garantir eficiência, competitividade e sustentabilidade. Compreendem um conjunto de elementos interdependentes, incluindo infraestrutura física, capital humano qualificado, integração logística, governança e redes de colaboração. A compreensão detalhada desses componentes permite analisar a

complexidade e a relevância dos clusters portuários no cenário econômico global (NOTTEBOOM & RODRIGUE, 2021).

A infraestrutura física é o alicerce dos clusters portuários, englobando instalações portuárias, acessos logísticos e equipamentos especializados. Os terminais de carga são projetados para movimentação eficiente de diferentes tipos de mercadorias, como contêineres, grãos, combustíveis e produtos químicos. Além disso, armazéns e pátios de estocagem desempenham papel essencial na organização e gestão das cargas. A infraestrutura de acesso terrestre – composta por rodovias, ferrovias e hidrovias – conecta o porto à sua retroárea e às regiões produtoras. A infraestrutura dos canais marítimos também é fundamental, garantindo a entrada de navios de grande porte. Portos internacionais como Hamburgo demonstram boas práticas nesse aspecto (RODRIGUE, 2020).

O capital humano qualificado é um fator estratégico para a operação e desenvolvimento dos clusters portuários. Profissionais altamente treinados, como operadores de guindastes, gestores logísticos e especialistas em automação, garantem a eficiência e segurança das operações. A capacitação contínua é essencial para acompanhar a crescente complexidade tecnológica nos portos modernos. Cingapura, por exemplo, investe fortemente na formação de mão de obra técnica especializada, o que contribui para sua posição de liderança na eficiência portuária (COSTA, ALMEIDA, 2021).

A integração logística dos portos às cadeias globais de suprimentos é um fator determinante para sua eficiência. Essa integração ocorre por meio da combinação de diferentes modos de transporte. Portos altamente integrados, como Roterdã, utilizam sistemas de gestão avançados para sincronizar operações terrestres e marítimas, reduzindo atrasos e minimizando custos operacionais. No Brasil, a excessiva dependência do modal rodoviário é um entrave significativo para a eficiência logística (FERREIRA, LIMA, 2022).

3.6. IMPACTOS SOCIAIS E ECONÔMICOS

Os clusters portuários têm um importante papel no desenvolvimento de regiões costeiras, exercendo influência sobre as economias locais e nacionais, além de impactarem as estruturas sociais. Segundo Talley (2009), esses clusters são essenciais para o crescimento econômico sustentável, uma vez que facilitam fluxos comerciais e impulsionam cadeias produtivas.

Do ponto de vista econômico, os clusters portuários são motores de crescimento ao promoverem a eficiência nas operações logísticas e a atração de investimentos. A proximidade entre agentes econômicos no cluster reduz os custos de transação e favorece a inovação, criando um ambiente propício à expansão de negócios. Como destaca Souza (2017), essa cooperação entre empresas e instituições fomenta o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas logísticas que aumentam a competitividade dos portos e suas retroáreas. Para Haezendonck (2001), a formação de redes colaborativas dentro dos

clusters também melhora a resiliência econômica, permitindo uma rápida adaptação às dinâmicas do comércio global.

Além disso, os clusters portuários desempenham um papel estratégico na balança comercial de países exportadores e importadores. Segundo Ferreira (2021), eles facilitam o escoamento de produtos agrícolas, industriais e minerais, conectando economias locais a mercados globais. No Brasil, os portos de Santos e Paranaguá exemplificam essa dinâmica, movimentando volumes expressivos de exportações de grãos e minério, e destacam-se na cadeia de valor global.

A geração de empregos também é um impacto econômico relevante. Clusters portuários criam oportunidades de trabalho em diversos níveis de qualificação, desde posições operacionais em portos até empregos especializados em empresas de logística e tecnologia. Esses empregos são essenciais para dinamizar as economias locais, aumentando a renda disponível e estimulando o consumo nas comunidades circundantes.

No âmbito social, os clusters portuários contribuem para a modernização de cidades e regiões portuárias, criando polos de desenvolvimento. Segundo Ducruet (2011), a geração de empregos estáveis e qualificados é um dos principais benefícios, reduzindo índices de desemprego e melhorando a qualidade de vida das populações locais. Além disso, a presença de clusters portuários impulsiona a oferta de capacitação profissional e o fortalecimento do capital humano, resultando em impactos positivos no longo prazo.

Entretanto, os impactos sociais dos clusters portuários nem sempre são uniformemente positivos. Como argumenta Souza (2017), a expansão de infraestruturas portuárias pode levar ao deslocamento de comunidades vulneráveis, resultando em conflitos sociais e pressão sobre os sistemas urbanos. Problemas como o aumento do tráfego, poluição e desigualdades no acesso a benefícios econômicos são frequentemente mencionados como desafios na integração entre porto e cidade. Esses desafios podem ser mitigados por meio de políticas públicas que promovam um planejamento urbano integrado e sustentável (FERREIRA; 2021).

Ainda assim, a integração estratégica entre clusters portuários e políticas públicas pode mitigar os efeitos negativos e maximizar os benefícios sociais. De acordo com De Langen (2003), parcerias público-privadas e investimentos em infraestrutura urbana, saúde e educação nas cidades portuárias são exemplos de ações que potencializam os impactos positivos para a sociedade. Os clusters portuários, quando geridos de maneira sustentável e integrada, têm o potencial de transformar realidades econômicas e sociais. Como destacado por Talley (2009), além de impulsionar o desenvolvimento regional, esses clusters promovem a inclusão social e a redistribuição de renda.

3.7. CONTEXTO GLOBAL E BRASILEIRO

No cenário internacional, exemplos como o Porto de Roterdã na Holanda e o Porto de Cingapura destacam-se por sua eficiência operacional, governança inovadora e integração com cadeias globais de valor. Ambos seguem o modelo de governança no qual a

autoridade portuária desempenha funções estratégicas e regulatórias, enquanto a operação é delegada a empresas privadas. Essa abordagem permite maior flexibilidade e adaptabilidade às demandas do mercado (SOUZA, 2017).

O Porto de Roterdã é um caso emblemático, atuando como um instrumento básico da política industrial holandesa. Sua infraestrutura avançada e governança integrada o posicionam como um dos principais hubs logísticos da Europa. Ele conecta mercados europeus a rotas marítimas globais, beneficiando-se de um regime jurídico dinâmico que permite a maximização de ativos portuários e a atração de investimentos estratégicos (SOUZA, 2017).

Ainda no panorama internacional, portos como Hamburgo e Antuérpia, são referências não apenas em movimentação de cargas, mas também em sua capacidade de integrar funções logísticas e industriais. O Porto de Hamburgo, na Alemanha, destaca-se como um dos mais inovadores da Europa, com forte adoção de tecnologias digitais, como sistemas de gestão portuária e logística integrada. Sua conexão com a indústria local e sua integração com as cadeias de suprimentos globais são exemplos de como os clusters portuários podem alavancar economias regionais. De forma semelhante, o Porto de Antuérpia, na Bélgica, é um exemplo de eficiência e sustentabilidade, com investimentos significativos em práticas ecológicas, como energia renovável e manejo de resíduos. Esses portos não apenas lideram em volume de movimentação, mas também em estratégias de governança que conectam as operações portuárias às políticas industriais e ambientais nacionais e regionais.

Outro caso internacional relevante é o cluster logístico da Valônia, na Bélgica, que demonstra como as áreas portuárias podem ser transformadas em centros integrados de comércio e logística. Valônia conecta diferentes modais de transporte utilizando portos fluviais como âncoras de desenvolvimento regional. Sua estrutura organizacional promove colaboração entre o setor público e privado, impulsionando o desenvolvimento econômico local e a integração logística regional.

Por outro lado, o Brasil possui propostas promissoras de clusters portuários, como os portos de Santos e Suape, que, embora ainda não se configurem como clusters plenamente desenvolvidos e competitivos, apresentam potencial significativo para atingir esse patamar. O Porto de Santos, o maior do país, movimenta mais de 27% das cargas transportadas no território nacional, desempenhando um papel central no comércio exterior brasileiro (ANTAQ, 2023). No entanto, enfrenta desafios relacionados à governança fragmentada e à falta de integração modal, que limitam seu pleno potencial (CRUZ, LEAL E PINHO, 2016).

No Brasil, os portos de Itaqui e Pecém ilustram a diversidade e os desafios dos clusters portuários nacionais. O Porto de Itaqui, localizado no Maranhão, é um dos mais estratégicos para a exportação de grãos e produtos agrícolas, devido à sua proximidade com o chamado Arco Norte. Apesar de sua importância crescente, enfrenta limitações em infraestrutura de transporte terrestre. Por outro lado, o Porto de Pecém, no Ceará, posiciona-se como um hub de inovação industrial, com a instalação de uma Zona de

Processamento de Exportação (ZPE) e parcerias que visam integrar operações portuárias com indústrias de alta tecnologia.

Esses esforços demonstram como o Brasil busca replicar boas práticas internacionais, ao mesmo tempo em que enfrenta gargalos institucionais e estruturais que limitam sua eficiência operacional. Políticas como a Nova Lei dos Portos (Lei 12.815/2013) e o Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP) representam avanços significativos nesse cenário. Essas ações têm como objetivo modernizar a gestão portuária, promover parcerias público-privadas e fomentar a integração logística, criando condições favoráveis para a consolidação de clusters portuários competitivos.

A Nova Lei dos Portos trouxe avanços importantes para a governança e gestão dos portos brasileiros. Entre suas principais medidas está a flexibilização na contratação de terminais privados e a ampliação das possibilidades de parcerias público-privadas (PPPs). A lei também simplificou os processos de licitação e concessão, buscando atrair maior investimento privado e reduzir a burocracia associada à expansão portuária. Além disso, ela estabeleceu o conceito de "Autoridade Portuária Nacional", com o objetivo de centralizar a regulação e proporcionar maior padronização nos procedimentos portuários.

O Plano Nacional de Logística Portuária, por sua vez, é uma ferramenta estratégica para identificar e mitigar gargalos logísticos nos portos brasileiros. Ele enfatiza a necessidade de integração modal e prioriza investimentos em infraestrutura que conectem os portos às cadeias de suprimentos globais. Entre suas ações destacam-se a modernização de terminais, a expansão da capacidade ferroviária e a digitalização de processos portuários. Esses esforços têm como objetivo aumentar a competitividade dos portos brasileiros em um cenário global cada vez mais dinâmico e desafiador.

A consolidação dos clusters portuários, tanto no Brasil quanto no cenário internacional, demonstra um processo dinâmico de adaptação às demandas contemporâneas e superação de desafios relacionados a questões institucionais, estruturais e tecnológicas. Esse debate sobre inovação e sustentabilidade nas operações portuárias será aprofundado no tópico seguinte, que aborda como tecnologias emergentes e práticas ambientais sustentáveis podem redefinir o papel dos clusters portuários no futuro.

3.8. SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO

Os clusters portuários têm investido na adoção de tecnologias inovadoras, motivados pela necessidade de modernização, pela busca por maior eficiência operacional e pela redução dos impactos ambientais. O desenvolvimento de tecnologias para a descarbonização é um dos focos centrais dessa discussão. Para Sousa, Fiche e Sato (2023), a eletrificação de guindastes, caminhões e embarcações que operam nos portos, aliada ao uso de combustíveis alternativos como hidrogênio verde e biocombustíveis, representa uma transformação significativa para a sustentabilidade ambiental dos clusters portuários. Projetos como o *Green Hydrogen Industrial Cluster* (GHIC), promovidos pela UNIDO, demonstram o potencial dessas tecnologias para transformar os portos em hubs

sustentáveis de energia renovável. Além disso, a instalação de infraestrutura para o uso de energias limpas pode impulsionar a transição energética no setor de transportes marítimos (CRUZ, LEAL E PINHO; 2016).

A sustentabilidade ambiental nos clusters portuários é uma questão imediata, dada a escala das operações logísticas e seu impacto no meio ambiente. De acordo com Souza (2017), portos como Hamburgo e Antuérpia lideram em práticas de sustentabilidade, implementando sistemas de captação de carbono e infraestrutura para o uso de combustíveis alternativos. Além disso, esses portos utilizam energia renovável para alimentar suas operações, reduzindo a pegada de carbono e contribuindo para as metas de descarbonização estabelecidas internacionalmente.

No Brasil, iniciativas para a sustentabilidade portuária ainda estão em desenvolvimento. Segundo Sousa, Fiche e Sato (2023), programas como o Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP) destacam a necessidade de incluir práticas sustentáveis no planejamento estratégico dos portos. A instalação de infraestrutura para a coleta de resíduos de embarcações e a gestão eficiente de águas residuais são exemplos de ações fundamentais para mitigar os impactos ambientais e adequar os portos brasileiros às diretrizes internacionais de sustentabilidade.

Portos organizados, como Pecém e Itaqui, estão começando a incorporar elementos de sustentabilidade em seus planos de expansão. Conforme Souza (2017), no Porto de Itaqui, a proximidade com áreas de produção agrícola permite a instalação de unidades de processamento próximas, reduzindo a necessidade de transporte de longa distância. No Porto de Pecém, o investimento em infraestrutura para o hidrogênio verde demonstra como os clusters podem ser transformados em centros de inovação sustentável, conectando a indústria portuária às tendências globais de transição energética.

As novas tecnologias e estratégias de sustentabilidade ambiental estão moldando uma nova era para os clusters portuários. Essas inovações não apenas redefinem as práticas operacionais, mas também destacam a interdependência entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental (SOUSA; FICHE; SATO, 2023). As transformações em curso demonstram que o futuro desses arranjos logísticos será moldado por inovações tecnológicas, práticas sustentáveis e adaptação às demandas de um mercado global em rápida evolução. A descarbonização, em particular, está redefinindo os objetivos e estratégias dos portos, conectando-os diretamente às metas climáticas globais e às exigências de uma economia mais sustentável.

Nesse cenário de crescente complexidade e integração setorial, a abordagem das cadeias de negócio desponta como uma resposta estratégica à evolução dos clusters portuários. Ao permitir a identificação dos elos econômicos e institucionais que estruturam esses territórios produtivos, essa perspectiva oferece instrumentos para fortalecer a coordenação entre os agentes, orientar investimentos e promover o adensamento produtivo com foco em sustentabilidade e competitividade. Os tópicos a seguir aprofundarão essa abordagem, destacando seus fundamentos teóricos, estrutura sistêmica e aplicações práticas.

3.9. TÓPICOS CONCLUSIVOS

Os clusters portuários consolidam-se como aglomerações geográficas de empresas, instituições e infraestruturas articuladas em torno de funções logísticas, industriais e de serviços, indo além da visão tradicional de porto como simples interface mar-terra. Essa especificidade reside na combinação entre proximidade espacial, interdependência econômica, diversidade funcional e governança colaborativa, que transforma o porto em ecossistema logístico-industrial com capacidade de gerar inovações, economias de escala e vantagens competitivas regionais.

O capítulo evidenciou que clusters portuários são motores de desenvolvimento regional, ao articular cadeias de suprimento globais, gerar empregos qualificados, atrair investimentos e ampliar a base fiscal dos territórios costeiros e de suas *hinterlândias*. Ao mesmo tempo, a concentração de atividades logísticas e industriais impõe desafios socioambientais e urbanos – como pressões sobre o uso do solo, mobilidade e vulnerabilidades sociais – que demandam planejamento territorial integrado, instrumentos de mitigação de impactos e modelos de governança sensíveis às assimetrias locais.

No Brasil, casos como Santos, Suape, Pecém, Itaqui e outros complexos mostram que há potencial para formação de clusters portuários competitivos, mas persistem gargalos institucionais, de infraestrutura e de coordenação entre políticas industriais, logísticas e urbanas. Avanços regulatórios – a exemplo da Nova Lei dos Portos e do Plano Nacional de Logística Portuária – abrem janelas de oportunidade para estruturar projetos de cluster com maior densidade produtiva e tecnológica, desde que combinados com mecanismos robustos de governança, concessões orientadas a desempenho territorial e estratégias de atração de investimentos voltados a cadeias de maior valor agregado.

A literatura recente aponta que portos e áreas costeiras tendem a ser nós críticos da economia do hidrogênio verde, funcionando como hubs logísticos e industriais para produção, armazenamento, consumo e exportação desse vetor energético. Integrar o conceito de cluster portuário às cadeias de negócio do hidrogênio verde permite explorar sinergias entre infraestrutura renovável, indústrias eletrointensivas, operadores logísticos e mercados internacionais, potencializando economias de escala, compartilhamento de ativos, redução de riscos e reindustrialização verde de regiões portuárias brasileiras.

A partir dos fundamentos apresentados, o cluster portuário passa a ser tratado, nos próximos capítulos, como unidade analítica e instrumento de engenharia territorial para o desenho de um cluster de energias renováveis ancorado no porto, com ênfase na rota do hidrogênio verde. Isso implica articular teoria de clusters, cadeias de negócio, logística multimodal e transição energética em uma abordagem sistêmica, capaz de orientar o dimensionamento de infraestrutura, a escolha de arranjos institucionais, o desenho de modelos de negócio e a definição de indicadores de competitividade, sustentabilidade fiscal e impacto regional.

CAPÍTULO 4. HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os portos são infraestruturas essenciais para a logística global, funcionando como nós estratégicos de conexão entre os modos de transporte marítimo, terrestre e, em alguns casos, aéreo, ao mesmo tempo em que desempenham papel determinante na configuração socioespacial das cidades em que se inserem. Nesse cenário, importa reconhecer que o porto é também um grande consumidor de energia, dadas as exigências operacionais de cais, retroárea, movimentação de cargas, armazenagem e serviços de apoio, o que o torna um ponto crítico nas estratégias de mitigação de emissões.

A emergência de marcos regulatórios voltados à descarbonização das operações portuárias reforça a necessidade de repensar a base energética desses sistemas, abrindo uma oportunidade estratégica para a produção de hidrogênio verde em áreas portuárias. Essa produção não deve ser vista apenas como vetor de exportação ou insumo para cadeias industriais externas, mas também – e de forma ainda pouco considerada – como alternativa para suprir o próprio consumo energético intensivo do porto, contribuindo para reduzir sua pegada de carbono e alinhar-se às exigências legais de descarbonização. Dessa forma, a análise aqui desenvolvida busca fornecer fundamentos para compreender o papel dos portos na transição para uma economia de baixo carbono, bem como sua relevância como infraestrutura de suporte a novos arranjos produtivos e energéticos, nos quais o hidrogênio verde se apresenta como elemento-chave de reconfiguração tecnológica e territorial.

4.2. HIDROGÊNIO: CARACTERÍSTICAS, USOS E POTENCIAIS

O hidrogênio (símbolo químico H) é o elemento mais simples e abundante do universo. Em sua forma molecular mais comum ele se apresenta como o gás H₂, molécula diatômica em condições padrão que se apresenta como gás incolor, inodoro e insípido. O gás hidrogênio tem uma ampla gama de aplicações em diversos setores, incluindo energia, transporte e indústria (química, petroquímica, metalúrgica etc.).

Historicamente, o hidrogênio é predominantemente utilizado como matéria-prima na indústria química e petroquímica, particularmente na produção de amônia (NH₃) para fertilizantes e no refino de petróleo. Além disso, o hidrogênio é utilizado na fabricação de combustíveis como o metanol (CH₃OH) e na indústria metalúrgica pela redução de metais a partir de seus minérios (DOE, 2021).

No setor de energia, as propriedades únicas do hidrogênio o tornam um transportador de energia atraente. O hidrogênio pode ser utilizado diretamente em células a combustível para gerar eletricidade com água como único subproduto, ou pode ser queimado em motores de combustão interna para alimentar veículos. Além disso, o hidrogênio pode ser

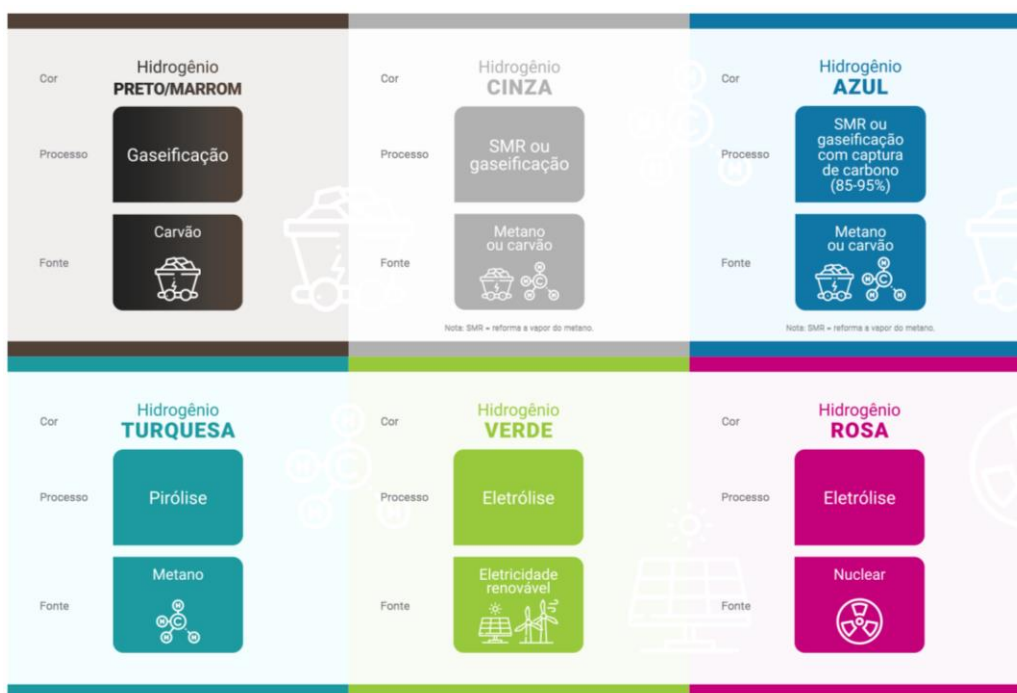
misturado com gás natural para reduzir as emissões de carbono nas redes de gás existentes, proporcionando um caminho para descarbonizar processos de aquecimento e industriais que são difíceis de eletrificar (IEA, 2021).

4.3. CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE SEGUNDO SUA MATRIZ ENERGÉTICA

A transição para o hidrogênio de baixo carbono é um passo essencial no esforço global para mitigar as mudanças climáticas. Métodos tradicionais de produção de hidrogênio, como a reforma a vapor de metano, dependem de combustíveis fósseis e resultam em significativas emissões de dióxido de carbono (CO₂). Para enfrentar este problema, há uma crescente mudança para a produção de hidrogênio de baixo carbono, que inclui o hidrogênio verde quanto o hidrogênio azul. A importância do hidrogênio de baixo carbono reside na sua capacidade de descarbonizar setores que são difíceis de eletrificar. Por exemplo, na indústria química, o hidrogênio é um componente chave na produção de produtos químicos como amônia e metanol, que são essenciais para a agricultura e combustíveis de transporte, respectivamente (União Europeia, 2020). Ao utilizar hidrogênio de baixo carbono, essas indústrias podem reduzir significativamente suas emissões de gases de efeito estufa e contribuir para as metas climáticas globais.

O hidrogênio é um gás incolor, porém para fins práticos quando ele é usado como fonte de energia, ele é classificado por um sistema de cores, que indicam o tipo de energia usada em sua origem. Assim, é possível classificar o hidrogênio de acordo com sua pegada de Carbono (OSMAN et al., 2021) conforme Figura 4.3.1:

Figura 4.3.1: Tipos e processo de produção de hidrogênios



Fonte: IRENA (2020)

- **Hidrogênio branco:** ocorre naturalmente na crosta terrestre. É extraído por meio do fraturamento hidráulico, ou seja, perfuração da terra com água pressurizada contendo areia e produtos químicos aplicados na rocha para liberar o gás (ARCOS, SANTOS, 2023).
- **Hidrogênio marrom e preto:** produzido a partir do Lignito, o carvão marrom produzido a partir da Hulha, o carvão preto, são obtidos através do processo de gaseificação. Este processo converte materiais ricos em carbono em hidrogênio e CO₂, liberando esses subprodutos na atmosfera.
- **Hidrogênio cinza:** é amplamente utilizado, especialmente na indústria química, mas, por ser obtido do gás natural pelo processo de reforma hidrotérmica do gás metano libera uma grande quantidade de CO₂ como subproduto de sua fabricação. A produção envolve a utilização de combustíveis fósseis, onde o gás metano (CH₄) é dividido em gás H₂ e CO₂ através do calor (reforma a vapor). A produção de uma tonelada de hidrogênio gera cerca de dez toneladas de CO₂, que são liberadas na atmosfera (FIGUEIREDO; CESAR, 2021).
- **Hidrogênio azul:** é um tipo de hidrogênio de baixa emissão de carbono. Este tipo de hidrogênio é produzido a partir de hidrocarbonetos, principalmente pela reforma hidrotérmica do gás natural (como o hidrogênio cinza), e o CO₂ gerado no processo é capturado e armazenado no subsolo ou usado em outros processos (captura e armazenamento de carbono *Carbon Capture and Storage - CCS*), fazendo com que o hidrogênio obtido por esta série de processos seja considerado neutro em relação ao CO₂.
- **Hidrogênio turquesa:** tem uma origem diferente. O gás natural é decomposto em gás hidrogênio e carbono sólido através de um processo térmico chamado pirólise do metano. Assim, não há necessidade de armazenar CO₂ gasoso no subsolo. A neutralidade de CO₂ do processo depende do fornecimento de calor de alta temperatura a partir de fontes renováveis e da utilização permanente do carbono sólido. Esse carbono pode ser utilizado na indústria para a produção de materiais de construção leves ou baterias.
- **Hidrogênio rosa:** é também produzido por eletrólise cuja fonte é obtida por energia nuclear. Os especialistas também se referem à produção desse tipo de hidrogênio por métodos nucleares, como hidrogênio roxo ou vermelho (ARCOS, SANTOS, 2023)
- **Hidrogênio verde:** é produzido a partir de fontes de energias renováveis, como a hidroelétrica (para alguns países), solar ou eólica, sem a produção direta de CO₂. O processo comercialmente mais difundido de obtenção de Hidrogênio verde é a eletrólise da água, que divide a molécula de água (H₂O) em gás oxigênio (O₂) e gás hidrogênio (H₂) utilizando eletricidade, sendo um processo totalmente livre de emissões.

O hidrogênio verde produzido via eletrólise da água usando energia renovável, representa uma solução para atingir um futuro neutro em emissões de carbono. Essa forma de produção de hidrogênio, distinta pelo seu processo de produção isento de gases de efeito

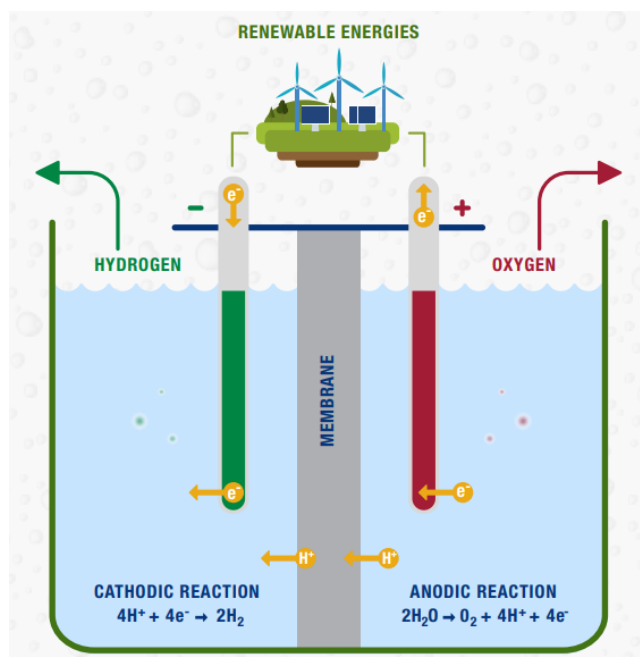
estufa, é vista como um componente primordial na guinada global para fontes de energia mais limpas (IEA, 2021). O H₂ verde também permite o transporte e armazenamento de energia de regiões abundantes em recursos energéticos para áreas necessitadas de energia a milhares de quilômetros de distância.

4.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO: ELETRÓLISE

A eletrólise é um processo eletroquímico fundamental que envolve a decomposição de substâncias químicas através da aplicação de corrente elétrica. Originalmente descrita no início do século XIX por Michael Faraday, a eletrólise desempenha um papel essencial na produção de diversos produtos químicos industriais, incluindo o hidrogênio. O conceito básico de eletrólise baseia-se na utilização de uma célula eletrolítica, onde ocorre a transferência de íons entre dois eletrodos, o ânodo e o cátodo, submersos em uma solução eletrolítica (GROENEVELD, 1996).

Esse método de produção não emite gases de efeito estufa durante o processo, tornando-o uma opção viável para a redução das emissões de carbono (PETERS et al., 2020). Para que o processo resulte em um hidrogênio verde, é necessário usar fontes de energia elétrica renováveis conforme demonstrado figura a seguir:

Figura 4.4.1: Processo de eletrólise para produção de Hidrogênio Verde



Fonte: U.S. Department of Energy and Wood Mackenzie

O processo de eletrólise pode ser dividido em diferentes tipos. Entre os tipos mais comuns, destacam-se os eletrolisadores alcalinos (AEL), que utilizam uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH), e os eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM), que empregam uma membrana polimérica como eletrólito (CARMO et al., 2013). A principal vantagem da eletrólise é a produção de hidrogênio sem a emissão

de dióxido de carbono, especialmente quando a eletricidade utilizada é proveniente de fontes renováveis, o que torna o processo ideal para a transição energética rumo a uma economia de baixo carbono (LI et al., 2021).

Com o avanço da tecnologia, a eletrólise tem se tornado cada vez mais eficiente, especialmente com o desenvolvimento de novos materiais para eletrodos e membranas que aumentam a durabilidade e a eficiência energética do processo. A eletrólise não apenas possibilita a produção de hidrogênio verde, mas também oferece uma solução viável para o armazenamento de energia renovável em larga escala, contribuindo para a estabilização das redes elétricas e para a redução das emissões globais de gases de efeito estufa (HOSLT et al., 2021).

O hidrogênio produzido via eletrólise é visto como um vetor energético promissor, capaz de ser utilizado em células a combustível para a geração de eletricidade, em motores de combustão interna adaptados, ou ainda como matéria-prima na indústria química. A flexibilidade e a pureza do hidrogênio gerado tornam a eletrólise uma tecnologia chave para o futuro energético global, especialmente no contexto de descarbonização de setores de difícil eletrificação, como o transporte pesado e a indústria siderúrgica (MILLER et al., 2020).

Atualmente, os eletrolisadores do tipo membrana de troca de prótons (*proton exchange membrane* – PEM) e alcalinos (AEL) atingiram o nível de maturidade de mercado industrial e comercial, o que permite a fabricação de hidrogênio em larga escala para consumo global. A célula de eletrólise é o elemento básico do sistema de produção de hidrogênio verde mais comum. As células são conectadas em paralelo ou em série para formar o módulo de eletrólise.

Cada tipo de eletrolisador apresenta vantagens e desvantagens. Os eletrolisadores monopolares são simples e robustos, mas requerem mais espaço e apresentam perdas adicionais devido às múltiplas conexões externas. Eles oferecem maior controle operacional e facilidade de manutenção, permitindo o acesso individual a cada célula. No entanto, possuem menor eficiência energética e custos mais elevados. Os eletrolisadores bipolares, por sua vez, têm uma configuração compacta e são mais eficientes energeticamente, pois a corrente de uma única fonte alimenta todas as células. Porém, sua manutenção é mais complexa, são mais sensíveis a impurezas e têm controle operacional limitado.

- **Eletrolisador Alcalino:** tem o menor custo de desenvolvimento devido ao nível maduro de desenvolvimento e baixo custo de componentes como eletrodos, geralmente ligas de níquel. Suas principais desvantagens são uma baixa taxa de eficiência para a produção efetiva H₂ e baixas pressões atingidas, necessitando grandes recipientes para armazenamento. Além disso, o eletrólito líquido alcalino altamente corrosivo gera um risco ambiental importante.
- **Eletrolisador de Membrana de Troca Polimérica - PEM:** *Polymer Exchange Membrane*, ou *Proton Exchange Membrane*. Comparado ao eletrolisador alcalino, sua é mais simples e compacta. As vantagens de um eletrolisador PEM são a

produção de hidrogênio de alta pureza, a capacidade de trabalhar em altas pressões. O ambiente ácido do eletrolisador PEM é crítico para a alta eficiência da reação de evolução do hidrogênio (*Hydrogen Evolution Reaction* - HER) e da reação de evolução do oxigênio (*Oxygen Evolution Reaction* - OER). Nesta condição operacional, apenas os metais nobres mais caros e seus óxidos, como platina e irídio, podem ser utilizados como eletrodos para evitar sua oxidação, pois a reação redox ocorre em um ambiente ácido. Além disso, as membranas, feitas de material caro, são gradualmente consumidas durante o processo, resultando em menores tempos de operação útil do equipamento.

- **Eletrolisadores de Membrana de Troca Aniônica - AEM:** representam uma inovação emergente, combinando aspectos favoráveis dos dois modelos anteriores. Esses dispositivos utilizam uma membrana polimérica condutora de ânions (geralmente OH⁻), permitindo a operação em meios alcalinos e eliminando a necessidade de metais nobres como catalisadores, uma vantagem significativa em termos de custos e sustentabilidade ambiental. Sua tecnologia é promissora devido à sua capacidade de operar a temperaturas mais baixas (tipicamente entre 40-60°C) e ao uso de materiais não nobres, o que potencialmente reduz o CAPEX (despesas de capital) associado à produção de hidrogênio verde. Além disso, a membrana AEM oferece a flexibilidade de utilizar água não purificada, simplificando o processo de pré-tratamento da água em comparação com as exigências rigorosas dos sistemas PEM (SCHROPP et al., 2024).

Em resumo, embora os eletrolisadores AEM ainda estejam em uma fase emergente de desenvolvimento tecnológico, eles oferecem um caminho promissor para a produção sustentável e economicamente viável de hidrogênio verde. A superação dos desafios técnicos atuais pode posicionar os eletrolisadores AEM como uma alternativa competitiva para a descarbonização de setores industriais e energéticos nos próximos anos (KUMAR & LIM, 2022). A Tabela 4.4.1 apresenta um comparativo entre os eletrolisadores do tipo Alcalino e PEM, apresentando as principais características, vantagens e desvantagens:

Tabela 4.4.1: Comparação entre eletrolisadores do tipo Alcalino e PEM

Parâmetro	Alcalino	PEM	AEM
Eletrólito	Solução de Hidróxido de potássio	Membranas PFSA (Ex. Nafion)	Membranas de Troca Aniônica (AEM)
Cátodo	Ni, Ligas de Ni-Mo	Platina, Ligas Platina-Paládio	Níquel, Ligas de Ni-Mo, Ni suportado em misturas de óxidos
Ânodo	Ni, Ligas de Ni-Co	Óxido de Rutênio, Óxido de Irídio	Óxidos de Irídio, Óxidos de Níquel, Catalisadores baseados em Ni-Fe ou Ni-Co

Temperatura de operação (°C)	65 - 100	80 - 150	40 - 60
Pressão de operação (bar)	25 - 30	70 - 400	1 - 35
Densidade de potência (mW/cm ²)	< 1	< 4,4	0,2 - 1,5
Vida útil da célula (h)	60 - 100k	20 - 60k	20 - 35k
Tecnologia	Madura	Comercialização	Emergente
Vantagens	Acessível a projetos de grandes plantas, baixo custo e alta vida útil	Sem substâncias corrosivas, grande densidade de potência, resposta rápida	Uso de materiais não nobres, potencial para operar com água não ultrapurificada, potencial para redução de CAPEX
Desvantagens	Baixa densidade de potência, custo com manutenção (Sistema altamente corrosivo)	Alto custo e rápida degradação	Problemas de estabilidade a longo prazo, menor prontidão tecnológica (TRL)
Produção de H ₂ (m ³ /h)	< 760	≤ 450	< 250
Custo	USD 500-1400/kW	USD 1100-1800/kW	USD 1000-1600/kW

Fonte: elaboração própria

Portanto, os eletrolisadores são dispositivos confiáveis que não requerem manutenção contínua, pois dificilmente incluem elementos móveis. Além disso, são silenciosos e possuem alto grau de modularidade, tornando-os adequados para aplicações descentralizadas em áreas residenciais, comerciais e industriais. Embora os eletrolisadores sejam utilizados há muito tempo, suas futuras aplicações exigem que sejam acoplados a fontes de energia renovável para gerar hidrogênio limpo e contribuir para a operação da rede elétrica.

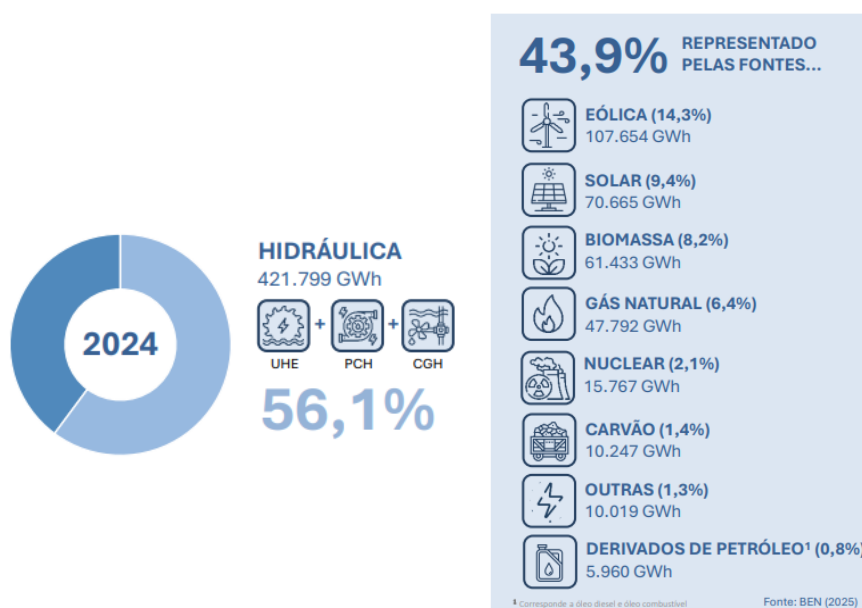
4.5. CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO E FONTES RENOVÁVEIS

O Brasil é dotado de uma vasta gama de recursos naturais que o posicionam como líder em energia renovável. Historicamente, o país tem dependido fortemente da energia hidrelétrica, que ainda representa uma parcela significativa da sua matriz energética. Nos últimos anos, no entanto, a diversificação dessa matriz tornou-se uma prioridade nacional. Fontes como a energia eólica, solar e biomassa têm ganhado destaque e aumentado suas

participações, impulsionadas por políticas de incentivo e avanços tecnológicos (DRANKA, FERREIRA, 2018).

A diversificação da matriz energética brasileira, além de reforçar a segurança energética e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, expressa o aproveitamento estratégico dos recursos naturais abundantes do país. A expansão da geração solar ilustra esse movimento: a produção passou de 50.633 GWh em 2023 para 70.996 GWh em 2024, representando um crescimento expressivo no período. Desse total, aproximadamente 58% teve origem na micro e minigeração distribuída, evidenciando a crescente participação descentralizada na oferta elétrica nacional (EPE, 2025).

Figura 4.5.1: Geração de Energia elétrica por fonte no Brasil



Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica, EPE 2025

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) aponta que a eletrificação da matriz energética será fundamental para suportar o crescimento econômico e a modernização do país, com uma demanda crescente por eletricidade acompanhada por medidas de eficiência energética para mitigar o impacto ambiental (EPE, 2020). A produção descentralizada de energia, incluindo a geração distribuída e a autoprodução, também está prevista para desempenhar um papel crucial na expansão do setor energético (EPE, 2025).

A energia renovável é, portanto, um pilar da estratégia energética nacional do Brasil. As políticas do país visam expandir a capacidade de energia renovável, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e aumentar a eficiência energética. Esse foco estratégico está alinhado com os esforços globais para combater as mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável (LIMA et al., 2020).

O PNE 2050 destaca que, além de ser fundamental para a sustentabilidade ambiental, a energia renovável é crucial para a segurança energética e para a posição do Brasil como exportador líquido de energia. O país deve continuar investindo em tecnologias de

armazenamento de energia e em redes inteligentes para integrar de forma eficiente as fontes de energia variáveis, como a solar e a eólica, à rede elétrica (EPE, 2020).

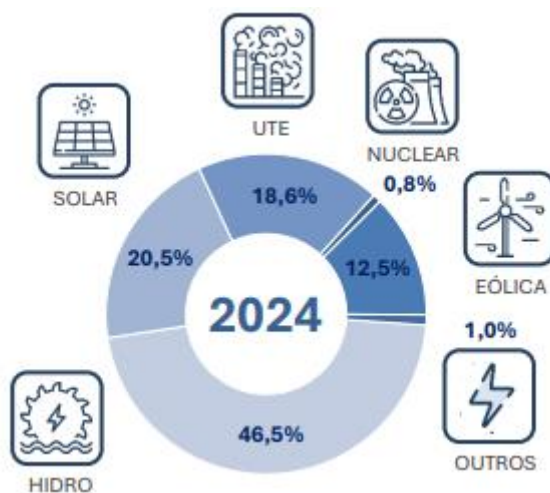
O PNE 2050 também ressalta a necessidade de alinhar políticas energéticas com as políticas de ciência, tecnologia e inovação, bem como com a educação, para desenvolver novas capacitações e vantagens competitivas. Isso inclui a promoção de um ambiente de negócios favorável à inovação e à competitividade dos mercados abertos (EPE, 2020).

O compromisso com a energia renovável também é refletido nas projeções de crescimento econômico e demográfico, que influenciam diretamente as necessidades energéticas futuras do país. Estima-se que o consumo de energia elétrica triplique até 2050, mesmo com significativos ganhos de eficiência energética, destacando a importância de uma matriz energética diversificada e sustentável (EPE, 2024).

Em suma, a estratégia energética do Brasil se baseia em quatro grandes objetivos: segurança energética, retorno adequado aos investimentos, disponibilidade de acesso à população e critérios socioambientais. Com base nesses objetivos, o país busca maximizar os benefícios da atual transição energética e minimizar os arrependimentos futuros, garantindo uma matriz energética diversificada, sustentável e resiliente (EPE, 2024).

A matriz energética do Brasil é predominantemente renovável, com mais de 88% da eletricidade gerada a partir de fontes renováveis. Esse perfil energético único diferencia o Brasil de muitos outros países (MARQUES, LOURENÇO, GASI, 2019). A hidroeletricidade ainda representa a maior parte da geração, mas fontes como a energia eólica, solar e biomassa têm ganhado participação significativa, refletindo a diversificação da matriz energética nacional. Em 2024, a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil permaneceu majoritariamente hidrelétrica, com 46,5% do total, seguida pela geração solar fotovoltaica (20,5%), pelas usinas termelétricas (18,6%), pela geração eólica (12,5%) e pela fonte nuclear (0,8%), além de 1,0% proveniente de outras fontes (EPE, 2025).

Figura 4.5.2: Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil



Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica, EPE 2025

O Brasil dispõe de um ambiente regulatório, institucional e financeiro em constante evolução para apoiar o avanço das energias renováveis. Mesmo com os desafios existentes, as diretrizes nacionais indicam uma trajetória de fortalecimento das fontes limpas, essenciais à modernização do setor elétrico e à transição para uma economia de baixo carbono. Nesse cenário, as energias renováveis desempenham um papel central na viabilização do hidrogênio verde, cuja produção, especialmente por eletrólise da água, depende diretamente de eletricidade oriunda de fontes sustentáveis. Assim, garantir a expansão qualificada dessas fontes é condição indispensável para consolidar o hidrogênio verde como vetor estratégico de desenvolvimento energético e ambiental no Brasil.

4.6. ROTAS TECNOLÓGICAS DO HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde pode ser usado tanto como fonte de energia quanto como insumo químico, o que amplia suas aplicações em setores de alta emissão de carbono. Essa característica dá mais flexibilidade ao sistema energético e contribui para equilibrar a produção e o consumo (IRENA, 2022). Essa versatilidade se manifesta em rotas tecnológicas que empregam o hidrogênio tanto no uso direto (armazenamento energético e combustível) quanto, principalmente, como reagente em processos industriais, substituindo o hidrogênio fóssil (cinza) ou insumos à base de carbono. Com isso, é possível reduzir emissões no próprio processo produtivo, além de gerar benefícios adicionais ao longo dos ciclos de vida e das cadeias logísticas (IEA, 2023; UNIDO, 2023).

Nos transportes, o H₂V contribui por meio de um portfólio de combustíveis de baixa emissão, capazes de atender a diferentes necessidades operacionais:

- **HVO** (*Hydrotreated Vegetable Oil* – hidrotratado de óleos vegetais/gorduras residuais): utiliza hidrogênio no processo de hidrotratamento e resulta em um “diesel verde” *drop-in*, ou seja, um combustível que pode substituir diretamente o diesel fóssil sem adaptações na frota. É livre de enxofre e compatível com motores existentes (IEA, 2023).
- **Combustíveis sintéticos** (*e-fuels*): produzidos pelo processo Fischer-Tropsch a partir da combinação de H₂V e CO₂. Incluem o SAF (*Sustainable Aviation Fuel* – combustível sustentável de aviação) destinado à aviação de longo curso, além de variações como e-diesel e e-gasolina.
- **Metanol verde e e-metano**: obtidos pela metanação do CO₂ com H₂V, têm grande relevância para o setor marítimo e podem ser integrados imediatamente às atuais infraestruturas de GNL e gás natural.

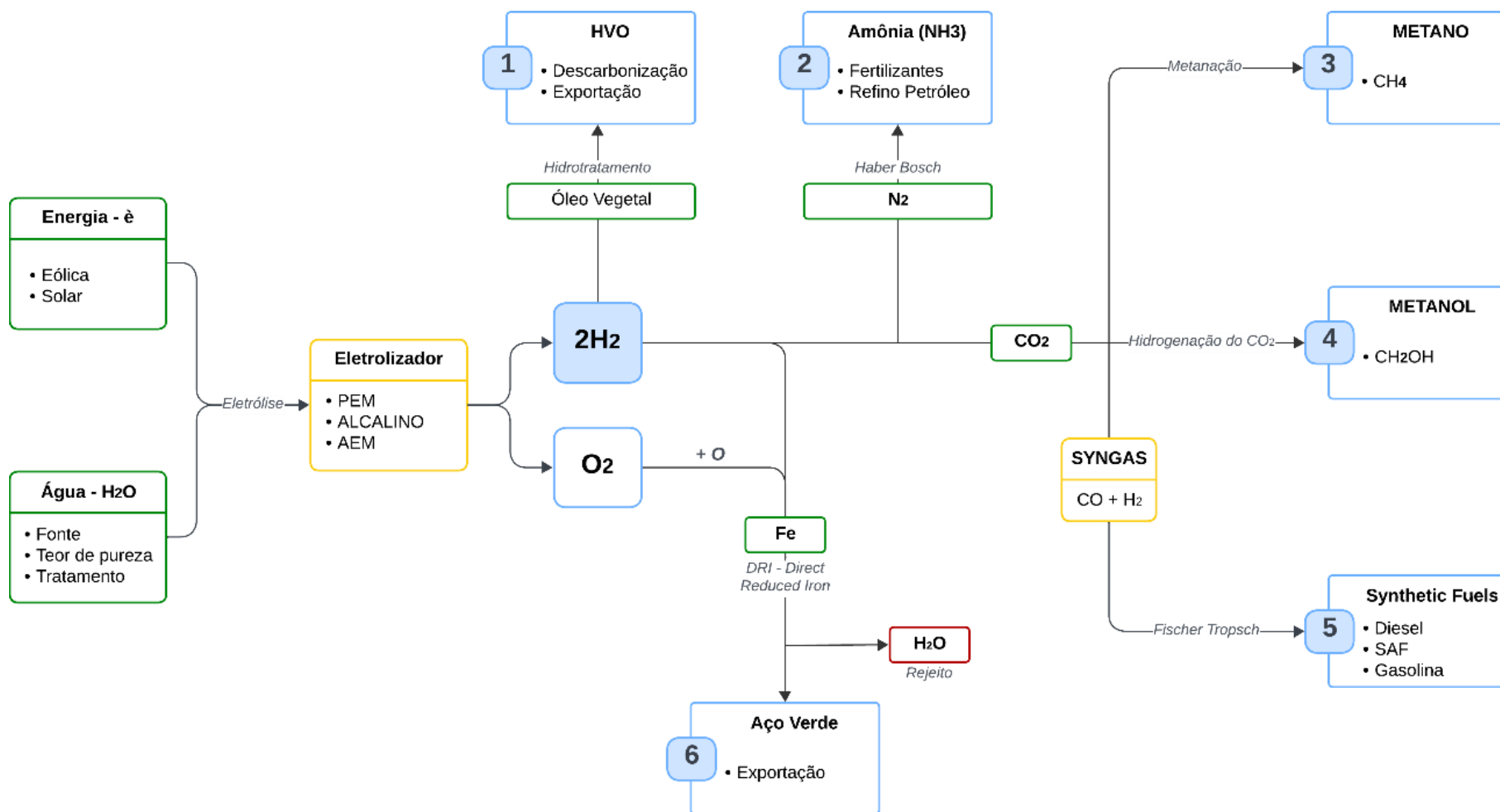
No agronegócio, a rota da **amônia verde** (NH₃) — obtida pelo processo Haber-Bosch — é uma boa possibilidade para descarbonizar a produção de fertilizantes nitrogenados, atualmente dependente de hidrogênio fóssil e, no caso brasileiro, fortemente ancorada em importações (Sousa; Fiche; Sato, 2023). Ao substituir o insumo mais intensivo em carbono do sistema, a amônia verde reduz a pegada de carbono na origem dos fertilizantes e, por extensão, da produção agrícola que deles depende.

Na mineração e metalurgia, a redução direta do minério de ferro (DRI) com H₂V viabiliza o chamado **aço verde**, ao substituir o gás natural ou o carvão coqueificável como agente redutor (IRENA, 2022). A literatura reporta potenciais de redução de emissões superiores a 90% quando o H₂V e a eletricidade renovável são combinados ao longo do processo, restando vapor d'água como subproduto (UNIDO, 2023). Em países exportadores de minério e com elevada oferta renovável, como o Brasil, a rota H₂-DRI alinha competitividade mineral à demanda global por aço de baixo carbono, com implicações diretas para cadeias exportadoras (CNI, 2022).

Essa diversidade de usos ratifica seu potencial de integrar setores distintos e gerar benefícios econômicos e ambientais em escala global. Além disso, abre caminho para o desenvolvimento territorial: cada região, de acordo com suas características e demandas, pode direcionar a produção para diferentes insumos, combinando rotas e potencializando a geração industrial e energética.

A Figura 4.6.1 a seguir apresenta uma representação esquemática dessas formas de utilização do hidrogênio verde e dos processos associados à sua produção:

Figura 4.6.1: Rotas tecnológicas do Hidrogênio Verde



Fonte: elaboração própria

CAPÍTULO 5. CADEIA DE NEGÓCIO: PERSPECTIVA INTEGRADA

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A noção de cadeia de negócio surge como a ferramenta de integração entre os conceitos até aqui discutidos — portos, clusters portuários e hidrogênio verde — permitindo transformar um potencial em uma estratégia de desenvolvimento. Se o porto constitui a base territorial de circulação e produção, os clusters representam a concentração espacial de empresas e atividades produtivas, e o hidrogênio verde configura-se como a meta de descarbonização e inovação, a cadeia de negócio é o arranjo que conecta esses elementos, agregando valor tanto à produção quanto ao território em que se insere. Trata-se, portanto, de um instrumento de articulação capaz de unir diferentes agentes, processos e infraestruturas, assegurando que a geração de riqueza ultrapasse os limites de cada elo isolado e se traduza em dinamismo econômico e fortalecimento territorial.

Este capítulo apresenta a cadeia de negócio, conforme Yamashita et al. (2025), como uma perspectiva integrada que supera abordagens fragmentadas — restritas ao porto como infraestrutura, ao cluster como aglomeração produtiva ou ao hidrogênio verde como inovação tecnológica — ao propor sua articulação sistêmica em uma estratégia territorial unificada. Inicialmente, será discutida sua estrutura e funcionamento, destacando os segmentos a montante, âncora, jusante e os elos de apoio. Em seguida, analisa-se como a cadeia de negócio permite identificar gargalos, oportunidades e políticas públicas voltadas ao adensamento produtivo e à competitividade. Por fim, será examinada sua aplicação como vetor de estruturação territorial de clusters, evidenciando seu papel estratégico para alinhar portos, atividades produtivas e a transição energética baseada no hidrogênio verde.

5.2. CONCEITO, EVOLUÇÃO E DISTINÇÕES TEÓRICAS

A noção de Cadeia de Negócio surge a fim de superar os limites de conceitos anteriores como “cadeia produtiva”, “cadeia de valor” e “sistema de suprimento”. Embora estes modelos tenham contribuído significativamente para a compreensão das dinâmicas econômicas e empresariais, especialmente no contexto das reformas neoliberais e da globalização econômica a partir da década de 1980, apresentam fragilidades quando aplicados a territórios complexos e heterogêneos — como municípios de pequeno porte, regiões periféricas ou sistemas logísticos multissetoriais. A cadeia de negócio surge, portanto, como uma construção teórica-metodológica orientada não apenas à análise microeconômica, mas à construção de estratégias de desenvolvimento territorial integrado, a partir da identificação de oportunidades e de agregação de valor.

Historicamente, o conceito se estrutura a partir de um diálogo crítico com a cadeia de valor formulada por Michael Porter (1989), cujo enfoque está na decomposição interna das atividades de uma única empresa com o objetivo de maximizar sua vantagem

competitiva. De acordo com o autor, a cadeia de valor é composta por atividades primárias (logística interna, operações, logística externa, *marketing* e vendas e serviços) e atividades de apoio (infraestrutura da empresa, gestão de recursos humanos, desenvolvimento tecnológico e suprimentos), integradas numa lógica linear de maximização de margem. Tal estrutura, embora útil para fins de análise estratégica empresarial, é limitada ao escopo intraorganizacional, desconsiderando os arranjos entre empresas e os vínculos territoriais que envolvem múltiplos agentes (PORTER, 1989).

A cadeia produtiva, por sua vez, introduz uma ampliação da escala analítica, ao considerar os fluxos de insumos, processos e produtos ao longo de diversas etapas da produção, desde a extração de matérias-primas até o consumo final. O conceito foca na articulação técnica e econômica entre os setores primário, secundário e terciário, adotando uma estrutura linear e uma visão fixa das relações econômicas (RIPPEL, 1995; MADUREIRA, 2015). A cadeia produtiva tende a analisar os setores isoladamente, tratando os agentes como partes desconexas de um sistema tecnicamente estruturado, ignorando com frequência os aspectos institucionais, culturais e espaciais da produção.

Por fim, o conceito de cadeia de suprimentos (*supply chain*), amplamente difundido no campo da logística e da engenharia de produção, refere-se à rede de operações envolvidas no fluxo de bens e serviços, abrangendo desde fornecedores até o consumidor final. Seu foco está na otimização da eficiência operacional — custos, prazos e qualidade — das empresas integradas em uma rede logística. Embora trate de interações interempresariais, este modelo permanece vinculado à lógica empresarial privada e desconsidera os impactos territoriais e a multiplicidade de objetivos que permeiam os sistemas produtivos reais (COHEN et al., 2022; LIBERATORE; MILLER, 2021).

Nesse contexto, a cadeia de negócio se distingue ao propor uma abordagem territorializada, sistêmica e integrada dos arranjos econômicos. Conforme Yamashita et al. (2025), trata-se de um:

Arranjo organizacional que interliga entidades empresariais de um determinado segmento de produção, incluindo fornecedores, produtores, consumidores e os serviços de apoio comuns aos demais elos, com vistas à funcionalidade coletiva e à qualidade de vida dos participantes.

Sua ênfase está não apenas nos fluxos de bens e serviços, mas nas conexões reais entre os agentes, considerando as capacidades instaladas, os vínculos institucionais, os contextos normativos, a infraestrutura pública e a dinâmica fiscal local. Dessa forma, a cadeia de negócio incorpora elementos da cadeia de valor, ao reconhecer a importância estratégica das interações; da cadeia produtiva, ao articular diferentes etapas do processo produtivo; e da cadeia de suprimentos, ao considerar a lógica operacional e logística; mas transcende tais modelos ao integrar uma visão sistêmica e territorial, comprometida com o desenvolvimento local/regional.

Nonato (2025) consolida essa transição conceitual ao propor a cadeia de negócio como ferramenta metodológica para estruturação de territórios produtivos, especialmente em contextos municipais. O autor demonstra como a cadeia de negócio permite mapear

oportunidades, identificar gargalos, propor políticas de incentivo à industrialização e estimar os impactos fiscais e econômicos da agregação de valor aos produtos regionais.

Já Ferreira (2021) amplia o escopo do conceito ao integrá-lo aos projetos urbanos de aglomerações produtivas, propondo que a cadeia de negócio, ao explicitar os elos estratégicos de um segmento econômico, oferece o fundamento técnico para o desenho urbano de *clusters*, articulando indicadores econômicos e espaciais na proposição de arranjos físico-funcionais adequados ao desenvolvimento territorial.

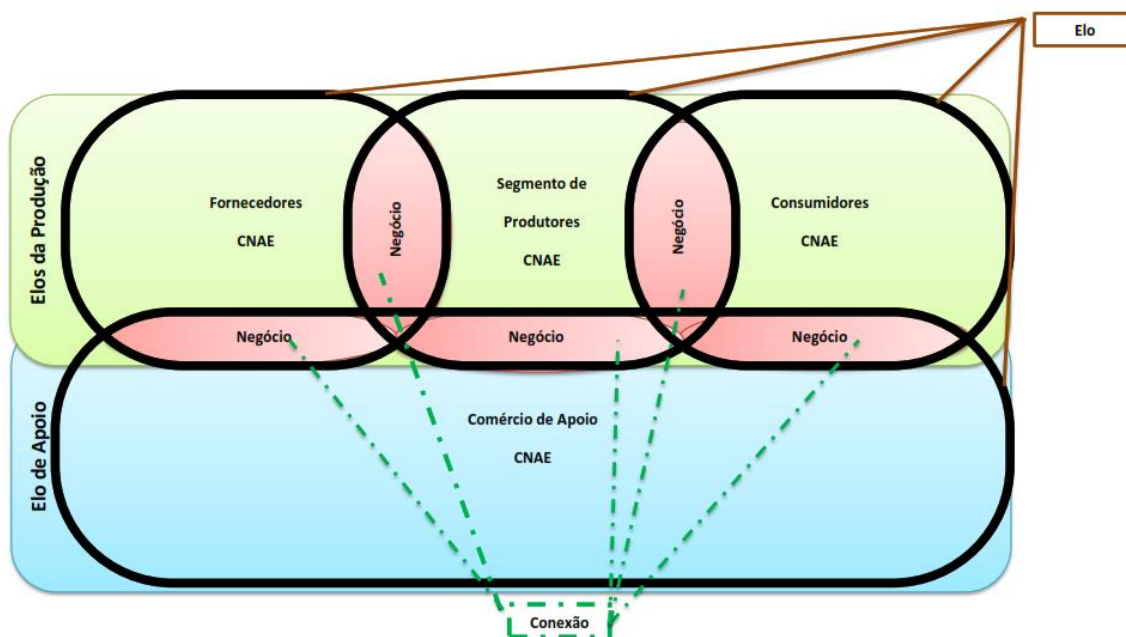
Assim, a cadeia de negócio não é apenas uma ferramenta metodológica, mas um instrumento de gestão territorial, capaz de subsidiar políticas públicas, orientar investimentos em infraestrutura, articular agentes econômicos e promover desenvolvimento local a partir da estruturação de relações produtivas e comerciais sistêmicas.

5.3. ESTRUTURA DA CADEIA DE NEGÓCIO

A estrutura da cadeia de negócio fundamenta-se em uma lógica relacional e funcional que articula, em um mesmo arranjo produtivo e comercial, os agentes que operam em diferentes etapas do processo econômico. Essa estrutura não é linear, como nos modelos tradicionais de cadeia produtiva, mas reticulada, dinâmica e territorializada, o que permite que ela sirva como ferramenta de desenvolvimento local e regional. Conforme Yamashita et al. (2025), trata-se de uma:

Estrutura composta por elos interdependentes, interligados por transações econômicas e relações operacionais, orientadas à agregação de valor e à dinamização da economia do território.

Figura 5.3.1: Representação gráfica do conceito de Cadeia de Negócio



Fonte: Yamashita et al. (2025)

A cadeia de negócio é composta por quatro grandes segmentos estruturais divididos em dois elos: elos de produção configurados pela montante, atividade âncora e jusante, e elo de apoio. Cada um desses segmentos desempenha funções específicas no ciclo produtivo e econômico, e sua análise conjunta permite mapear a completude da cadeia, identificar gargalos e propor intervenções estratégicas para promover o adensamento produtivo e a competitividade territorial.

A. SEGMENTO A MONTANTE

O segmento a montante da cadeia de negócio refere-se aos agentes econômicos responsáveis pelo fornecimento dos insumos, matérias-primas, serviços técnicos, equipamentos e tecnologias necessárias à produção. São os fornecedores diretos ou indiretos do segmento produtivo central, incluindo empreendimentos ligados à extração mineral, agricultura, produção de energia, componentes industriais ou mesmo serviços de engenharia e consultoria técnica. A montante constitui a base material e tecnológica da cadeia. Em cadeias incompletas, a ausência de fornecedores locais obriga a importação de insumos, o que acarreta perda de valor agregado e esvaziamento do potencial arrecadatário do território (NONATO, 2025).

B. ATIVIDADE ÂNCORA

A atividade âncora corresponde ao núcleo dinâmico da cadeia de negócio, isto é, ao segmento produtivo de maior peso econômico, escala ou capacidade indutora dentro do sistema. É a partir dessa atividade que os demais elos são organizados – tanto a montante quanto a jusante – e é ela que justifica o desenho e a existência da cadeia. A atividade âncora funciona como catalisadora dos investimentos, articuladora dos fluxos econômicos e elemento estruturante da estratégia de desenvolvimento territorial. Identificar corretamente a âncora é essencial para orientar políticas públicas de atração de empresas, infraestrutura e qualificação profissional. Uma âncora pode ser definida a partir de critérios como: volume de produção, capacidade de geração de emprego e renda, intensidade de encadeamentos produtivos, potencial exportador ou função estratégica em cadeias de transição energética, como no caso do hidrogênio verde.

C. SEGMENTO A JUSANTE

O segmento a jusante compreende os agentes que atuam após a etapa de produção central, sendo responsáveis pela transformação adicional, comercialização, distribuição e consumo dos produtos. Esse segmento abrange desde indústrias de processamento e refino, empresas de logística, centros de distribuição, redes varejistas, exportadores e consumidores finais. É na jusante que se definem os canais de comercialização, o acesso ao mercado e a geração de receita, sendo, portanto, o ponto de realização econômica da cadeia. O fortalecimento desse segmento é essencial para capturar valor e ampliar a permanência da riqueza no território (YAMASHITA et al., 2025).

D. ELO DE APOIO

O elo de apoio é uma das inovações conceituais mais relevantes da cadeia de negócio. Trata-se do conjunto de agentes que prestam serviços indiretos e transversais aos demais segmentos da cadeia, como instituições de crédito, centros de formação e qualificação, instituições de pesquisa e inovação, serviços de contabilidade, advocacia, *marketing*, manutenção de equipamentos, além de infraestrutura de transporte e conectividade. Esses serviços de suporte são essenciais para assegurar o funcionamento sistêmico da cadeia, conferindo-lhe resiliência, produtividade e capacidade adaptativa. A ausência de elos de apoio bem estruturados compromete a eficiência e reduz a competitividade dos segmentos produtivos centrais. Segundo Ferreira (2021), a qualificação do espaço urbano para abrigar esses elos – como parques tecnológicos, centros logísticos, zonas de serviços e redes de apoio – é parte integrante do projeto urbano de um *cluster* funcional.

A cadeia de negócio só atinge sua completude funcional quando os quatro segmentos operam de forma articulada e equilibrada. A ausência ou fragilidade de qualquer elo – fornecedores ausentes, indústria de transformação inexistente, serviços de apoio precários, mercado consumidor restrito – resulta em vazamentos de valor e perda de potencial arrecadatório. É por isso que a modelagem da cadeia deve estar integrada à análise territorial e institucional, orientando decisões sobre infraestrutura, incentivos fiscais, capacitação e zoneamento urbano. A estrutura da cadeia de negócio permite uma leitura completa dos sistemas econômicos locais, sendo particularmente eficaz na estruturação de projetos de *clusters* (FERREIRA, 2021; YAMASHITA et al., 2025).

5.4. IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES E POLÍTICAS PÚBLICAS

A principal vantagem da cadeia de negócio reside em sua capacidade de traduzir a realidade econômica territorial em termos operacionais e estratégicos, permitindo identificar com precisão os elos críticos (gargalos), os pontos de expansão econômica (oportunidades) e as ações coordenadas que devem ser implementadas pelo poder público e pelos agentes privados para promover o desenvolvimento local e regional.

Esse mapeamento se estrutura a partir da análise integrada dos quatro segmentos sistêmicos previamente apresentados – montante, âncora, jusante e apoio – com base em dados quantitativos (produção, emprego, arrecadação, PIB setorial, fluxos logísticos) e qualitativos (organização institucional, cultura de cooperação, barreiras técnicas, fragilidades logísticas e normativas). A metodologia proposta por Nonato (2025) demonstra que esse mapeamento não apenas retrata a estrutura existente, mas antecipa cenários futuros com base em simulações de investimento, adensamento produtivo e projeções fiscais.

A. Gargalos: elos ausentes ou fragilizados

Gargalos são definidos como fragilidades estruturais que interrompem, limitam ou encarecem o funcionamento da cadeia (YAMASHITA et al., 2025). São elos inexistentes, ausentes ou subdimensionados que impedem a captura de valor dentro do território, provocando “vazamentos” econômicos – isto é, a perda de riqueza, empregos e impostos

que poderiam ser retidos localmente caso a cadeia estivesse completa. Entre os gargalos mais comuns estão:

- Ausência de indústrias de transformação;
- Carência de infraestrutura logística (ferrovias, terminais de carga, armazenagem);
- Falta de capital humano qualificado para segmentos-chave;
- Escassez de serviços de apoio especializados (consultorias, laboratórios, certificadoras);
- Barreiras ambientais ou institucionais à instalação de empreendimentos.

O reconhecimento desses gargalos permite o planejamento de intervenções cirúrgicas, como a instalação de uma planta industrial âncora, a criação de um centro de capacitação técnica ou a revisão de zoneamentos e licenças ambientais, com impacto direto sobre a eficácia da cadeia.

B. Oportunidades territoriais

As oportunidades, por sua vez, correspondem aos potenciais econômicos ainda não realizados ou sub explorados no território, cujas condições de viabilidade podem ser alcançadas por meio da ativação de políticas públicas, investimento privado ou ação cooperada dos agentes locais (YAMASHITA et al., 2025). Essas oportunidades geralmente estão relacionadas a:

- Disponibilidade de insumos com baixo grau de processamento local;
- Existência de demanda reprimida para determinados bens ou serviços;
- Coesão entre cadeias, por exemplo a biomassa residual da soja utilizada em projetos de energia);
- Proximidade com *hubs* logísticos ou zonas industriais subutilizadas;
- Convergência com políticas nacionais de transição energética ou segurança alimentar.

C. Direcionamento de políticas públicas

A funcionalidade da cadeia de negócio como instrumento de gestão territorial se revela mais claramente na sua capacidade de orientar políticas públicas em múltiplas dimensões. Diferentemente de políticas setoriais tradicionais, que operam sobre setores isolados, a lógica da cadeia exige uma abordagem transversal, interinstitucional e multinível. As intervenções recomendadas a partir da análise da cadeia de negócio incluem:

- Infraestrutura: obras de mobilidade logística (estradas vicinais, ferrovias, energia), parques industriais, entrepostos e plataformas multimodais.
- Política fiscal e crédito: incentivos tributários territoriais vinculados a segmentos da cadeia; acesso a crédito orientado a elos críticos; consórcios intermunicipais.
- Qualificação profissional: cursos técnicos e de extensão voltados para a vocação da cadeia (manutenção de equipamentos agroindustriais, processamento de alimentos, logística).

- Governança institucional: criação de fóruns de governança entre municípios, sindicatos, cooperativas, empresas e universidades, voltados à coordenação da cadeia.
- Regulação e licenciamento: revisão de marcos normativos que inibem a instalação de determinados empreendimentos ou criam insegurança jurídica na retroárea.

Ferreira (2021) acrescenta que o projeto urbano de um *cluster* – a ser estruturado em consonância com os elos da cadeia – deve ser orientado por esses dados, integrando o zoneamento produtivo à dinâmica territorial mapeada. Isso permite alinhar os arranjos físicos e funcionais do espaço urbano com os requisitos da cadeia, maximizando sua eficiência e atratividade.

D. Análise de completude e adensamento

Por fim, a análise da cadeia permite calcular o seu grau de completude, isto é, o percentual de elos efetivamente presentes no território. Quanto maior a completude, maior o potencial de agregação de valor local, geração de emprego, arrecadação tributária e cooperação entre empresas. A partir dessa análise, é possível simular cenários de adensamento, que consistem na ativação de elos ausentes e na instalação de novos empreendimentos que fortaleçam os segmentos existentes, elevando a densidade econômica e a resiliência do território.

Como afirma Yamashita et al. (2025), "uma cadeia completa e densa é condição necessária para que um território se torne competitivo e sustentável a longo prazo". Portanto, o mapeamento da cadeia de negócio transforma-se não apenas em um diagnóstico técnico, mas em uma base estruturante para o planejamento estratégico municipal e regional.

5.5. VETOR DE ESTRUTURAÇÃO TERRITORIAL DE CLUSTERS

A articulação entre cadeia de negócio e a estruturação de clusters constitui um desdobramento estratégico do modelo apresentado nos tópicos anteriores. Enquanto a cadeia de negócio fornece a cartografia funcional da economia local — identificando os fluxos de insumos, bens, serviços e conhecimento — o cluster territorial representa sua materialização espacial, condensando no território os equipamentos e a infraestrutura que compõem esse sistema produtivo.

Conforme Ferreira (2021), a cadeia de negócio é a “estrutura invisível” que organiza os processos produtivos e comerciais, enquanto o cluster é sua “expressão urbana visível”, moldada por decisões de projeto, políticas públicas e práticas colaborativas entre os agentes envolvidos. Essa integração é essencial para que o cluster não seja apenas uma justaposição de empresas, mas um sistema funcional, com elevada densidade econômica, complementaridade de funções e articulação interinstitucional.

Na proposta metodológica de Yamashita et al. (2025), a cadeia de negócio fornece o insumo primário para a concepção de projetos territoriais de desenvolvimento produtivo.

Ao identificar os elos existentes e ausentes, bem como as interações entre agentes de diferentes segmentos, é possível planejar a alocação espacial das atividades de forma a potencializar cooperações operacionais. Um exemplo é o compartilhamento de insumos e serviços; a redução de custos logísticos; atração de investimentos orientados à completude da cadeia e o planejamento do uso e ocupação do solo conforme as necessidades funcionais da cadeia.

Essa abordagem rompe com modelos tradicionais que muitas vezes ignoram a estrutura econômica preexistente e resultam em parques industriais subutilizados e desconectados da lógica regional de produção e consumo (FERREIRA, 2021). O cluster estruturado com base na cadeia de negócio atua como um vetor de dinamização territorial, promovendo efeitos multiplicadores sobre a economia local e regional. Esse processo se manifesta na geração de novos negócios; no aumento da base tributária municipal; na criação de empregos qualificados; e na atração de investimentos privados, bem como na formação de parcerias público-privadas.

Como aponta Yamashita et al. (2025), a consolidação do cluster retroalimenta a cadeia de negócio, pois gera nova demanda, intensifica fluxos, eleva a eficiência coletiva e cria uma cultura de cooperação. Isso favorece o surgimento de arranjos produtivos mais resilientes e adaptáveis às transformações tecnológicas, climáticas e de mercado.

A cadeia de negócio, por articular agentes, etapas produtivas e serviços de apoio em uma mesma lógica organizacional, oferece uma base conceitual eficaz para estruturar clusters territoriais. Ao ser aplicada, permite reconhecer os elos estratégicos, identificar fragilidades, promover o adensamento produtivo e orientar o ordenamento do território de forma integrada. Assim, a articulação entre a lógica das cadeias de negócio e os clusters amplia as possibilidades de ação das políticas de desenvolvimento local e contribui para o fortalecimento da competitividade e da dinâmica econômica regional.

5.6. TÓPICOS CONCLUSIVOS

A noção de cadeia de negócio consolida-se como resposta às limitações da cadeia de valor, da cadeia produtiva e da cadeia de suprimentos, ao deslocar o foco de uma leitura linear e intraempresarial para uma abordagem sistêmica, relacional e territorializada. Ela integra fluxos produtivos, logísticos, institucionais e fiscais, permitindo compreender economias locais e regionais como arranjos complexos, em que desenvolvimento não se reduz à eficiência de uma firma ou setor isolado, mas à articulação entre múltiplos agentes e escalas.

A decomposição em segmentos a montante, atividade âncora, jusante e elo de apoio oferece uma arquitetura conceitual que viabiliza o mapeamento completo da dinâmica econômica de um território, identificando quem fornece insumos, quem organiza a produção central, quem transforma e comercializa, e quem dá suporte transversal. Essa estrutura reticulada, em lugar de linear, mostra que a competitividade territorial depende tanto da existência de uma âncora forte quanto da densidade de fornecedores, mercados

e serviços de apoio, permitindo localizar vazios estruturais e orientar intervenções específicas em cada elo.

Ao converter a realidade produtiva em uma “cartografia funcional”, a cadeia de negócio permite identificar gargalos (elos ausentes, frágeis ou caros), oportunidades de adensamento produtivo e prioridades de investimento público e privado. Com isso, transforma-se em instrumento operativo para políticas de infraestrutura, incentivos fiscais, qualificação profissional, governança e regulação, oferecendo uma base objetiva para que decisões de desenvolvimento local e regional deixem de ser genéricas e passem a ser orientadas por evidências sobre onde e como se perde ou se cria valor.

A articulação entre cadeia de negócio e cluster territorial mostra que o cluster não deve ser apenas uma concentração física de empresas, mas a expressão espacial de um sistema econômico previamente entendido em seus fluxos e interdependências. Quando o desenho de um cluster é guiado pela cadeia de negócio, o planejamento urbano-industrial consegue alocar atividades, infraestruturas e serviços de forma complementar, favorecendo cooperação, compartilhamento de ativos, redução de custos logísticos e maior captura de renda e tributos no território.

Tomada como ferramenta de integração, a cadeia de negócio conecta porto (base física e logística), cluster portuário (concentração produtiva) e hidrogênio verde (vetor de descarbonização e inovação) em uma mesma lógica organizacional. Isso permite enxergar o hidrogênio verde não apenas como tecnologia isolada, mas como atividade âncora capaz de reorganizar segmentos a montante (energia renovável, equipamentos, serviços de engenharia), a jusante (indústrias eletrointensivas, exportação, usos finais) e elos de apoio (finanças, P&D, regulação, qualificação), estruturando um cluster portuário-energético com alto potencial de transformação territorial.

Ao final, o capítulo demonstra que a cadeia de negócio é simultaneamente conceito analítico e instrumento de gestão territorial, apto a subsidiar projetos de desenvolvimento, desenho urbano de clusters e políticas ligadas à transição energética. Ao organizar de forma integrada agentes, etapas produtivas, serviços de apoio e decisões de uso do solo, essa abordagem oferece o alicerce metodológico para que portos e clusters portuários se tornem vetores efetivos de descarbonização e reindustrialização, especialmente em arranjos baseados no hidrogênio verde.

CAPÍTULO 6. MODELO CONCEITUAL DE CLUSTER PORTUÁRIO DE HIDROGENIO VERDE

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

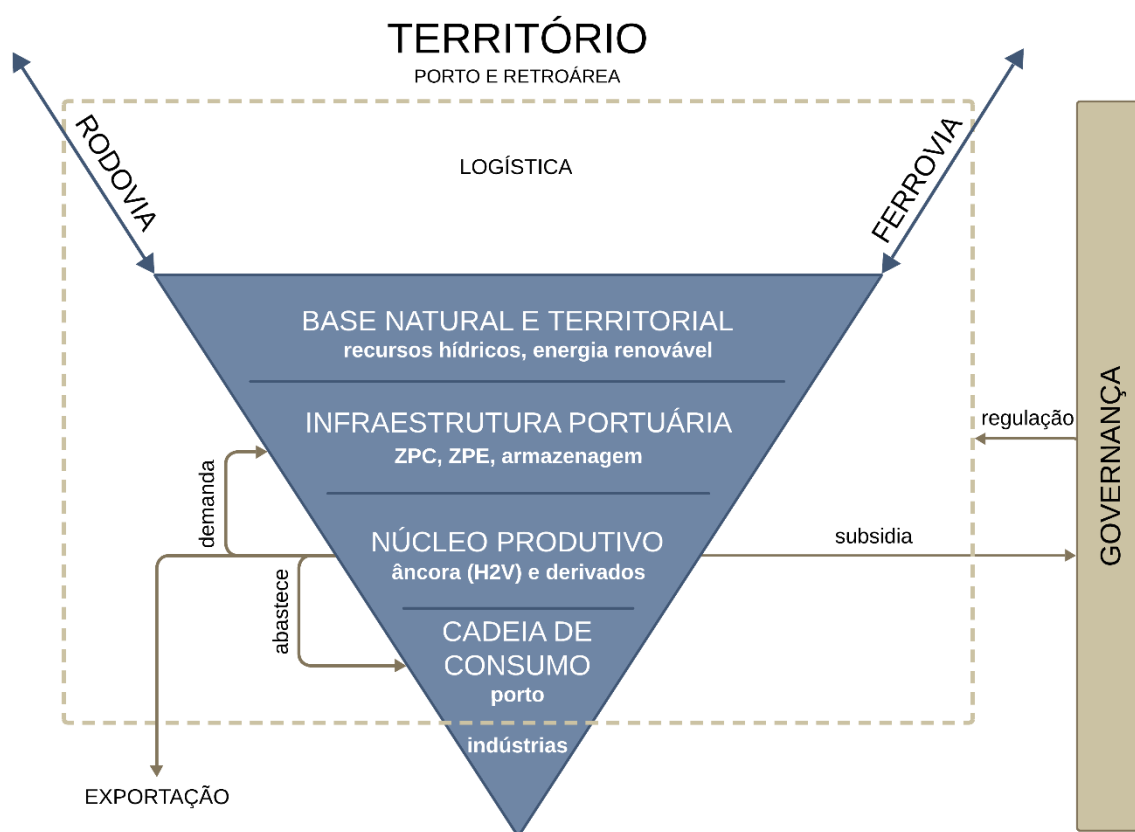
O modelo conceitual do Cluster Portuário de Hidrogênio Verde (CP-H₂V) apresentado neste capítulo organiza, em uma única estrutura, os principais elementos territoriais, logísticos, produtivos e institucionais necessários para viabilizar projetos de hidrogênio verde em contexto portuário. Inspirado na literatura de *seaport clusters*, aglomerações produtivas e cadeias de negócio, o modelo traduz esses referenciais em uma arquitetura territorial multiescalar, na qual o porto deixa de ser apenas nó logístico e passa a atuar como plataforma de transição energética e de reorganização produtiva. Nesse sentido, o CP-H₂V é concebido como um sistema replicável, capaz de ser adaptado a diferentes realidades portuárias, desde que respeitadas as especificidades ambientais, energéticas, infraestruturais e institucionais de cada território.

A proposta articula cinco componentes centrais: o território como moldura condicionadora do cluster; a base natural e territorial, que reúne os fatores estruturantes de água, energia renovável e restrições ambientais; a infraestrutura portuária e logística, que operacionaliza fluxos de insumos e produtos; o núcleo produtivo energético, entendido como indústria âncora responsável pela produção de hidrogênio verde e derivados; e a cadeia de consumo, que integra porto e indústrias usuárias desses vetores energéticos. Transversalmente, um sistema de governança regula e coordena essas camadas, alinhando políticas urbanas, portuárias, energéticas e ambientais. Ao longo do capítulo, o modelo é detalhado como instrumento de leitura e de projeto territorial, com potencial para orientar desde estudos de viabilidade até estratégias de políticas públicas e investimentos em clusters portuário-energéticos sustentáveis.

6.2. MODELO CONCEITUAL

O modelo conceitual do Cluster Portuário de Hidrogênio Verde (CP-H₂V) apresentado na Figura 6.2.1, constitui a base estruturante para formulação de projetos territoriais orientados à produção e circulação de hidrogênio verde e seus derivados. Construído a partir da literatura sobre *seaport clusters* (DE LANGEN, 2004; NOTTEBOOM & RODRIGUE, 2022) e da teoria das aglomerações produtivas e cadeias de negócio (PORTER, 1998; YAMASHITA, 2024), o modelo foi adaptado para incorporar as especificidades territoriais, portuárias e energéticas inerentes ao hidrogênio verde, dialogando com abordagens recentes de clusters energéticos (UNIDO, 2023) e com estudos nacionais sobre integração entre porto e cidade (MONIÉ; VIDAL, 2006).

Figura 6.2.1: Modelo Conceitual do Cluster portuário de Hidrogênio Verde



Fonte: Elaboração própria

A estrutura conceitual aqui proposta organiza-se como um sistema territorial multiescalar, no qual o território funciona como estrutura condicionadora, enquanto as camadas internas operam como subsistemas dotados de funções complementares. O modelo é, portanto, generalizável e replicável, podendo ser aplicado em distintos contextos portuários respeitando sempre as especificidades ambientais, logísticas, institucionais e econômicas de cada local.

O CP-H₂V, tal como estruturado neste trabalho, sintetiza um conjunto de relações sistêmicas que articulam recursos naturais, infraestrutura portuária, capacidade produtiva, demanda industrial e mecanismos de governança. Assim, o modelo não descreve apenas componentes espaciais, mas relações dinâmicas que constituem o funcionamento do cluster e permitem sua adaptação a múltiplos territórios.

6.3. TERRITÓRIO COMO ESTRUTURA CONDICIONADORA

No topo da representação gráfica, e delimitando todo o sistema, encontra-se o Território, concebido aqui como referencial operacional do cluster. Esse território compreende não apenas a área do porto organizado, mas também sua retroárea funcional, onde se localizam ou podem vir a se localizar indústrias de consumo, plantas de processamento, áreas logísticas e serviços associados ao cluster. Tal concepção deriva da abordagem territorial de Monié e Vidal (2006), para quem o porto deve ser compreendido como parte

integrante de um sistema espacial mais amplo, composto por recursos naturais, redes de mobilidade, estruturas produtivas e formas de regulação, articulado a uma rede logística que extrapola os limites administrativos e físicos do território portuário, conectando-o a mercados regionais, nacionais e internacionais.

Assim, o território desempenha duas funções fundamentais:

- Condiciona o desenvolvimento do cluster, na medida em que estabelece limites físicos, socioambientais e normativos;
- É transformado pelas dinâmicas econômicas, logísticas e industriais decorrentes da implantação do cluster.

Essa perspectiva territorializada reforça que projetos de H₂V não podem ser analisados apenas como empreendimentos industriais, mas como instrumentos de reestruturação urbana, produtiva e ambiental, conforme sugerem Ferreira (2021) e a UNIDO (2023).

6.4. BASE NATURAL E TERRITORIAL

A primeira camada interna do modelo, denominada Base Natural e Territorial, reúne os elementos que viabilizam a produção de hidrogênio verde: disponibilidade hídrica, potencial de geração renovável e restrições ambientais. Porter (1998) destaca que a competitividade de um cluster depende, entre outros fatores, das condições dos fatores naturais e infraestruturais que o sustentam. No caso do H₂V, tais condições são ainda mais críticas, dado o caráter intensivo do processo de eletrólise em água e energia.

Além disso, autores como Springer-Heinze (2007) argumentam que clusters industriais dependem de “fatores estruturantes” que configuram sua capacidade de expansão. Na presente análise, esses fatores se manifestam por meio:

- da disponibilidade de água para eletrólise;
- do potencial solar, eólico ou hídrico para geração elétrica;
- das características geomorfológicas que permitem a implantação de infraestrutura portuária ou industrial;
- das restrições ambientais estabelecidas por unidades de conservação ou zonas sensíveis.

6.5. INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA

A segunda camada representa o subsistema de Infraestrutura Portuária e Logística, responsável por habilitar as operações do cluster. Esse subsistema inclui terminais, Zonas de Processamento e Conversão (ZPC), Zonas de Processamento de Exportação (ZPE), sistemas de armazenagem, acessos rodoviários e ferroviários, além das utilidades industriais necessárias ao funcionamento das plantas energéticas.

De acordo com Notteboom e Rodrigue (2022), portos contemporâneos funcionam como “nós logísticos avançados”, cuja performance depende da capacidade de articular fluxos de entrada e saída de cargas com a *hinterlândia* industrial. Em projetos de hidrogênio verde, essa articulação é ainda mais central, pois envolve:

- movimentação de insumos críticos (água, energia, gases industriais);
- exportação de derivados (NH₃, MeOH, H₂ líquido);
- abastecimento marítimo (*bunkering*) para navios movidos a combustíveis verdes.

6.6. NÚCLEO PRODUTIVO

O Núcleo Produtivo Energético ocupa posição central no modelo, funcionando como “indústria âncora” do cluster. Seu papel é produzir hidrogênio verde e derivados (amônia, metanol, HVO), utilizando a infraestrutura e os recursos naturais mencionados anteriormente. A centralidade desse núcleo reflete a lógica de encadeamentos produtivos descrita por Porter (1998), segundo a qual a indústria principal de um cluster é responsável por:

- gerar demanda para fornecedores especializados;
- impulsionar a criação de novas atividades industriais e logísticas;
- atrair investimentos, pesquisa e inovação.

No diagrama, o núcleo produtivo estabelece dois fluxos principais:

- Fluxo ascendente: demanda infraestrutura logística para circulação e distribuição dos produtos;
- Fluxo descendente interno: abastece a cadeia de consumo industrial e portuária;
- Fluxo descendente externo: direciona parte da produção diretamente à exportação por meio dos terminais portuários, quando o hidrogênio verde ou seus derivados não são absorvidos pela cadeia de consumo instalada no território, configurando uma relação direta entre o núcleo produtivo e os mercados externos.

Além disso, o núcleo produtivo subsidia tecnicamente a governança, fornecendo dados essenciais para licenciamento, planejamento territorial e decisões regulatórias – fluxo representado pela seta horizontal. Trata-se de uma relação de interdependência, não de subordinação.

6.7. CADEIA DE CONSUMO

Na base do triângulo invertido encontra-se a Cadeia de Consumo, composta pelas estruturas do porto como navios e equipamentos portuários e as indústrias que utilizam o hidrogênio verde e seus derivados como insumo energético ou químico. Esta camada engloba setores como siderurgia, petroquímica, fertilizantes, logística pesada, transporte marítimo, entre outros.

A literatura de cadeias de negócio (YAMASHITA, 2024) e de clusters produtivos (PORTER, 1998) destaca que a existência de demanda estruturada (*off-take*) é decisiva para viabilidade econômica de novos setores industriais. Isso se confirma no caso do hidrogênio verde, cujos projetos dependem de contratos de longo prazo com consumidores industriais.

No modelo, a cadeia de consumo alimenta simultaneamente:

- o porto, enquanto agente consumidor estratégico, que utiliza o hidrogênio verde e seus derivados na descarbonização das operações portuárias e do transporte marítimo;
- as indústrias, cuja escala depende do volume de demanda das indústrias consumidoras que utilizam o hidrogênio verde como matéria-prima ou insumo intermediário em seus processos produtivos.

Cabe destacar que a representação do território como moldura externa do modelo não implica uma separação rígida entre porto e indústrias consumidoras, mas explicita sua flexibilidade espacial. As atividades industriais podem localizar-se tanto no interior da poligonal portuária quanto fora dela, na retroárea ou em áreas mais afastadas, sem que isso descaracterize a lógica de cluster, desde que se mantenham relações funcionais, fluxos logísticos e vínculos produtivos entre os elos do sistema.

Conforme argumentam Porter (1998) e De Langen (2004), a coesão de um cluster não depende exclusivamente da contiguidade física imediata, mas da densidade das interações econômicas, tecnológicas e institucionais. Nesse sentido, a moldura territorial do CP-H₂V admite diferentes graus de proximidade geográfica entre porto e indústrias, preservando a unidade do cluster.

6.8. GOVERNANÇA COMO SISTEMA REGULADOR TRANSVERSAL

A governança constitui uma das dimensões centrais do modelo conceitual proposto, assumindo o papel de sistema regulador transversal responsável por articular, orientar e estabilizar o funcionamento do Cluster Portuário de Hidrogênio Verde. Representada no diagrama como uma caixa lateral conectada a todas as camadas internas, a governança expressa a dimensão institucional, normativa, financeira e estratégica do cluster, sendo fundamental para a coordenação de atores, a redução de incertezas e a viabilização de investimentos de longo prazo.

A literatura aponta que sistemas portuários complexos dependem de arranjos institucionais capazes de lidar simultaneamente com múltiplos interesses públicos e privados, escalas territoriais distintas e elevados níveis de risco tecnológico e regulatório (DE LANGEN, 2004; NOTTEBOOM; FARREL, 2019). No contexto específico do hidrogênio verde, essa complexidade é ampliada pela natureza emergente das tecnologias, pela necessidade de adequação regulatória e pela forte interface com políticas climáticas, energéticas e industriais (UNIDO, 2023).

Nesse sentido, a governança do CP-H₂V envolve um conjunto diversificado de atores e instrumentos, incluindo autoridades portuárias; governos municipal, estadual e federal; agências reguladoras e ambientais; instituições financeiras e de fomento; universidades e centros de pesquisa; além de representantes do setor produtivo e logístico. A atuação articulada desses agentes é essencial para:

- Coordenar múltiplos atores e interesses, evitando sobreposições institucionais e conflitos de competência;
- Garantir segurança jurídica e previsibilidade regulatória, condição indispensável para atração de investimentos intensivos em capital;
- Articular políticas industriais, energéticas, ambientais, urbanas e portuárias, promovendo coerência entre instrumentos de planejamento;
- Viabilizar processos de licenciamento ambiental e territorial compatíveis com a escala e os riscos das atividades envolvidas;
- Fomentar inovação tecnológica, capacitação de mão de obra e transferência de conhecimento;
- Estruturar mecanismos de financiamento, incentivos econômicos e parcerias público-privadas adequados à transição energética.

No modelo conceitual, a governança estabelece relações diretas e contínuas com as demais camadas do cluster. Ela regula a implantação e a operação da infraestrutura portuária e logística, define parâmetros normativos para o núcleo produtivo energético e orienta as condições de funcionamento da cadeia de consumo industrial e portuária. Ao mesmo tempo, a governança é subsidiada tecnicamente pelos agentes produtivos, que fornecem informações fundamentais sobre volumes de produção, tecnologias empregadas, riscos operacionais e demandas logísticas, permitindo decisões regulatórias e de planejamento mais aderentes à realidade do cluster.

Além disso, a governança opera no território de forma dinâmica, sendo simultaneamente influenciada pelas condições espaciais, ambientais e socioeconômicas locais e responsável por moldar os processos de ocupação, uso do solo e integração porto–retroárea–cidade. Sua posição no diagrama, externa ao sistema produtivo central e conectada por fluxos bidirecionais, reforça a compreensão de que a governança não constitui uma parte interna do processo produtivo, mas uma instância estruturante que confere coerência, estabilidade e capacidade adaptativa ao cluster. Dessa forma, o modelo reconhece a governança como elemento indispensável para assegurar a sustentabilidade econômica, territorial e ambiental do CP-H₂V, bem como sua aplicabilidade a diferentes contextos portuários.

6.9. APLICABILIDADE DO MODELO

Uma das virtudes deste modelo conceitual é sua capacidade de generalização. Por se basear em relações estruturais – e não em condições específicas de um porto –, ele pode ser aplicado em:

- portos especializados ou generalistas;
- portos de diferentes tamanhos;
- contextos *greenfield* ou *brownfield*;
- regiões com variados potenciais energéticos.

UNIDO (2023) destaca que modelos de clusters energéticos bem-sucedidos dependem da capacidade de adaptar metodologias a condições territoriais distintas. O modelo aqui proposto atende a esse critério, fornecendo uma estrutura replicável para formulação de políticas, projetos e estudos de viabilidade.

Portanto, o modelo conceitual apresentado neste capítulo organiza os elementos essenciais – naturais, logísticos, industriais, institucionais e territoriais – e explicita suas interdependências. Assim, permite:

- compreender o porto como agente central da transição energética;
- orientar decisões de planejamento urbano, ambiental e portuário;
- fundamentar análises de impacto urbano, social e ambiental;
- subsidiar estratégias de governança e políticas públicas;
- estruturar estudos de caso e modelagens aplicadas.

Sua utilização, portanto, não se limita ao estudo em curso, mas representa uma contribuição metodológica para o campo de projetos portuários sustentáveis.

6.10. TÓPICOS CONCLUSIVOS

O capítulo demonstra que o CP-H₂V não é apenas um arranjo de instalações industriais, mas um sistema territorial integrado que articula base natural, infraestrutura portuária, núcleo produtivo e cadeia de consumo sob uma mesma lógica de cluster. Essa visão sistêmica permite entender o porto como parte de um ecossistema energético-industrial mais amplo, no qual decisões sobre localização de plantas, desenho logístico e usos do solo são interdependentes.

A moldura territorial e a base natural são apresentadas como condições de possibilidade do cluster, definindo limites físicos, socioambientais e oportunidades de expansão. A disponibilidade de água, potencial renovável e restrições ambientais não são tratadas apenas como insumos técnicos, mas como fatores estruturantes que condicionam a escala do núcleo produtivo e o tipo de inserção do cluster nas políticas de transição energética.

Ao posicionar a infraestrutura portuária e logística como segunda camada do modelo, o capítulo reforça que a viabilidade do CP-H₂V depende da capacidade do porto de atuar como nó logístico avançado para insumos e derivados de hidrogênio. Terminais, ZPE/ZPC, sistemas de armazenagem e conexões *hinterlândia*–porto são apresentados como peças de uma plataforma operacional que conecta produção, consumo e mercados externos.

O núcleo produtivo energético é definido como atividade âncora do cluster, responsável por acionar encadeamentos a montante (fornecedores de equipamentos, serviços técnicos, energia) e a jusante (indústrias consumidoras, exportação, bunkering). O capítulo evidencia que sua função vai além da produção física: ele também subsidia a governança com informação técnica e demanda infraestrutura e regulação adequadas, reforçando a interdependência entre dimensões produtivas e institucionais.

Ao destacar a cadeia de consumo – porto e indústrias usuárias de H₂V e derivados – o modelo sublinha que a existência de demanda estruturada é condição central para a bancabilidade dos projetos. O capítulo mostra que o porto é, simultaneamente, corredor de exportação e consumidor estratégico, sobretudo na descarbonização de operações e do transporte marítimo, o que consolida o CP-H₂V como instrumento direto de cumprimento de metas climáticas.

A governança é apresentada como sistema regulador que conecta todas as camadas do cluster, articulando atores públicos e privados, escalas territoriais e agendas setoriais. O capítulo conclui que, sem arranjos institucionais robustos – capazes de garantir segurança jurídica, coordenação intergovernamental, mecanismos de financiamento e processos de licenciamento compatíveis com a complexidade do H₂V –, o modelo conceitual não se traduz em projetos concretos.

Por fim, o capítulo enfatiza a aplicabilidade do modelo em diferentes contextos portuários, graças ao seu caráter relacional e não prescritivo. Ao organizar de forma clara os elementos naturais, logísticos, produtivos, territoriais e institucionais, o CP-H₂V é proposto como ferramenta metodológica para: enxergar o porto como agente da transição energética; orientar planejamento urbano, ambiental e portuário; apoiar análises de impacto; estruturar estratégias de governança; e fundamentar estudos de caso e modelagens de novos clusters portuário-energéticos.

CAPÍTULO 7. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

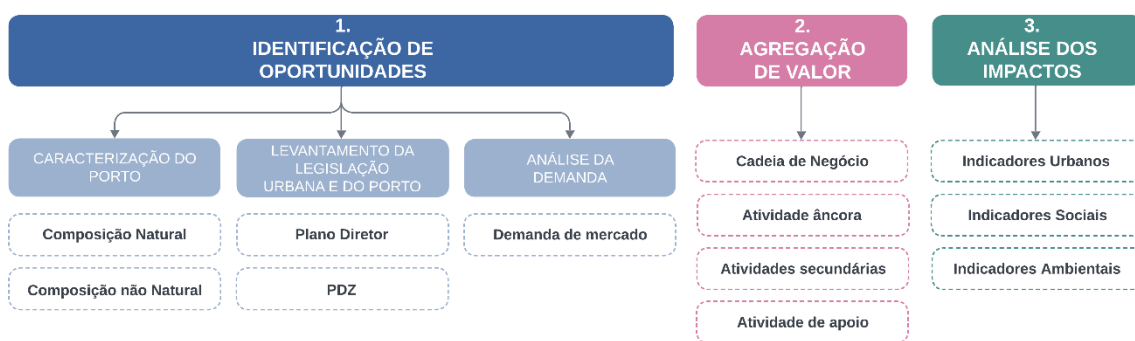
O presente capítulo apresenta o método proposto para conceber e estruturar um Cluster Portuário de Hidrogênio Verde, tomando o porto e sua retroárea como território produtivo estratégico, e não apenas como infraestrutura logística. Organizado em etapas e fases, o método busca oferecer um roteiro técnico-territorial para reduzir incertezas, identificar oportunidades e orientar decisões de investimento, articulando leitura territorial, estruturação da cadeia de negócios e avaliação de impactos urbanos, sociais e ambientais.

A proposta parte da caracterização integrada do porto – em sua composição natural e não natural – e da análise das condicionantes normativas e da demanda off-take, para então avançar na organização da cadeia de negócios do hidrogênio verde (atividade âncora, atividades secundárias e de apoio) e na modelagem físico-funcional do cluster. Por fim, incorpora uma etapa dedicada à mensuração de impactos e à verificação da capacidade do arranjo em internalizar fluxos econômicos, diversificar a base produtiva, gerar empregos qualificados e fomentar inovação, consolidando o método como ferramenta aplicada de planejamento territorial e desenvolvimento sustentável

7.2. MÉTODO PARA DESENVOLVIMENTO DE UM CLUSTER PORTUÁRIO DE HIDROGÊNIO VERDE

A proposta desenvolvida neste estudo visa orientar a elaboração de um cluster portuário de hidrogênio verde, considerando as particularidades territoriais, institucionais e produtivas do porto escolhido.

Figura 7.2.1: Etapas do método proposto



Fonte: Elaboração própria

Conforme mostra a Figura 7.2.1, o processo é dividido em três etapas. A primeira etapa corresponde à identificação de oportunidades e envolve três fases: a primeira trata da caracterização do porto e de sua retroárea, avaliando tanto os recursos naturais disponíveis quanto a composição não natural referente a infraestrutura instalada. Na segunda fase, realiza-se o levantamento e análise da legislação urbana e portuária vigente, com ênfase no Plano Diretor Municipal e no Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto

(PDZ), identificando as condicionantes normativas para a instalação do cluster. A terceira fase se refere a análise da demanda de mercado, formada pelos setores que hoje operam no território e possuem consumo potencial de hidrogênio e seus derivados, associada à possibilidade de atração de novos segmentos.

A segunda etapa trata da agregação de valor a partir da estruturação da cadeia de negócios do hidrogênio verde por meio da organização da atividade âncora, das atividades secundárias e das atividades de apoio, permitindo visualizar como os diferentes segmentos se conectam no ambiente portuário. Por fim, a terceira etapa contempla a análise dos impactos urbanos, sociais e ambientais, com o uso de indicadores que permitam mensurar os efeitos do cluster sobre o território, a população e o meio ambiente.

7.3. ETAPA 1: IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES

A Identificação de Oportunidades é responsável por revelar se o território portuário apresenta condições estruturais, institucionais e produtivas compatíveis com o projeto. Nessa etapa, o método é aplicado com o objetivo de reduzir incertezas e de limitar as possibilidades de inserção do novo arranjo produtivo no contexto existente. Trata-se, portanto, de um momento decisivo do processo metodológico, no qual o porto deixa de ser compreendido apenas como infraestrutura logística e passa a ser analisado como território produtivo estratégico, capaz; ou não; de sustentar novas dinâmicas econômicas.

7.3.1. FASE 1: CARACTERIZAÇÃO DO PORTO

A primeira fase da identificação de oportunidades consiste na caracterização territorial do porto e de sua retroárea, com o objetivo de compreender a aptidão do território para abrigar um empreendimento de alta complexidade tecnológica e logística, como é o caso de um cluster portuário de hidrogênio verde. Trata-se de uma fase crítica do planejamento, pois identifica os condicionantes físicos, ambientais e infraestruturais que influenciam a viabilidade técnica, econômica e socioambiental do projeto (Ferreira, 2021).

Segundo Ferreira (2021), esta etapa deve ser guiada por uma leitura territorial integrada, que envolva tanto os recursos naturais disponíveis quanto os elementos antrópicos já presentes no território. Essa abordagem é essencial em projetos industriais de grande porte, nos quais a interdependência entre meio físico, infraestrutura e regulação territorial define não apenas a capacidade de implantação, mas também os custos de operação e o nível de competitividade do empreendimento (UNIDO, 2023; Rodrigues et al., 2021).

Além disso, é nesta fase que se define a *hinterlândia* portuária – ou seja, a área de influência terrestre do porto – onde se localizam os fornecedores de insumos, as cadeias logísticas de suporte e os mercados consumidores. A caracterização adequada da *hinterlândia* evita a sobreposição de usos e impactos indesejados (Rodrigue, Comtois e Slack, 2013). Esta etapa é estruturada em dois blocos: a composição natural, voltada à

disponibilidade de recursos estratégicos como água e energia; e a composição não natural, que trata da infraestrutura, armazenagem e logística existente.

Figura 7.3.1.1: Detalhamento da primeira fase da Etapa 1



Fonte: Elaboração própria

7.3.1.1. COMPOSIÇÃO NATURAL

A composição natural do território constitui o ponto de partida para a análise da viabilidade de instalação de um cluster portuário de hidrogênio verde. A produção desse vetor energético exige condições ambientais específicas, com destaque para a disponibilidade de água de qualidade, fontes de energia limpa e conformidade com restrições ambientais. A caracterização criteriosa desses elementos é essencial para orientar o dimensionamento da planta de eletrólise, os arranjos espaciais do cluster e os custos operacionais, além de evitar incompatibilidades locais e conflitos de uso do solo.

Segundo Ferreira (2021), a análise do ambiente natural é um dos fundamentos da leitura territorial em projetos urbanos de aglomerações produtivas, pois fornece a base físico-ambiental sobre a qual se assentam as decisões estratégicas de estruturação e funcionamento do empreendimento. No caso de projetos portuários, essa avaliação é ainda mais sensível, dada a incidência de zonas costeiras, ecossistemas frágeis e intensa regulação normativa. O entendimento prévio das condições naturais permite compatibilizar o empreendimento com o território, reduzindo riscos técnicos, ambientais e institucionais.

A seguir, detalham-se os três conjuntos de elementos que devem ser analisados nesta etapa: a disponibilidade e qualidade da água, as fontes de energia renovável e as restrições ambientais existentes.

A. DISPONIBILIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA

A produção de hidrogênio verde por eletrólise requer grandes volumes de água com elevado grau de pureza. O primeiro passo da análise consiste na identificação das fontes hídricas disponíveis. É fundamental verificar a disponibilidade hídrica legal por meio das outorgas de uso da água emitidas pelos órgãos competentes, bem como eventuais conflitos de uso já existentes.

Paralelamente, deve-se avaliar a qualidade da água bruta disponível pois pode demandar processos complementares de purificação ou pré-tratamento. Em contextos onde a água subterrânea não é acessível ou apresenta qualidade comprometida, pode ser considerada a dessalinização da água do mar como alternativa técnica, especialmente quando a planta de produção estiver próxima à costa.

Embora a dessalinização seja tecnicamente viável e já adotada em projetos internacionais, ela apresenta custo operacional mais elevado e gera um subproduto ambientalmente sensível: a salmoura. O descarte inadequado da salmoura pode provocar alterações significativas nos ecossistemas aquáticos, exigindo soluções específicas de mitigação e o devido licenciamento ambiental (IRENA, 2021; UNIDO, 2023).

O mapeamento das condições hídricas deve, portanto, integrar: (i) a disponibilidade quantitativa, (ii) a compatibilidade legal de uso, (iii) a adequação da qualidade e (iv) os custos e impactos das alternativas tecnológicas de tratamento.

B. FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL

A produção de hidrogênio verde depende da utilização exclusiva de eletricidade proveniente de fontes renováveis, razão pela qual a análise energética constitui um dos eixos centrais da caracterização natural. O levantamento deve incluir a avaliação do potencial solar e eólico da região, considerando dados meteorológicos de longo prazo, mapas de irradiação solar e velocidade média dos ventos. Tais dados podem ser obtidos em bancos nacionais e internacionais de dados climáticos.

Além do potencial bruto, deve-se avaliar a disponibilidade física de áreas livres para a instalação de usinas fotovoltaicas ou parques eólicos. A energia solar, por exemplo, requer grandes extensões territoriais, isso impõe limitações importantes em áreas portuárias adensadas ou com forte presença de zonas de proteção ambiental. Nessas situações, recomenda-se avaliar soluções complementares como a implantação de sistemas fotovoltaicos sobre coberturas, estacionamentos, áreas impermeabilizadas ou mesmo canais logísticos internos (UNIDO, 2023; Rodrigues et al., 2021).

No caso da energia eólica, a viabilidade técnica está relacionada à constância e qualidade dos ventos. Quando o espaço terrestre é limitado, pode-se considerar a instalação de sistemas de geração *offshore* que utilizam plataformas marítimas para a captação de

vento, isto é, geração *onshore* instalada em terra firme, e *offshore* localizada no mar sobre plataformas fixas ou flutuantes (IEA, 2022; UNIDO, 2023). Embora esta modalidade ainda apresente custo de implantação mais elevado, ela pode ser vantajosa em contextos com escassez de solo disponível, oferecendo maior fator de capacidade e estabilidade operacional (IEA, 2022; IRENA, 2021).

Cabe registrar que a hidreletricidade, embora predominante na matriz elétrica de muitos países, ainda é objeto de debate no cenário internacional. Diretrizes da União Europeia e agências certificadoras ainda não reconhecem plenamente a hidreletricidade como fonte renovável para fins de produção de hidrogênio verde, especialmente em casos de grandes usinas com elevados impactos ecológicos. Esse fator deve ser considerado quando o objetivo for a exportação do produto para mercados com exigências normativas rigorosas.

C. RESTRIÇÕES AMBIENTAIS

Por fim, a caracterização natural deve identificar as restrições ambientais impostas à ocupação e ao uso do solo no entorno portuário. Isso inclui o levantamento de Unidades de Conservação (UCs), Áreas de Preservação Permanente (APPs), zonas de amortecimento, corredores ecológicos, manguezais e outros ecossistemas protegidos por legislação federal, estadual ou municipal.

A análise deve cruzar essas informações com os mapas de zoneamento e infraestrutura disponível, de forma a indicar zonas aptas à instalação industrial e áreas de exclusão ambiental. Recomenda-se também verificar a existência de passivos ambientais e sobreposição com áreas de risco, como zonas de inundação, erosão costeira ou instabilidade geotécnica.

A caracterização da composição natural deve ser conduzida com apoio de dados secundários (IBGE, ANA, ONS, INMET, INPE, MMA) e imagens de satélite. O produto final deve apresentar mapas de aptidão ambiental, quadros de restrições legais, projeções energéticas e diagnósticos hídricos.

Essa análise permite que a escolha da localização e o dimensionamento do cluster sejam fundamentados em parâmetros objetivos, baseados em evidências ambientais e tecnológicas (Ferreira, 2021). Na sequência, a caracterização da composição não natural permitirá complementar o diagnóstico do território com os elementos de infraestruturas e logísticos necessários à implantação do empreendimento.

7.3.1.2. COMPOSIÇÃO NÃO NATURAL

A caracterização da composição não natural envolve o levantamento e análise da infraestrutura portuária já existente, da capacidade de expansão física e técnica da área, bem como das condições de conectividade logística com o entorno e com a *hinterlândia* produtiva. Esta dimensão é importante para avaliar a aptidão do porto para receber as instalações do cluster de hidrogênio verde, cuja cadeia produtiva demanda interfaces

especializadas para movimentação, armazenamento e distribuição de insumos e produtos de alta periculosidade e sensibilidade técnica.

Segundo Ferreira (2021), em uma proposta metodológica voltada ao planejamento de aglomerações produtivas, é indispensável reconhecer e integrar a infraestrutura logística como base de suporte físico-funcional do cluster, com vistas à maximização da eficiência dos fluxos e à minimização das externalidades operacionais. A seguir, são apresentados os três campos de análise prioritários desta sub etapa: capacidade do porto, terminais de armazenamento e rede logística e transporte.

A. CAPACIDADE DO PORTO

O primeiro aspecto da análise diz respeito à capacidade instalada do porto para movimentação de cargas, com especial atenção aos granéis líquidos e gasosos. Deve-se identificar o volume atual e projetado de cargas operadas, os tipos de carga dominantes (contêineres, líquidos inflamáveis, fertilizantes, químicos) e o grau de especialização dos terminais. Também é relevante verificar a taxa de ocupação dos berços, calados disponíveis, e tempo médio de operação, pois esses indicadores refletem a capacidade de absorver novas atividades industriais sem comprometer a operação corrente.

Além dos indicadores quantitativos, é fundamental mapear a infraestrutura técnica de suporte às operações, como sistemas de bombeamento, linhas de carregamento e dutos internos, que são essenciais para a movimentação de hidrogênio e seus derivados em estado líquido ou comprimido. Portos com vocação atual para granéis líquidos, petroquímicos ou fertilizantes apresentam maior potencial de integração com a cadeia do hidrogênio verde.

B. TERMINAIS DE ARMAZENAMENTO

Outro fator decisivo é a existência (ou possibilidade de implantação) de instalações para armazenamento de hidrogênio e seus subprodutos. Esses produtos exigem condições específicas de segurança, isolamento térmico, ventilação e monitoramento, sendo necessário verificar a compatibilidade das estruturas existentes com as normas aplicáveis.

Nesse processo, deve-se localizar os tanques e silos já existentes na área portuária, identificando sua capacidade instalada e as especificações técnicas de operação. É igualmente necessário analisar a possibilidade de ampliação dessas áreas de armazenagem, a partir de uma leitura fundiária que aponte espaços disponíveis e compatíveis ambiental e funcionalmente com as exigências da atividade. Também se recomenda examinar a presença de zonas logísticas ou áreas retroportuárias com vocação industrial que possam ser adaptadas ou convertidas para esse tipo de uso, considerando as diretrizes do plano de zoneamento do porto e dos instrumentos de planejamento urbano.

Essa abordagem permitirá compreender se o porto dispõe de infraestrutura minimamente adequada para o início das operações ou se há necessidade de investimentos em instalações de suporte.

C. REDE LOGÍSTICA E TRANSPORTE

A estrutura logística e os modos de acesso ao porto constituem o terceiro pilar desta sub etapa. A análise deve abranger os modos rodoviário, ferroviário, aquaviário e dutoviário, com especial atenção à conectividade intermodal existente, à capacidade de escoamento e ao grau de integração do porto com os centros consumidores e industriais de sua *hinterlândia*.

Recomenda-se iniciar com o mapeamento dos principais eixos logísticos de acesso ao porto, incluindo vias urbanas e regionais de interligação com polos industriais e centros de consumo. Em seguida, é importante avaliar a capacidade de carga desses corredores, considerando aspectos como pavimentação e pontos críticos. Também devem ser identificados os terminais de transbordo existentes e as interfaces intermodais operacionais ou planejadas, a fim de compreender o grau de articulação funcional entre os modos disponíveis.

Por fim, o diagnóstico deve apontar os gargalos operacionais que afetam a fluidez logística do sistema, bem como as áreas que apresentam potencial de ampliação da rede, seja por projetos já em andamento, seja por possibilidades futuras de investimento e integração modal. De acordo com Monié e Vidal (2006), a intermodalidade é uma das condições fundamentais para a integração porto-cidade e para a consolidação de zonas logísticas eficientes.

Essa análise da composição não natural fornece os subsídios para avaliar o grau de prontidão da infraestrutura existente e os investimentos necessários para adaptar o território portuário à lógica produtiva do hidrogênio verde. Em conjunto com a caracterização natural, essa sub etapa finaliza o diagnóstico do território portuário e prepara a base para o levantamento normativo da próxima etapa.

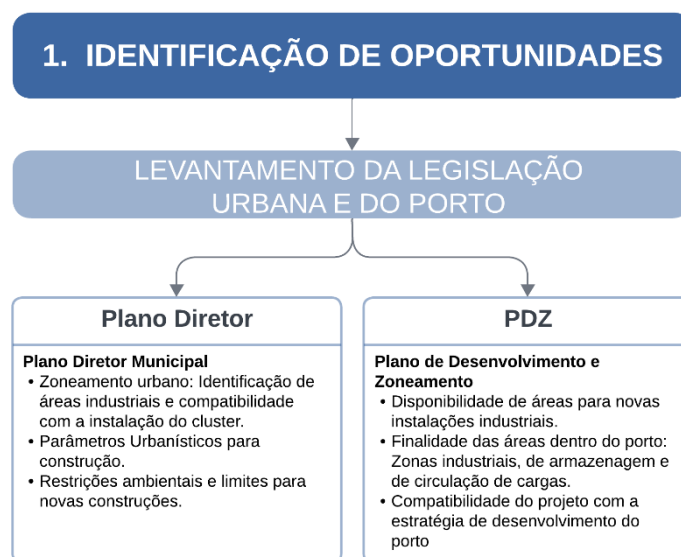
7.3.2. FASE 2: LEVANTAMENTO DA LEGISLAÇÃO URBANA E DO PORTO

A segunda fase propõe o levantamento e a análise das normas urbanísticas e dos instrumentos de planejamento portuário vigentes, a fim de verificar a compatibilidade da implantação do cluster com os marcos legais e diretrizes territoriais. Trata-se de uma fase essencial para assegurar que o empreendimento esteja em conformidade com o uso do solo urbano e portuário, respeitando tanto os parâmetros legais quanto os objetivos de desenvolvimento das políticas públicas locais e setoriais.

A análise normativa ocupa papel imprescindível nos estudos de viabilidade de empreendimentos urbanos e industriais de grande porte. Como destacam Ferreira (2021) e Monié e Vidal (2006), a compatibilização entre a proposta projetual e o sistema jurídico-territorial não apenas confere segurança jurídica ao investimento, mas também orienta decisões estratégicas quanto à localização, desenho e escala do projeto. Ademais, a legislação vigente impõe condicionantes importantes relativas à ocupação do solo, ao licenciamento ambiental, ao zoneamento e à tipologia de usos permitidos.

Neste contexto, a etapa divide-se em dois eixos complementares: o Plano Diretor Municipal, enquanto instrumento básico de ordenamento territorial urbano e o Plano de Desenvolvimento e Zoneamento Portuário (PDZ), enquanto dispositivo regulador da ocupação e uso da área sob jurisdição da autoridade portuária. Juntos, esses eixos fornecem o arcabouço jurídico-territorial necessário para delimitar a área de implantação, validar os usos pretendidos, identificar exigências legais específicas e antever restrições, conflitos ou lacunas regulatórias que possam afetar o desenvolvimento do cluster.

Figura 7.3.2.1: Detalhamento da segunda fase da Etapa 1



Fonte: Elaboração própria

7.3.2.1. PLANO DIRETOR

A análise do Plano Diretor Municipal (PDM) constitui o primeiro eixo da segunda etapa do método, sendo o instrumento de reconhecimento da legalidade e viabilidade urbanística da instalação de um cluster produtivo de grande porte. Conforme estabelece o Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001), o plano diretor orienta o desenvolvimento urbano e organiza o uso do solo no território municipal, definindo zonas funcionais, parâmetros construtivos, diretrizes ambientais e normas de parcelamento e ocupação. Seu exame permite verificar, no âmbito urbano, se a proposta está juridicamente amparada e se existem barreiras legais que limitem ou inviabilizem sua implantação.

Contudo, quando se trata de áreas portuárias federais, a aplicação do plano diretor encontra limites legais e institucionais. Por força da Lei nº 12.815/2013 e do regime jurídico dos portos organizados, os territórios sob jurisdição da autoridade portuária — denominados poligonais portuárias — estão sujeitos a normativas específicas, entre as quais se destaca o Plano de Desenvolvimento e Zoneamento Portuário (PDZ). Nesses casos, o plano diretor não regula diretamente o uso do solo interno ao porto, mas pode influenciar áreas adjacentes, retroportuárias ou de interface urbana, além de estabelecer

restrições ambientais, diretrizes de sustentabilidade e políticas de articulação urbana que incidem sobre o entorno imediato.

Essa sobreposição institucional gera um campo de tensão normativa, que exige uma leitura integrada e crítica dos dispositivos legais. É indispensável verificar, em cada caso, até onde se estende a abrangência do plano diretor e como ele trata a zona portuária, especialmente em aspectos como meio ambiente, conectividade urbana, desenvolvimento econômico e uso do solo nas áreas retroportuárias.

A. ZONEAMENTO URBANO: IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COMPATÍVEIS

O primeiro aspecto a ser analisado é o zoneamento urbano nas áreas externas à poligonal portuária. Deve-se identificar as zonas classificadas como industriais, logísticas, tecnológicas ou de desenvolvimento econômico, verificando sua compatibilidade com os usos previstos para o cluster. Essa análise envolve a leitura dos mapas de zoneamento e das tabelas de usos permitidos, bem como a identificação de zonas mistas ou de expansão controlada. No caso de retroáreas localizadas fora da jurisdição portuária, o zoneamento urbano pode ser determinante para viabilizar ou restringir determinadas atividades produtivas, como o armazenamento de substâncias químicas, a instalação de indústrias ou a circulação de veículos de grande porte.

B. PARÂMETROS URBANÍSTICOS PARA CONSTRUÇÃO

Nas áreas em que o plano diretor tem vigência plena, deve-se analisar os parâmetros urbanísticos aplicáveis: coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, altura máxima, recuos, permeabilidade, entre outros. Esses parâmetros influenciam diretamente o desenho urbano do cluster, e sua verificação antecipada permite ajustar o partido arquitetônico e evitar demandas de regularização posteriores.

Já no interior da poligonal portuária, esses parâmetros são substituídos ou complementados pelo zoneamento funcional do PDZ. Ainda assim, é relevante compreender a articulação entre as normas urbanísticas e as diretrizes portuárias, sobretudo quando o projeto exige integração entre áreas internas e externas ao porto, como ocorre em cadeias logísticas multimodais.

C. RESTRIÇÕES AMBIENTAIS E DIRETRIZES TERRITORIAIS DO PLANO DIRETOR

Mesmo sem disciplinar diretamente o uso do solo dentro do porto, o plano diretor pode prever restrições ambientais relevantes que afetam o projeto, como delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APPs), Unidades de Conservação (UCs), zonas de amortecimento, áreas de risco e corredores ecológicos. Essas determinações podem restringir ou condicionar a implantação de infraestrutura em determinadas áreas da retroárea, exigindo estudos ambientais específicos ou compensações. Além disso, o plano diretor pode estabelecer macrozonas ambientais, diretrizes para uso racional dos recursos naturais, instrumentos de gestão costeira ou exigências para estudos de impacto

ambiental. Tais previsões devem ser interpretadas com atenção, pois são elas que conferem legitimidade ao uso sustentável do território e subsidiam os procedimentos de licenciamento ambiental do cluster.

Dessa forma, a leitura do Plano Diretor Municipal deve ser conduzida com foco duplo: (i) verificar a viabilidade urbanística nas áreas fora da poligonal portuária e (ii) compreender como o município orienta o uso, a proteção e a transformação do território em sua interface com o porto. O método recomenda que essa análise seja sistematizada com os seguintes elementos: zoneamento urbano, usos permitidos, parâmetros construtivos, restrições ambientais e diretrizes territoriais. Esses dados alimentarão a etapa seguinte, voltada ao exame do PDZ e das normas que regem o interior do porto, permitindo uma abordagem integrada entre os domínios urbano e portuário.

7.3.2.2. PLANO DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO DO PORTO – PDZ

O Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto (PDZ) constitui o principal instrumento de ordenamento espacial da área portuária sob jurisdição federal. Sua elaboração e atualização são de responsabilidade da autoridade portuária, conforme estabelecido pela Lei nº 12.815/2013 e regulamentado pela Resolução nº 7.067/2023 da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ). O PDZ define a organização funcional do porto, classifica as zonas internas conforme usos predominantes (industrial, operacional, logística, apoio, proteção ambiental etc.), estabelece diretrizes para expansão física e racionalização das operações, e orienta os investimentos públicos e privados em infraestrutura portuária.

Na perspectiva metodológica adotada neste estudo, a análise do PDZ é essencial para verificar a viabilidade espacial e institucional da instalação do cluster dentro da área portuária, identificando os limites, possibilidades e restrições à ocupação de terrenos, à implantação de infraestrutura industrial e à circulação de produtos e insumos em larga escala. Ao contrário do Plano Diretor Municipal, que regula o território urbano sob domínio do poder público local, o PDZ disciplina o espaço portuário federalizado, exigindo uma abordagem integrada e um diálogo permanente entre esferas administrativas distintas.

A. DISPONIBILIDADE DE ÁREAS PARA NOVAS INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

O primeiro aspecto a ser analisado no PDZ refere-se à identificação de áreas disponíveis para novas implantações industriais ou logísticas. Essa verificação envolve a leitura dos mapas de zoneamento funcional do porto, geralmente organizados em macrozonas ou setores, e a análise das descrições de uso de cada polígono. É fundamental determinar se há lotes ainda não concedidos ou subutilizados, se existem áreas reservadas para expansão industrial e se há projeções de investimentos que possam interferir na ocupação pretendida.

A análise deve considerar a capacidade instalada da área portuária; a existência de restrições operacionais ou ambientais; a conformidade da área com a atividade âncora do cluster (produção de hidrogênio, armazenamento, derivação química etc.) e a proximidade das áreas com acessos logísticos e terminais especializados.

Ferreira (2021) observa que o grau de disponibilidade territorial influencia não apenas a viabilidade técnica do empreendimento, mas também seu tempo de maturação, custo de implantação e riscos regulatórios. Por isso, a metodologia recomenda que essa análise seja associada à verificação dos registros cadastrais, contratos de arrendamento e planos de ocupação da autoridade portuária.

B. FINALIDADE DAS ÁREAS DENTRO DO PORTO

Além da disponibilidade física, é necessário verificar a finalidade legal e funcional das áreas previstas no PDZ. Cada setor da poligonal portuária possui destinação específica, podendo estar classificado, por exemplo, como zona operacional, zona de armazenagem, zona administrativa, zona de apoio logístico, zona industrial, zona de proteção ambiental, entre outras.

A implantação de um cluster de hidrogênio verde requer áreas cuja finalidade seja compatível com atividades industriais, processamento de insumos energéticos, armazenamento de produtos perigosos e circulação de modais pesados. Dessa forma, é imprescindível analisar se a zona pretendida admite a instalação de plantas industriais; se há restrições quanto à periculosidade ou emissões dos produtos processados e se a finalidade definida está em consonância com as atividades econômicas.

Nos casos em que a finalidade da zona seja exclusivamente de armazenagem ou circulação, pode ser necessário pleitear a revisão do zoneamento funcional junto à autoridade portuária ou buscar áreas adjacentes com perfil industrial consolidado. A coerência entre uso pretendido e finalidade portuária evita impasses legais no processo de licenciamento, de arrendamento e de obtenção de autorizações operacionais.

C. COMPATIBILIDADE DO PROJETO COM A ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PORTO

Por fim, a análise deve verificar se a proposta do cluster está alinhada à estratégia de desenvolvimento portuário. Esse alinhamento é essencial para demonstrar que o projeto não apenas se encaixa na estrutura física do porto, mas contribui para sua modernização, diversificação de atividades e inserção em cadeias de baixo carbono.

Entre os elementos a considerar, destacam-se a coerência com os objetivos de eficiência logística e inovação tecnológica; a aderência às políticas públicas setoriais, como transição energética e descarbonização; a contribuição para o uso intensivo e racional da infraestrutura existente e a potencial integração com outras atividades econômicas já existente no porto, como fertilizantes, combustíveis, logística verde e exportações agroindustriais.

Essa verificação deve ser registrada a fim de permitir que o cluster seja enquadrado como projeto estruturante ou prioritário no contexto do desenvolvimento portuário local, o que pode favorecer sua tramitação institucional e captação de recursos públicos ou privados.

Portanto, a análise do PDZ vai além da simples identificação de terrenos livres. Ela exige uma leitura estratégica da estrutura interna do porto, de sua lógica operacional, de seus dispositivos legais e de sua articulação com os objetivos nacionais de desenvolvimento portuário e transição energética. Esta leitura, articulada à análise do plano diretor municipal, fornece uma boa base para a definição da área de implantação do cluster, para a sua legalização fundiária e para o planejamento técnico das fases seguintes do método.

7.3.3. FASE 3: ANÁLISE DA DEMANDA

A terceira fase do método tem como finalidade identificar as condições objetivas para a consolidação de um cluster, observando as possibilidades de inserção mercadológica do produto. Trata-se de uma fase estratégica voltada à compreensão da viabilidade do empreendimento, ao reconhecimento dos usos potenciais do hidrogênio como insumo energético ou industrial e à identificação dos setores econômicos capazes de sustentar, de forma contínua, a operação do cluster. Ao antecipar as funcionalidades econômicas do sistema produtivo, essa etapa contribui para orientar tanto a escala da produção quanto a organização espacial e funcional do cluster no território portuário.

No contexto da transição energética, a consolidação de um cluster de hidrogênio verde depende, prioritariamente, da existência de demanda de mercado, entendida como o conjunto de consumidores já estabelecidos no território ou em sua área de influência que apresentam potencial imediato de utilização do hidrogênio e de seus derivados. Assim, a análise da demanda não se limita a projeções genéricas, mas busca associar o produto a usos territoriais verificáveis, conectados a cadeias produtivas existentes ou a processos de descarbonização em curso (IEA, 2022; UNIDO, 2023).

Metodologicamente, essa fase organiza a leitura do mercado a partir de dois movimentos complementares: a identificação da demanda existente, relacionada a consumidores já instalados no território e em sua área de influência imediata; e a avaliação do potencial de atração de novos demandantes, associado à implantação de novas atividades industriais e logísticas induzidas pelo cluster. A Figura 7.3.3.1 apresenta o detalhamento dessa fase.

Figura 7.3.3.1: Detalhamento da terceira fase da Etapa 1



Fonte: Elaboração própria

7.3.3.1. DEMANDA DE MERCADO

Este eixo propõe a análise da viabilidade mercadológica da implantação do cluster, considerando a lógica de inserção do hidrogênio verde como insumo estratégico em diferentes setores econômicos e sua articulação com a estrutura produtiva local. A análise está organizada em um bloco: a análise da demanda territorial, conduzida sob duas óticas complementares — a intraportuária e a da retroárea.

A. ANÁLISE DA DEMANDA TERRITORIAL

Esse bloco dedica-se à identificação e qualificação da demanda potencial existente no território e na sua *hinterlândia* imediata. Parte-se do mapeamento dos setores econômicos instalados que poderiam absorver o hidrogênio verde como insumo ou energia, com foco em atividades industriais eletrointensivas, cadeias químicas e de transformação, operadores logísticos e de transporte, complexos industriais e estruturas retroportuárias. Para conferir consistência ao diagnóstico, a demanda é identificada por setores e funções, e não apenas por empresas isoladas, permitindo compreender o papel do cluster em termos de encadeamentos produtivos.

A coleta e sistematização dos dados envolvem o uso de bases secundárias oficiais e documentais (planos setoriais, inventários de emissões, relatórios de movimentação e consumo energético, registros econômicos e produtivos), complementadas, quando pertinente, por instrumentos primários, como consultas técnicas a atores institucionais, operadores, associações e agentes produtivos. A análise busca identificar: quais setores possuem consumo energético relevante e dependência de combustíveis fósseis; quais aplicações do hidrogênio e de seus derivados apresentam maior aderência tecnológica no curto, médio e longo prazo; e quais consumos podem ser internalizados no território, reduzindo custos logísticos e elevando a previsibilidade do mercado.

Além de verificar a existência atual de demanda, o método incorpora a avaliação do potencial de indução dessa demanda, considerando que a implantação do cluster pode estimular novos usos e ampliar a base consumidora mediante incentivos regulatórios, investimentos em infraestrutura, disponibilidade de utilidades (energia, água, tancagem, dutovias) e estratégias de inovação e cooperação empresarial. Nessa perspectiva, recomenda-se que a demanda seja classificada em pelo menos três níveis: demanda imediata, demanda potencial por substituição tecnológica (substituição de combustíveis em operações e logística) e demanda prospectiva por atração de novas atividades, vinculada à implantação de unidades de transformação e indústrias correlatas.

Como produto metodológico, a análise deve resultar em: um quadro síntese dos setores e funções demandantes, indicando perfil energético predominante e vocação para uso de hidrogênio e derivados; a identificação de possíveis consumidores e segmentos prioritários; e a construção de um esquema territorial de demanda, articulando o porto e a área de influência ampliada, com indicação dos fluxos energéticos, produtivos e logísticos. O cruzamento entre estrutura instalada, usos possíveis e horizonte temporal de adoção permite projetar cenários realistas de consumo, orientar decisões sobre escala de produção e apoiar a etapa seguinte de agregação de valor, na qual a cadeia de negócios é desenhada com base nos elos efetivamente demandados.

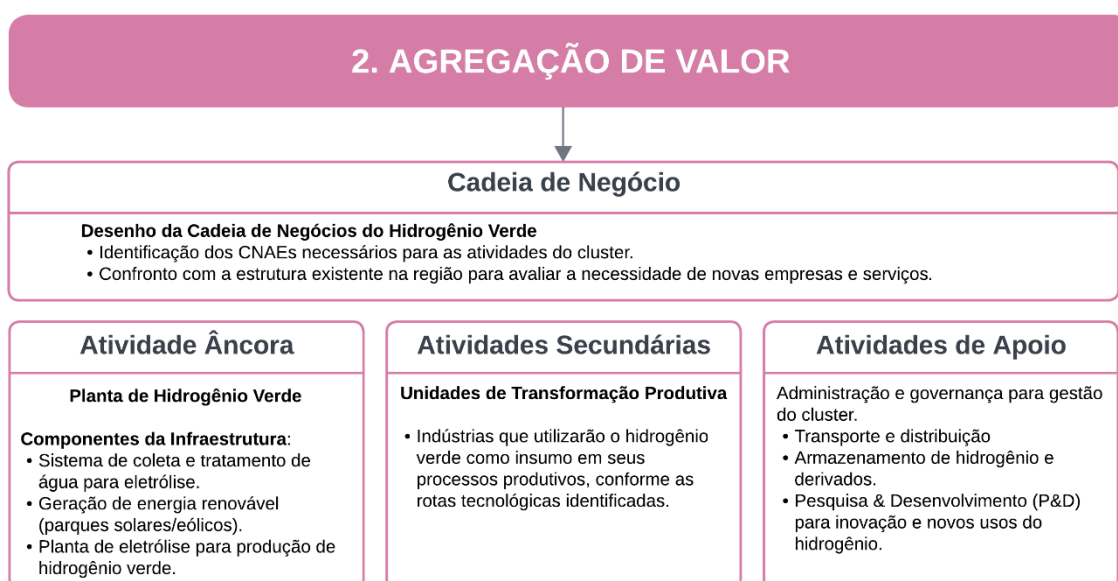
7.4. ETAPA 2: AGREGAÇÃO DE VALOR

A segunda etapa do método, correspondente à agregação de valor, sucede a fase de identificação de oportunidades e tem como objetivo estruturar a cadeia de negócios e a elaboração do cluster de hidrogênio verde no contexto portuário. Nessa etapa, as oportunidades previamente identificadas são organizadas de forma sistêmica, permitindo compreender como os diferentes elos produtivos podem ser articulados no território para viabilizar o funcionamento do cluster. A agregação de valor assume, portanto, papel central na transição do diagnóstico para a proposição, ao traduzir potencialidades territoriais e demandas identificadas em arranjos produtivos concretos.

Essa etapa é dividida em quatro blocos: a estruturação da cadeia de negócios que envolve o desenho das atividades necessárias à implantação do cluster, incluindo a definição da atividade âncora, representada pela planta de hidrogênio verde, a identificação das atividades secundárias, associadas às unidades de transformação produtiva que utilizam o hidrogênio como insumo, e das atividades de apoio, responsáveis pela governança, logística, armazenamento, transporte e inovação.

Essa etapa contempla o mapeamento dos agentes econômicos envolvidos, a identificação dos CNAEs correspondentes às atividades previstas e o confronto entre a estrutura produtiva existente no território e os elos necessários ao funcionamento do cluster. Esse procedimento permite avaliar lacunas produtivas, dependências externas e oportunidades de atração de novas empresas e serviços, assegurando coerência entre a proposta de cluster, a base econômica regional e a infraestrutura disponível.

Figura 7.4.1: Detalhamento da etapa 2



Fonte: Elaboração própria

7.4.1. CADEIA DE NEGÓCIOS DO HIDROGÊNIO VERDE

A estruturação da cadeia segue os quatro segmentos conceituais estabelecidos por Yamashita (2025): montante, que inclui atividades como fornecimento de equipamentos, engenharia e geração de energia; âncora, representada pelo processo de eletrólise e produção do hidrogênio; jusante, composto pelas etapas de transformação, comercialização e uso do produto final; e apoio, que abrange serviços de P&D, certificação, capacitação, regulação, financiamento e logística.

A metodologia de mapeamento parte da identificação das atividades econômicas essenciais à consolidação de cada segmento, utilizando a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE). Conforme descrito por Nonato (2025), o processo se inicia com a definição do segmento produtivo e o desenvolvimento da cadeia. Em seguida, as atividades são vinculadas a códigos CNAE até o nível de subclasse, permitindo a quantificação e localização dessas funções no território por meio de bases como a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) e IBGE.

Esse cruzamento entre estrutura econômica existente e atividades necessárias permite verificar o grau de completude da cadeia, a necessidade de indução de elos ausentes e a atratividade do território para empresas especializadas. A identificação de lacunas pode ser acompanhada por propostas de políticas de atração de investimentos, como programas de incentivos fiscais, editais de fomento, subsídios tecnológicos ou condições preferenciais de instalação em zonas industriais retroportuárias.

Essa etapa considera os efeitos da cadeia sobre o território, por meio da agregação de valor local, ou seja, a capacidade do cluster de internalizar fluxos econômicos, promover diversificação produtiva, gerar emprego qualificado e fomentar inovação. A cadeia,

enquanto instrumento metodológico, deixa de ser apenas uma estrutura operacional e passa a configurar uma estratégia territorial de desenvolvimento sustentável e competitivo.

7.4.2. ATIVIDADE ÂNCORA

Após a identificação dos elos, o próximo passo consiste na formulação do desenho físico-funcional do cluster. Trata-se da organização espacial do empreendimento. O objetivo desta etapa é viabilizar uma representação espacial que permita avaliar sua implantação, modularidade e integração com o território portuário e subsidiar etapas futuras de engenharia, arquitetura e licenciamento, funcionando como base conceitual para planos de investimento público-privado, estudos de impacto e projetos técnicos especializados.

O primeiro eixo representa a atividade âncora, ou seja, a planta de produção de hidrogênio verde, cujo núcleo é o sistema de eletrólise. Sua definição deve considerar todos os componentes da infraestrutura.

A. COMPONENTE DA INFRAESTRUTURA

É importante que o conjunto considere a integração entre três subsistemas essenciais: o primeiro corresponde à infraestrutura de abastecimento hídrico, com sistemas dedicados à captação, tratamento e possível dessalinização, exigindo áreas técnicas para tanques de armazenamento, estações elevatórias, sistemas de filtragem e unidades de descarte de rejeitos; o segundo subsistema refere-se à geração de energia renovável, podendo incluir, conforme viabilidade identificada na etapa 1, usinas solares, parques eólicos *onshore* ou *offshore* ou pontos de conexão com o sistema interligado, o que requer previsão de subestações; o terceiro subsistema compreende a planta de eletrólise propriamente dita, com as unidades eletrolisadoras, sistemas de compressão e ventilação, áreas de controle e segurança e pátios de operação. A modelagem deve contemplar o dimensionamento da área de acordo com a capacidade de produção prevista (em toneladas/ano ou MW instalados), respeitando os critérios de segurança industrial, zoneamento funcional e continuidade operacional.

7.4.3. ATIVIDADES SECUNDÁRIAS

As atividades secundárias correspondem às unidades industriais que utilizarão o hidrogênio como insumo produtivo, sendo definidas conforme as rotas tecnológicas e as oportunidades identificadas.

A. UNIDADES DE TRANSFORMAÇÃO PRODUTIVA

Essa categoria tem como objetivo definir o tipo de uso específico como também prever áreas flexíveis e compatíveis com plantas industriais de média e grande escala, capazes de acomodar empresas dos setores químico, metalúrgico, energético, logístico, agroindustrial ou outros.

A distribuição dessas unidades deve respeitar distâncias operacionais seguras em relação à planta âncora, possibilitar conexões eficientes por meio de dutos ou veículos, e permitir expansão futura conforme a maturação do ecossistema produtivo. Para isso, o método recomenda o uso de parâmetros técnicos de ocupação, com estimativas mínimas de área por tipo de indústria.

7.4.4. ATIVIDADES DE APOIO

Já as atividades de apoio estruturam-se em torno dos sistemas logísticos, das áreas de armazenagem, das estruturas administrativas e dos centros de pesquisa e desenvolvimento. O projeto básico deve prever a localização das vias técnicas de circulação, dos acessos viários e ferroviários, dos terminais de carregamento e das interfaces portuárias. As unidades de armazenamento devem seguir os padrões de segurança exigidos para cada tipo de uso. As áreas destinadas à administração e governança devem prever a instalação de edifícios institucionais, salas de comando e operação, infraestrutura para articulação entre entes públicos e privados, bem como espaços de capacitação e integração setorial. Complementarmente, é recomendável a previsão de áreas para centros de inovação, laboratórios de P&D e incubadoras tecnológicas, de forma a estimular a atração de novos atores e fomentar o ciclo de retroalimentação técnica do cluster.

Essa etapa, portanto, não visa à definição de cada elemento construtivo ou equipamento, mas à construção de um modelo espacial e produtivo coerente com os objetivos do projeto, compatível com as restrições do território e orientado ao escalonamento progressivo das atividades. O produto final é uma base conceitual técnica e espacial sobre a qual poderão ser desenvolvidos os projetos executivos, os estudos de impacto, os processos de licenciamento e as estratégias de promoção institucional e captação de investimentos.

7.5. ETAPA 3: ANÁLISE DOS IMPACTOS URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS

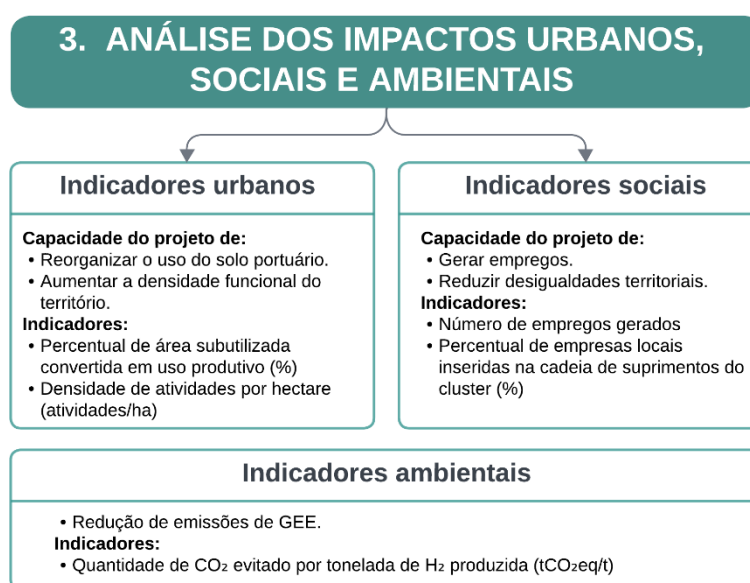
A quinta e última etapa do método visa à avaliação dos efeitos gerados pela implantação do cluster portuário de hidrogênio verde, considerando as dimensões urbana, social e ambiental. Trata-se de uma etapa de síntese em que os elementos espaciais e produtivos projetados na etapa anterior são confrontados com seus potenciais impactos. O objetivo é assegurar que a configuração do cluster não apenas seja viável tecnicamente, mas que produza efeitos positivos sobre o território, a população e o meio ambiente, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e da justiça socioespacial.

De acordo com Ferreira (2021), a análise de impactos em projetos urbanos orientados por aglomerações produtivas deve ser feita com base em indicadores espacialmente referenciados, capazes de medir a qualidade do ambiente construído, a viabilidade econômica e a capacidade do projeto de induzir desenvolvimento local. Nonato (2025),

por sua vez, destaca a importância de integrar essa análise a mecanismos de monitoramento contínuo, com vistas a garantir a adaptação do projeto às transformações sociais e territoriais ao longo do tempo.

O produto desta etapa é a definição de um conjunto de indicadores simples e aplicáveis, que permitam monitorar os efeitos da implantação do cluster e retroalimentar os ajustes no projeto e na gestão territorial. Essa abordagem garante que o cluster seja não apenas tecnicamente funcional, mas socialmente justo e ambientalmente responsável, cumprindo seu papel como vetor estruturante de um novo modelo energético e produtivo.

Figura 7.5.1: Detalhamento da etapa 3



Fonte: Elaboração própria

Esta fase não trata de estudos de impacto ambiental formais, exigidos em processos de licenciamento, mas de uma leitura estratégica e antecipada dos efeitos estruturais do projeto, orientada pela lógica da transformação territorial. A proposta é que o cluster não seja avaliado apenas por seu desempenho técnico ou econômico, mas também por sua capacidade de induzir requalificação espacial, inclusão social e transição ecológica, contribuindo para um modelo de desenvolvimento sustentável. Para tanto, a análise está dividida em três dimensões: urbana, social e ambiental, cada uma delas associada a indicadores objetivos e replicáveis, capazes de mensurar os efeitos esperados de forma comparável e padronizada.

7.5.1. INDICADORES URBANOS

A dimensão urbana da análise de impactos busca avaliar a capacidade do cluster de catalisar transformações estruturais no território portuário e retroportuário por meio de requalificação do uso do solo, diversificação de atividades e melhoria da conectividade funcional. Como enfatiza Ferreira (2021), a implantação de arranjos produtivos, como clusters industriais, deve ser acompanhada de indicadores que expressem sua eficácia em

reorganizar espacialmente áreas fragmentadas, subutilizadas ou funcionalmente desarticuladas. A análise urbana, portanto, é essencial para verificar em que medida o cluster contribui para a formação de centralidades produtivas, o adensamento das atividades e a ativação de zonas logísticas e intermodais.

O primeiro aspecto observado é a conversão de áreas subutilizadas em usos produtivos, cujo indicador central é o percentual de área reconvertida em relação à totalidade da área de intervenção. A identificação de áreas ociosas pode ser feita com base em imagens de satélite, cadastros territoriais, plantas portuárias e mapas de uso e ocupação. Como parâmetro de desempenho, Ferreira (2021) considera desejável que ao menos 50% da área ocupada por novas atividades tenha origem em terrenos anteriormente subutilizados ou de baixa densidade operacional.

O segundo aspecto é a densidade funcional, isto é, o número de atividades distintas (produção, armazenagem, serviços técnicos, logística, pesquisa, etc.) por hectare. Trata-se de uma adaptação da noção de densidade tradicional — mais aplicada à moradia — para o contexto industrial e portuário. Segundo Ferreira (2021), clusters urbanos sustentáveis devem apresentar densidade mínima de 6 a 10 atividades/ha, considerando o estímulo à diversificação e à inovação produtiva. Essa métrica pode ser verificada por meio de análises cartográficas e classificação das funções territoriais nos planos diretores portuários e zoneamentos locais.

7.5.2. INDICADORES SOCIAIS

A dimensão social da análise de impactos concentra-se na capacidade do cluster de induzir transformações positivas nas condições de vida da população local e regional, por meio da geração de oportunidades de trabalho, qualificação profissional e inserção de empresas do entorno na cadeia de negócio. Conforme discutido por Nonato (2025), projetos de base territorial como clusters industriais não devem ser avaliados apenas por seu desempenho técnico ou econômico, mas também pelo modo como transformam as relações sociais e produtivas do território onde se inserem.

A construção da cadeia de negócio associada ao cluster permite identificar não apenas os fluxos de insumos e produtos, mas também os vínculos entre agentes locais e externos, favorecendo o adensamento produtivo e a retenção de valor no território (Springer-Heinze, 2018). Essa abordagem é reforçada por Porter e Kramer (2011), que apontam que o valor social gerado por uma organização está diretamente relacionado ao modo como ela se articula com sua comunidade, empregando e qualificando pessoas, contratando fornecedores locais e promovendo desenvolvimento endógeno. Portanto, nesta etapa, busca-se mensurar se o projeto é capaz de gerar benefícios estruturais para a população e a economia local. Para isso, são propostos três indicadores.

O primeiro indicador é o número de empregos diretos e indiretos gerados. Este indicador capta a capacidade do cluster de ativar o mercado de trabalho, tanto nas suas operações centrais quanto nas atividades indiretamente estimuladas (transporte, manutenção,

alimentação, serviços técnicos etc.). O dado pode ser estimado com base nos CNAEs identificados e confrontado com coeficientes médios de emprego por setor disponíveis em bases como a RAIS, o CAGED e estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). O parâmetro de referência considera como positivo clusters que gerem mais de 1.000 postos de trabalho diretos em sua fase de maturidade (Nonato, 2025).

O segundo indicador é o percentual de empresas locais inseridas na cadeia de suprimentos do cluster. Aqui se observa o grau de integração da economia regional ao novo arranjo produtivo. O indicador é calculado a partir da razão entre o número de empresas locais contratadas e o total de empresas que compõem a cadeia de valor do cluster. A meta recomendada, inspirada em experiências como o *Mission Bay* (EUA) e o Cluster de Lyon (França), é que ao menos 30% dos fornecedores sejam locais, estimulando redes de cooperação e especialização regional.

Por fim, o terceiro indicador representa o número de programas ou vagas de formação técnica especializada oferecidas. Esse indicador é adicional e opcional, mas relevante em contextos com lacunas de qualificação. Pode-se considerar tanto iniciativas próprias do cluster quanto parcerias com instituições de ensino. A formação de capital humano é um fator essencial para garantir que os empregos gerados sejam acessíveis à população local e que a inovação seja contínua.

O cruzamento desses indicadores permite não apenas avaliar os impactos do empreendimento sobre a estrutura social, mas também orientar políticas públicas de capacitação, fomento a micro e pequenas empresas e estratégias de inclusão produtiva.

7.5.3. INDICADORES AMBIENTAIS

A transição para uma economia de baixo carbono impõe a necessidade de mecanismos objetivos de avaliação ambiental, especialmente em projetos de infraestrutura produtiva de larga escala. A produção de hidrogênio verde, por sua natureza eletrointensiva e pela promessa de substituir combustíveis fósseis em processos industriais, logísticos e energéticos, ocupa lugar importante na agenda de descarbonização global. Segundo a Agência Internacional de Energia, o uso do hidrogênio verde tem potencial para evitar até 830 milhões de toneladas de CO₂ por ano, desde que seja produzido integralmente com eletricidade renovável (IEA, 2022). Nesse contexto, a implantação de clusters industriais portuários baseados em hidrogênio verde deve ser acompanhada de indicadores ambientais que permitam mensurar sua contribuição efetiva para a mitigação climática e orientar sua inserção em instrumentos de regulação ambiental, mercados de carbono e certificações sustentáveis.

Em consonância com as metas do Acordo de Paris e com as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) do Brasil, que preveem a redução de 53% das emissões de gases de efeito estufa até 2030 em relação a 2005 (MCTI, 2023), os setores logístico-portuário e industrial estão entre os segmentos estratégicos para ações de mitigação. Considera-se nesse estudo que o hidrogênio pode ser utilizado em células a combustível para alimentar

equipamentos de operação portuária, contribuindo para a transição energética dos portos rumo à neutralidade climática (IRENA, 2022). A utilização do hidrogênio verde como reserva energética para equipamentos elétricos em ambientes portuários é também uma solução emergente, especialmente em locais com instabilidade de fornecimento ou demanda crítica por energia contínua (McKinsey, 2023). Por fim, o uso do hidrogênio em indústrias localizadas na retroárea — como siderúrgicas, petroquímicas ou fabricantes de fertilizantes — amplia sua contribuição climática ao substituir insumos derivados de carbono por vetores de baixa emissão (UNIDO, 2023).

Para mensurar a contribuição ambiental desses usos, adota-se como principal indicador a quantidade de CO₂ evitado por tonelada de hidrogênio produzido (tCO₂eq/tH₂), cujo cálculo baseia-se em fatores de emissão por atividade substituída. A aferição quantitativa deverá ser realizada por meio de uma ferramenta computacional desenvolvida no âmbito do projeto de pesquisa financiado pelo CNPq, que simula diferentes cenários de geração e aplicação do hidrogênio. Esses indicadores fornecem respaldo técnico à valoração ambiental do empreendimento e orientam o licenciamento, a elegibilidade a créditos de carbono e o alinhamento com políticas climáticas nacionais (MME, 2022).

Um aspecto relevante é a possibilidade de certificação ambiental e geração de créditos de carbono, convertendo as emissões evitadas em ativos negociáveis em mercados voluntários ou regulados. Além do CO₂ evitado, outro indicador complementar é o percentual de energia renovável utilizada na eletrólise, sendo recomendável que o cluster opere com pelo menos 95% de fontes renováveis para garantir aderência às taxonomias verdes da União Europeia e às diretrizes do I-REC Standard (I-REC, 2022; European Commission, 2021).

Esses indicadores não apenas fortalecem a elegibilidade do empreendimento frente a linhas de financiamento verde, certificações sustentáveis e processos de licenciamento ambiental, como também permitem verificar, de forma objetiva, se o cluster está alinhado às políticas nacionais e internacionais de descarbonização e transição energética.

CAPÍTULO 8. ESTUDO DE CASO

Para a aplicação do método proposto nesta dissertação, adota-se como estudo de caso o Porto de Itaqui, localizado no município de São Luís, capital do estado do Maranhão. A escolha desse porto decorre de um conjunto de atributos estruturais, territoriais, logísticos e institucionais que o posicionam como um dos principais ativos estratégicos do sistema portuário brasileiro e como um território particularmente aderente à análise da concepção de clusters produtivos associados à transição energética.

O Porto de Itaqui integra o Complexo Portuário da Baía de São Marcos, ao lado do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (Vale S.A.) e do Terminal de Uso Privado da Alumar, configurando um dos maiores polos portuários da América Latina em movimentação de granéis sólidos e líquidos. Sua localização geográfica confere diversas vantagens logísticas, tanto em termos de acesso marítimo — com calados naturais profundos e condições operacionais favoráveis à navegação de longo curso — quanto em relação à sua *hinterlândia*, articulada aos corredores logísticos do Centro-Norte brasileiro e, em especial, à região do MATOPIBA, uma das principais fronteiras de expansão agroindustrial do país (EMAP, 2021).

Figura 8.1: Localização do Porto de Itaqui



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

Do ponto de vista institucional e de planejamento, o Porto de Itaqui apresenta um arcabouço consolidado, expresso no seu Plano Mestre do Complexo Portuário, elaborado em 2018 pelo Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA) e com horizonte de planejamento até 2060; e no Plano de Desenvolvimento e Zoneamento (PDZ), elaborado em 2021 pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) que orienta o uso e a ocupação das áreas portuárias e retroportuárias de forma integrada às diretrizes ambientais, operacionais e de expansão futura (BRASIL, 2018; EMAP, 2021).

Esses instrumentos fornecem a base fundamental para a análise da viabilidade espacial, funcional e regulatória de novas atividades produtivas de maior complexidade tecnológica, como aquelas associadas à cadeia do hidrogênio verde e de seus derivados.

No que se refere à movimentação de cargas, o Porto do Itaqui apresenta desempenho que confirma sua trajetória de crescimento e relevância no sistema portuário nacional. Em 2018, a movimentação registrada foi de aproximadamente 22,4 milhões de toneladas, volume cerca de 17% superior ao observado em 2017 (ANTAQ, 2018). Esse crescimento manteve-se ao longo dos anos seguintes e, em 2024, o porto alcançou cerca de 34 milhões de toneladas movimentadas, configurando a segunda maior marca histórica do Itaqui e consolidando sua posição como principal porto público do Norte e Nordeste do Brasil (ANTAQ, 2024). As projeções de longo prazo reforçam essa tendência: o Plano Mestre estima que o porto atinja aproximadamente 68,6 milhões de toneladas em 2060, com taxa média anual de crescimento de 2,5% (BRASIL, 2018), desempenho acima da média dos portos públicos brasileiros segundo o Plano Nacional de Logística Portuária – PNL (BRASIL, 2017). Esses dados evidenciam seu papel estratégico no escoamento de cargas e como plataforma logística com capacidade de absorver novas cadeias produtivas.

No plano físico-territorial, destaca-se a disponibilidade de áreas greenfield – terrenos livres – e de áreas não operacionais passíveis de requalificação ou reconversão funcional, bem como a presença de uma retroárea industrial já estruturada, em especial o Distrito Industrial de São Luís (DISAL). Esse conjunto de espaços amplia as possibilidades de articulação entre atividades portuárias, industriais e logísticas, elemento fundamental para clusters produtivos e logísticos.

Além disso, o perfil operacional do Porto de Itaqui, historicamente associado à movimentação de granéis sólidos vegetais, granéis líquidos e derivados de petróleo, fertilizantes e carga geral, revela uma estrutura produtiva já fortemente vinculada a cadeias intensivas em energia e insumos químicos. Tal característica reforça sua aderência como território potencial para a introdução de vetores energéticos de baixo carbono, seja para consumo local (mercados industriais e portuários), seja para exportação, alinhando-se às tendências internacionais de reconfiguração dos portos como nós estratégicos da transição energética e da economia de baixo carbono (IEA, 2022).

Nesse contexto, o estudo de caso permitirá não apenas testar a aplicabilidade do método proposto, mas também explorar as interações entre infraestrutura portuária, ordenamento territorial, governança institucional e estratégias de desenvolvimento produtivo sustentável. A aplicação será estruturada conforme as etapas metodológicas definidas anteriormente. Ao longo desse processo, o Porto do Itaqui será tratado não apenas como um suporte físico-operacional, mas como um território produtivo complexo, inserido em dinâmicas locais, regionais, nacionais e globais e cuja transformação demanda abordagens integradas capazes de articular desenvolvimento econômico, ordenamento urbano e sustentabilidade ambiental.

8.1. IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES

8.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PORTO

A primeira fase da Etapa de Identificação de Oportunidades consiste na caracterização do território do Porto do Itaqui e de sua retroárea, com o objetivo de identificar os condicionantes e as potencialidades relevantes para a implantação de um cluster portuário de hidrogênio verde. Nesta fase, a análise concentra-se na leitura objetiva dos elementos territoriais que influenciam a viabilidade do empreendimento, servindo de base para as decisões das etapas subsequentes do método. A caracterização do porto é estruturada em dois blocos complementares: composição natural e composição não natural.

8.1.1.1. COMPOSIÇÃO NATURAL

A caracterização da composição natural do Porto do Itaqui e de sua retroárea tem como objetivo identificar os condicionantes físico-ambientais que influenciam a viabilidade da implantação de um cluster portuário de hidrogênio verde. Nesta fase do estudo de caso, a análise concentra-se exclusivamente nos atributos naturais presentes no território, avaliando sua compatibilidade com as exigências técnicas da produção de hidrogênio por eletrólise e com os requisitos regulatórios e ambientais.

A. DISPONIBILIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA

A disponibilidade e a qualidade da água constituem condicionantes fundamentais para a viabilidade técnica de um cluster portuário de hidrogênio verde, uma vez que o processo de eletrólise exige suprimento contínuo de água com elevado grau de pureza. No caso do Porto do Itaqui, a análise do abastecimento hídrico deve considerar, de forma integrada, as fontes continentais existentes, os recursos subterrâneos e a alternativa do uso de água do mar, avaliando-se tanto a disponibilidade física quanto as condicionantes legais, operacionais e ambientais associadas.

No âmbito das fontes de abastecimento hídrico, o território de São Luís insere-se em uma região de elevada disponibilidade hídrica, associada ao regime climático equatorial úmido e à expressiva recarga dos aquíferos locais. Dados recentes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico indicam que a área apresenta recarga potencial direta estimada em 755,91 m³/s, o que corresponde a aproximadamente 65 milhões de m³ por dia, configurando um dos maiores potenciais hídricos do território nacional (ANA, 2025). Conforme ilustrado na

Figura 8.1.1.1.1, o Porto do Itaqui encontra-se em uma área com disponibilidade significativa de água subterrânea, ainda que a exploração desse recurso esteja condicionada à outorga e à compatibilização com usos prioritários, como o abastecimento urbano e industrial já consolidado. Essa condição reforça a viabilidade física do uso de recursos hídricos continentais para fins industriais, desde que observadas as restrições legais e os usos prioritários.

de abastecimento hídrico para a eletrólise, reduzindo a atratividade dessa alternativa quando comparada a soluções costeiras.

Diante dessas condicionantes, a dessalinização da água do mar configura-se como alternativa técnica possivelmente aderente ao Porto do Itaqui. A localização direta na Baía de São Marcos permite captação em proximidade imediata às áreas industriais, reduzindo custos de transporte e assegurando maior previsibilidade no suprimento. A dessalinização, quando associada a sistemas de energia renovável, representa solução possível em empreendimentos de grande escala (UNIDO, 2023). Esse processo, porém, gera como subproduto a salmoura, cujo descarte inadequado pode impactar ecossistemas costeiros sensíveis, como manguezais e estuários. Assim, a adoção dessa alternativa exige soluções técnicas de dispersão controlada, monitoramento ambiental contínuo e rigoroso licenciamento ambiental, conforme preconizado por organismos internacionais e pelas diretrizes ambientais nacionais (IRENA, 2021).

No que se refere à qualidade da água, é importante destacar que a eletrólise requer água com grau de pureza próximo ao padrão de água desmineralizada. Nesse aspecto, a água subterrânea da Ilha de São Luís apresenta vantagens comparativas relevantes. O estudo conduzido por Belfort e Mendes (2025) analisou amostras de águas subterrâneas coletadas em diferentes pontos do território da Ilha de São Luís. Entre os locais investigados, destaca-se a presença de amostras provenientes de áreas situadas nas proximidades da área de influência do Porto do Itaqui. Essa proximidade espacial permite que os dados obtidos sejam utilizados como referência para a análise das condições hidrogeoquímicas associadas ao território do porto e de sua retroárea imediata.

De acordo com os autores, os resultados das análises físico-químicas desse ponto indicam que, apesar da detecção pontual de coliformes, os principais parâmetros geoquímicos avaliados, como cloretos, sólidos totais dissolvidos, dureza e ferro, mantêm-se dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008 e pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (BELFORT; MENDES, 2025). Esses resultados sugerem que, na área mais próxima ao complexo portuário, a água subterrânea apresenta qualidade natural compatível com usos industriais, desde que submetida a tratamento direcionado, sobretudo voltado à desinfecção microbiológica e à desmineralização complementar exigida pelo processo de eletrólise. Tal evidência reforça a viabilidade técnica do uso da água subterrânea no entorno do Porto do Itaqui, especialmente quando comparada às fontes superficiais urbanas e à dessalinização, que demandam sistemas de tratamento mais complexos e onerosos.

Independentemente da fonte utilizada — subterrânea, superficial ou marinha — será necessária a implantação de sistemas de pré-tratamento e purificação, que podem incluir etapas de filtração, osmose reversa, troca iônica e polimento final. Em áreas portuárias, onde há potencial presença de contaminantes associados a atividades industriais e logísticas, esses sistemas assumem papel ainda mais relevante, tanto para garantir a eficiência do processo eletrolítico quanto para preservar a vida útil dos equipamentos.

Do ponto de vista econômico, os custos associados ao tratamento da água constituem parcela relevante dos custos operacionais da produção de hidrogênio verde. A literatura destaca que a água subterrânea, por apresentar naturalmente baixa turbidez, reduzida carga orgânica e maior proteção contra contaminações difusas, tende a demandar sistemas de tratamento menos complexos quando comparada às águas superficiais e à água do mar (HIRATA et al., 2019; BELFORT; MENDES, 2025).

Estudos internacionais indicam que, quando a água doce de boa qualidade está disponível, os custos de tratamento tendem a ser relativamente reduzidos, representando fração marginal do custo total do hidrogênio. Para usos industriais, os custos de tratamento de água doce — incluindo filtração, clarificação, desinfecção e, quando necessário, desmineralização — situam-se, em geral, na faixa de US\$ 0,05 a US\$ 0,30 por metro cúbico, dependendo da qualidade da água bruta, do nível de purificação exigido e da escala do sistema (SHANNON et al., 2008; IRENA, 2021; IEA, 2022).

Em contrapartida, a dessalinização da água do mar, embora tecnicamente viável, é reconhecida como um processo mais oneroso, sobretudo em função do elevado consumo energético da osmose reversa e da necessidade de sistemas adicionais para a gestão ambiental da salmoura. Estimativas na literatura internacional indicam que o custo da água dessalinizada para uso industrial varia, em média, entre US\$ 0,5 e US\$ 2,0 por metro cúbico, conforme a escala da planta, a eficiência tecnológica, o custo da energia elétrica e as exigências ambientais locais (IEA, 2022; ELIMELECH; PHILLIP, 2011; SHANNON et al., 2008). Esse diferencial de custo reforça a necessidade de avaliar o arranjo tecnológico de modo a minimizar impactos sobre a competitividade econômica.

A análise evidencia que, a viabilidade técnica da produção de hidrogênio verde está diretamente associada à disponibilidade, à qualidade natural da água e aos custos de tratamento requeridos para atender às exigências da eletrólise. As diferentes fontes avaliadas apresentam condicionantes distintos, que impactam de maneira diferenciada a complexidade operacional, os custos e a sustentabilidade do empreendimento. Nesse sentido, a tabela apresentada a seguir permite sintetizar os principais aspectos técnicos e econômicos de cada alternativa, subsidiando a tomada de decisão.

Tabela 8.1.1.1.1: Síntese das alternativas de abastecimento hídrico para produção de hidrogênio verde

Fonte	Disponibilidade física	Principais condicionantes	Necessidade tratamento	Custo estimado (US\$/m³)	Adequação à eletrólise
Água subterrânea	Elevada (escala regional)	Outorga, intrusão salina, conflitos de uso	Alta	0,05 a 0,3	Condicionada
Água superficial	Moderada	Variabilidade sazonal, adução	Alta	0,1 a 0,4	Baixa a moderada
Água do mar (dessalinização)	Muito Elevada	Gestão da salmoura, licenciamento ambiental	Muito alta (osmose reversa)	0,5 a 2,0	Alta

Fonte: ANA (2025); IRENA (2021); UNIDO (2023). Elaboração própria.

A. FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL

A disponibilidade de energia elétrica renovável é outro fator determinante para a viabilidade de um cluster portuário de hidrogênio verde, uma vez que o hidrogênio só é reconhecido como "verde" quando produzido por eletrólise alimentada exclusivamente por energia de origem renovável. Nesse sentido, a análise energética no Porto do Itaqui concentra-se no potencial regional de geração solar e eólica, na infraestrutura existente de conexão ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e nas diretrizes estabelecidas pelos instrumentos de planejamento e descarbonização do complexo portuário.

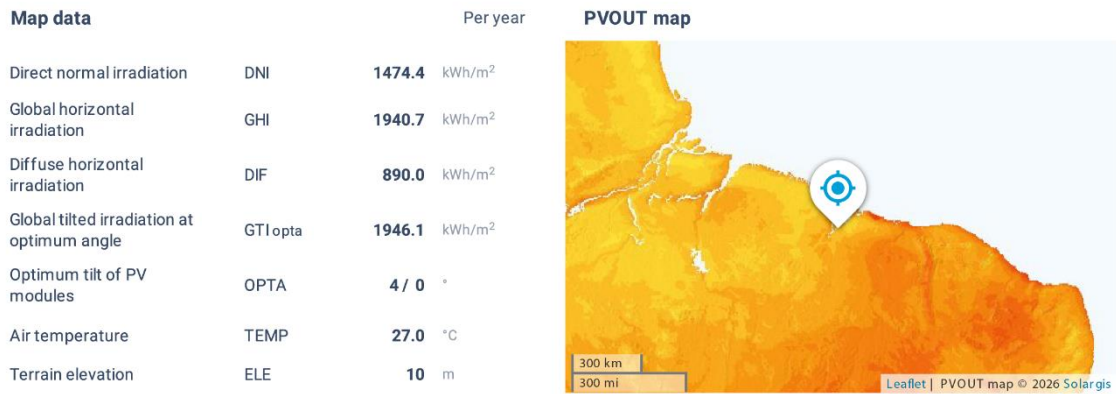
Embora a matriz elétrica brasileira seja majoritariamente composta por hidreletricidade, essa fonte ainda não é certificada em mercados internacionais como insumo renovável, em função de controvérsias associadas aos impactos ambientais e às metodologias de contabilização de emissões. Assim, para fins de alinhamento aos critérios internacionais de certificação e exportação, o presente estudo prioriza fontes renováveis amplamente reconhecidas, a energia solar e a energia eólica.

O Plano de Desenvolvimento e Zoneamento (PDZ) e o Plano Mestre do Porto do Itaqui reconhecem a energia renovável como elemento estratégico para a transição energética do porto, destacando a necessidade de ampliar o uso de fontes limpas tanto para atendimento às operações portuárias quanto para o suporte a novas cadeias produtivas de baixo carbono (EMAP, 2021). Essa diretriz é aprofundada no Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui, no qual um capítulo específico é dedicado à incorporação de energias renováveis como eixo estruturante para a redução das emissões diretas e indiretas associadas às atividades portuárias (EMAP, 2024).

No que se refere ao potencial de geração solar fotovoltaica, o Porto do Itaqui apresenta condições favoráveis, tanto do ponto de vista físico-ambiental quanto do planejamento institucional. A localização do complexo portuário na Ilha de São Luís o insere em uma faixa de elevada disponibilidade de irradiação solar, associada à baixa variabilidade sazonal e à reduzida incidência de eventos extremos, o que confere maior previsibilidade à geração ao longo do ano.

Dados do Global Solar Atlas, indicam que a região de São Luís apresenta valores médios anuais de irradiação global horizontal (GHI) entre 1.474 e 1.940 kWh/m²/ano, com produção específica estimada em 1.553 GWh/ano (WORLD BANK; SOLARGIS, 2025). Esses valores são compatíveis ao uso industrial eletrointensivo. Essas condições naturais são reconhecidas no Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui, que identifica a energia solar fotovoltaica como uma das principais alternativas para a autoprodução de eletricidade renovável no território portuário.

Figura 8.1.1.1.2: Mapa de irradiação solar média anual (GHI) da Ilha de São Luís



Fonte: Global Solar Atlas, 2024.

No contexto da produção de hidrogênio verde, a análise das alternativas de geração solar deve considerar não apenas o potencial energético, mas sobretudo os condicionantes espaciais, econômicos, operacionais e regulatórios associados às modalidades *onshore* e *offshore*. Embora ambas se enquadrem como fontes renováveis aptas a alimentar o processo de eletrólise, suas implicações territoriais e econômicas são distintas.

A geração solar *onshore* refere-se à implantação de sistemas fotovoltaicos em terra firme, podendo ocorrer tanto em usinas centralizadas quanto em arranjos de geração distribuída. No caso do Porto do Itaqui, o Plano de Descarbonização identifica explicitamente essa modalidade como prioritária, ao mapear áreas internas à poligonal portuária e superfícies já ocupadas, como coberturas de armazéns, edifícios administrativos, estacionamentos e áreas operacionais de baixa interferência logística, com elevado potencial de aproveitamento solar (EMAP, 2025).

Figura 8.1.1.1.3: Áreas potenciais para implantação de sistemas fotovoltaicos na poligonal do Porto



Fonte: Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui, 2025.

De acordo com o levantamento, a área total com potencial para a instalação de painéis fotovoltaicos é de 14.810 m². Considerando os fatores de adequação aplicados, a área efetivamente utilizável para a instalação dos painéis é estimada em 12.597 m² (EMAP, 2025). Essa característica confere uma vantagem à alternativa onshore, pois permite a incorporação da geração renovável sem ampliação significativa da ocupação do solo e sem conflito com áreas ambientalmente sensíveis.

Com base nesse levantamento, o Plano de Descarbonização projeta a implantação de uma usina fotovoltaica com capacidade instalada aproximada de 14,3 MWp, com geração anual estimada entre 6,4 e 7,7 GWh, a depender do arranjo tecnológico adotado e das perdas do sistema. De acordo com a EMAP, esse volume de energia é suficiente para suprir parcela relevante da demanda elétrica atual do porto e, sobretudo, para viabilizar a alimentação de uma planta de eletrólise em escala inicial, reduzindo a dependência da eletricidade da rede e fortalecendo a rastreabilidade renovável do hidrogênio produzido (EMAP, 2025).

Tabela 8.1.1.1.2: Síntese dos parâmetros de geração solar fotovoltaica na Ilha de São Luís

Parâmetro	Valor Estimado	Fonte
Irradiação global horizontal (GHI)	1.474–1.940 kWh/m ² /ano	World Bank; Solargis (2024)
Produção específica	1.500–1.553 kWh/ano	World Bank; Solargis (2024)
Capacidade projetada	14,3 MWp	EMAP (2025)
Geração anual estimada	6,4–7,7 GWh/ano	EMAP (2025)

Fonte: elaboração própria.

Do ponto de vista econômico, a energia solar *onshore* apresenta maior grau de maturidade tecnológica, ampla cadeia produtiva nacional e custos de implantação reduzidos. Estudos da IRENA e da EPE indicam que os investimentos médios para sistemas fotovoltaicos *onshore* de grande porte no Brasil situam-se entre US\$ 700 mil e US\$ 1,0 milhão por MW instalado, com custos nivelados de energia (LCOE) entre os mais competitivos do setor elétrico (IRENA, 2022; EPE, 2023). Esses fatores tornam a geração *onshore* mais atrativa para aplicações eletrointensivas nas quais o custo da energia elétrica exerce influência direta sobre a competitividade do produto produzido.

Por outro lado, a geração solar offshore, ainda que tecnicamente possível, permanece em estágio incipiente no cenário nacional. Essa modalidade consiste na instalação de painéis fotovoltaicos sobre estruturas flutuantes em ambientes marítimos ou costeiros, exigindo soluções construtivas específicas para resistência à corrosão, à salinidade, às ondas e às correntes marítimas. Do ponto de vista espacial, embora reduza a ocupação de áreas terrestres, a geração *offshore* apresenta maior complexidade de implantação em ambientes portuários, como a Baía de São Marcos, caracterizados por intensa navegação, áreas de fundeio e canais de acesso.

Sob a ótica econômica, os custos de investimento da energia solar *offshore* são superiores aos da modalidade *onshore*. A literatura aponta valores médios entre US\$ 1,5 e US\$ 3,0 milhões por MW instalado, em função da necessidade de estruturas flutuantes

especializadas, sistemas de ancoragem, cabos submarinos e manutenção em ambiente marítimo (IRENA, 2022; IEA, 2023). Ademais, os custos operacionais e os riscos associados à durabilidade dos equipamentos em meio salino tornam essa alternativa pouco competitiva no curto e médio prazo.

Do ponto de vista regulatório e ambiental, a geração solar *offshore* também impõe desafios relacionados ao licenciamento ambiental em áreas costeiras, à interferência em rotas de navegação e à necessidade de compatibilização com usos portuários. O Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui não contempla a geração solar *offshore* como alternativa no horizonte de planejamento atual, concentrando-se na expansão da geração solar *onshore* e de outras fontes renováveis em terra, consideradas mais aderentes às condições locais e às metas de curto e médio prazo do porto (EMAP, 2025).

Dessa forma, a partir dos dados analisados, no contexto do Porto do Itaqui, a energia solar *onshore* apresenta superioridade técnica, econômica e territorial para o suporte à produção de hidrogênio verde, atualmente. A energia solar *offshore*, embora conceitualmente alinhada à transição energética, permanece como alternativa experimental e economicamente inviável para a realidade portuária analisada. A Tabela 8.1.1.1.3 apresenta uma síntese dos dados analisados.

Tabela 8.1.1.1.3: Comparação entre geração solar *onshore* e *offshore* no contexto do Porto do Itaqui

Critério	Solar <i>onshore</i>	Solar <i>offshore</i>	Fonte
Implantação espacial	Áreas já ocupadas (coberturas, estacionamentos, solo portuário)	Ambiente marítimo com interferência logística	EMAP (2025); IRENA (2022)
Investimento médio	US\$ 0,7–1,0 milhão/MW	US\$ 1,5–3,0 milhões/MW	IRENA (2022); IEA (2023)
Complexidade operacional	Baixa a moderada	Elevada	IEA (2023)
Riscos ambientais	Reduzidos	Elevados (ecossistemas costeiros, navegação)	EMAP (2025)
Prioridade nos planos do porto	Sim	Não	EMAP (2025)

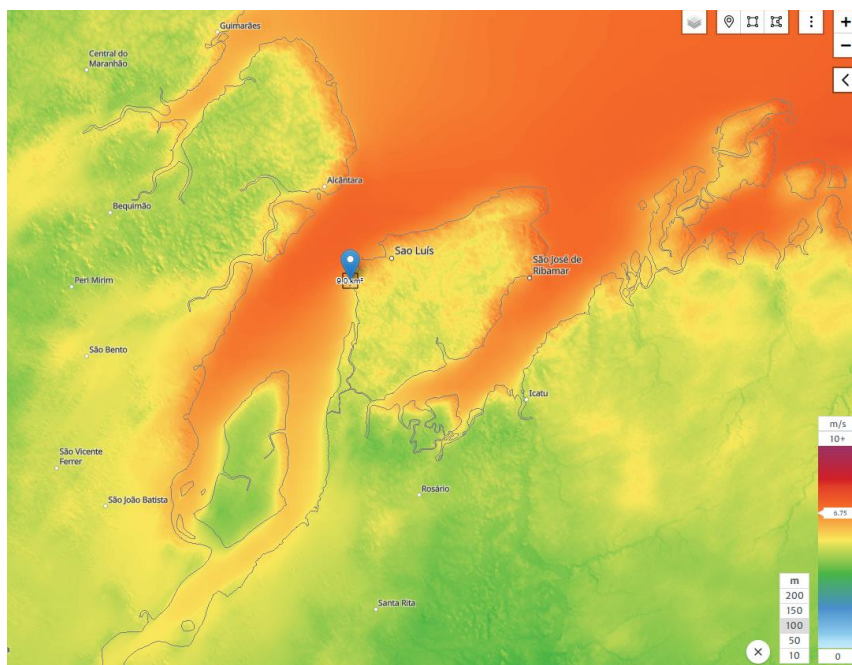
Fonte: elaboração própria.

No que se refere ao potencial de geração eólica, o Porto do Itaqui insere-se em um contexto regional favorável à exploração desse recurso, em especial no litoral e na porção norte do estado do Maranhão. A região integra o corredor eólico do Nordeste brasileiro, caracterizado por regimes de vento consistentes, baixa turbulência e elevada previsibilidade sazonal, fatores determinantes para a viabilidade técnica e econômica de empreendimentos eólicos em escala industrial.

De acordo com dados da EPE e do *Global Wind Atlas*, o litoral maranhense apresenta velocidades médias anuais de vento superiores a 7 m/s a 100 m de altura, com fatores de capacidade frequentemente acima de 40%, patamar considerado elevado no cenário

internacional (EPE, 2023). Essas condições são favoráveis à geração eólica *onshore*, sobretudo em áreas costeiras e na retroárea portuária, onde a topografia plana e a proximidade com a infraestrutura elétrica existente reduzem restrições à implantação.

Figura 8.1.1.1.4: Mapa de velocidade média dos ventos na região de São Luís



Fonte: Global Wind Atlas, 2025.

Essas características conferiram ao estado do Maranhão uma posição de destaque, consolidando-se como um dos territórios mais favoráveis à produção de energia eólica no Brasil. De acordo com o Boletim Anual 2024 da ABEEólica, o Maranhão registrou o maior fator de capacidade médio do país em 2024, atingindo 47,0%, superando estados tradicionalmente consolidados na geração eólica, como Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará (ABEEÓLICA, 2025). Esse indicador reflete a constância e intensidade dos ventos ao longo do ano, resultando em maior eficiência operacional dos parques e melhor aproveitamento da potência instalada.

No contexto do Porto do Itaqui, a energia eólica *onshore* apresenta-se como alternativa mais viável tecnicamente e economicamente competitiva para o suprimento energético da produção de hidrogênio verde. A implantação de parques eólicos em terra firme, especialmente na *hinterlândia* portuária e em municípios próximos, permite a integração direta com o SIM e com as subestações já existentes que atendem ao complexo portuário, conforme indicado no PDZ e no Plano Mestre (EMAP, 2021). Essa condição favorece arranjos de autoprodução ou contratos de fornecimento dedicados (PPAs), reduzindo perdas elétricas e aumentando a previsibilidade do suprimento.

Do ponto de vista econômico, a energia eólica *onshore* também apresenta maior grau de maturidade tecnológica no Brasil, ampla cadeia produtiva instalada e custos de investimento reduzidos. Dados indicam que os investimentos médios para projetos eólicos *onshore* situam-se entre US\$ 1,2 e US\$ 1,6 milhão por MW instalado, com custos

nivelados de energia entre os mais competitivos do setor elétrico nacional (IRENA, 2022; EPE, 2023).

A análise do potencial eólico na região também permite considerar a energia eólica *offshore* como alternativa. Essa modalidade apresenta vantagens como maiores velocidades médias de vento, menor turbulência e fatores de capacidade superiores aos observados em parques *onshore*, além de reduzir conflitos pelo uso do solo terrestre (IEA, 2023). Entretanto, apesar do potencial existente, a energia eólica *offshore* apresenta algumas limitações. Do ponto de vista econômico, os custos de implantação permanecem elevados, com investimentos médios estimados entre US\$ 3,0 e US\$ 5,0 milhões por MW instalado, em função da complexidade das fundações, da logística de instalação, da necessidade de embarcações especializadas e das operações de manutenção em ambiente marinho (IRENA, 2022; IEA, 2023). Esses valores comprometem sua competitividade quando comparados às alternativas *onshore* disponíveis.

Além disso, a implantação *offshore* em um ambiente portuário ativo impõe restrições espaciais e operacionais relevantes, relacionadas à interferência em rotas de navegação, áreas de fundeio, canais de acesso e ecossistemas costeiros sensíveis. Sob o ponto de vista regulatório e ambiental, o licenciamento de empreendimentos *offshore* apresenta maior complexidade, especialmente em áreas com presença de unidades de conservação, como ocorre no entorno da Baía de São Marcos.

Por essas razões, o Plano de Descarbonização do Porto do Itaquí não prioriza a energia eólica *offshore* no planejamento, concentrando-se na expansão da geração renovável em terra consideradas mais aderentes às condições territoriais, econômicas e institucionais do porto (EMAP, 2025). A eólica *offshore* é tratada apenas como alternativa prospectiva de longo prazo, condicionada à redução de custos tecnológicos e à evolução do marco regulatório nacional.

Em síntese, a análise do potencial eólico indica que a energia eólica *onshore* constitui a alternativa mais viável, madura e economicamente competitiva para complementar o suprimento energético renovável do cluster portuário de hidrogênio verde no Porto do Itaquí. A modalidade *offshore*, embora possível, apresenta-se atualmente como inviável do ponto de vista econômico e operacional, devendo ser considerada apenas em cenários futuros de expansão e amadurecimento tecnológico. A tabela apresenta uma síntese das duas alternativas.

Tabela 8.1.1.1.4: Comparação entre geração eólica *onshore* e *offshore* no contexto do Porto do Itaquí

Critério	Eólica <i>onshore</i>	Eólica <i>offshore</i>	Fonte
Implantação espacial	Terra firme / retroárea portuária	Ambiente marítimo	EMAP (2025); IRENA (2022)
Investimento médio	US\$ 1,2–1,6 milhão/MW	US\$ 3,0–5,0 milhões/MW	IRENA (2022); IEA (2023)
Complexidade operacional	Moderada	Elevada	IEA (2023)

Maturidade tecnológica	Alta	Média / emergente	IRENA (2022)
Riscos ambientais	Controláveis	Elevados	EMAP (2025)
Prioridade nos planos do porto	Sim	Não	EMAP (2025)

Fonte: elaboração própria.

A. RESTRIÇÕES AMBIENTAIS

O Porto de Itaqui está inserido em um território ambientalmente sensível, no qual a presença de Áreas de Proteção Ambiental (APAs) e Unidades de Conservação (UCs) constitui um dos principais condicionantes à expansão portuária e à implantação de novos empreendimentos industriais. No âmbito do estudo de caso, a identificação dessas áreas, conforme sistematizado no Plano de Desenvolvimento e Zoneamento (PDZ), é essencial para orientar a localização da planta de hidrogênio verde, antecipar exigências do licenciamento ambiental e definir limites práticos de ocupação do solo na área portuária e em sua retroárea.

Do ponto de vista institucional, o porto apresenta um arcabouço consolidado de gestão ambiental, com Sistema de Gestão Ambiental certificado pela ISO 14001, desempenho destacado no Indicador de Desempenho Ambiental (IDA) da ANTAQ e adesão ao Pacto Global desde 2016. Esse contexto reforça que a expansão de atividades no porto ocorre sob uma lógica de conformidade ambiental, o que se reflete diretamente nas diretrizes do PDZ e nos procedimentos de licenciamento (EMAP, 2019).

O PDZ identifica, em um raio de até 10 km do Porto do Itaqui, um conjunto de Unidades de Conservação federais e estaduais, abrangendo categorias de Proteção Integral e de Uso Sustentável, conforme estabelecido pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). Entre essas áreas, destacam-se aquelas com maior proximidade e potencial de influência direta sobre o planejamento portuário. A Tabela 8.1.1.1.5, a seguir, apresenta os dados consolidados.

Tabela 8.1.1.1.5: UCs identificadas em um raio de 10 km na região do Porto do Itaqui

Nome da Unidade de Conservação	Categoria / Uso	Esfera	UF	Plano de Manejo	Instrumento de Criação	Distância do Porto
APA Upaon-Açu / Miritiba / Alto Preguiças	Uso sustentável	Estadual	MA	Não	Decreto nº 12.428	0,5 km
APA das Reentrâncias Maranhenses	Uso sustentável	Estadual	MA	Não	Decreto nº 11.901/1991	0 km
APA da Baixada Maranhense	Uso sustentável	Estadual	MA	Não	Decreto nº 11.900/1991	0 km
APA da Região do Maracanã	Uso sustentável	Estadual	MA	Não	Decreto nº 12.103/1991	6,3 km
APA do Itapiracó	Uso sustentável	Estadual	MA	Sim	Decreto nº 15.618	10,4 km
RPPN Estâncias Pedreiras	Uso sustentável	Federal	MA	Não	Portaria nº 56/2001	7,8 km

RPPN Fazenda Boa Esperança	Uso sustentável	Federal	MA	Não	Portaria nº 120-N/1997	6,9 km
RPPN Jaguaréma	Uso sustentável	Federal	MA	Não	Portaria nº 2.468/1990	6,9 km
Parque Estadual do Bacanga	Proteção integral	Estadual	MA	Não	Decreto nº 7.545/1980	6,8 km
Parque Estadual do Rangedor	Proteção integral	Estadual	MA	Sim	Decreto nº 10.455	4,3 km
Reserva Extrativista (RESEX) do Tubarão	Uso sustentável	Federal	MA	Não	Decreto nº 9.340	21,1 km

Fonte: Emap (2019). Elaboração própria.

As Áreas de Proteção Ambiental (APAs) constituem o grupo mais relevante em termos de interface territorial com o porto. A APA Upaon-Açu/Miritiba/Alto Preguiças, por exemplo, encontra-se a aproximadamente 0,5 km do Porto do Itaqui, enquanto a APA das Reentrâncias Maranhenses e a APA da Baixada Maranhense apresentam sobreposição territorial conforme determinadas bases cartográficas, o que evidencia a necessidade de cautela na definição de limites e na leitura espacial dessas áreas (EMAP, 2019). Essas APAs são classificadas como Unidades de Uso Sustentável, permitindo a coexistência de atividades produtivas, desde que compatibilizadas com a conservação ambiental.

No contexto do cluster de hidrogênio verde, a presença dessas APAs não representa impedimento absoluto à implantação da planta, mas impõe condicionantes claras: necessidade de estudos ambientais, controle rigoroso de efluentes líquidos e gasosos, restrições à supressão vegetal e atenção à capacidade de suporte dos ecossistemas. Assim, a implantação de infraestruturas industriais tende a ser mais adequada em áreas já antropizadas, evitando a abertura de novas frentes de ocupação dentro dos limites das APAs ou em suas zonas mais sensíveis.

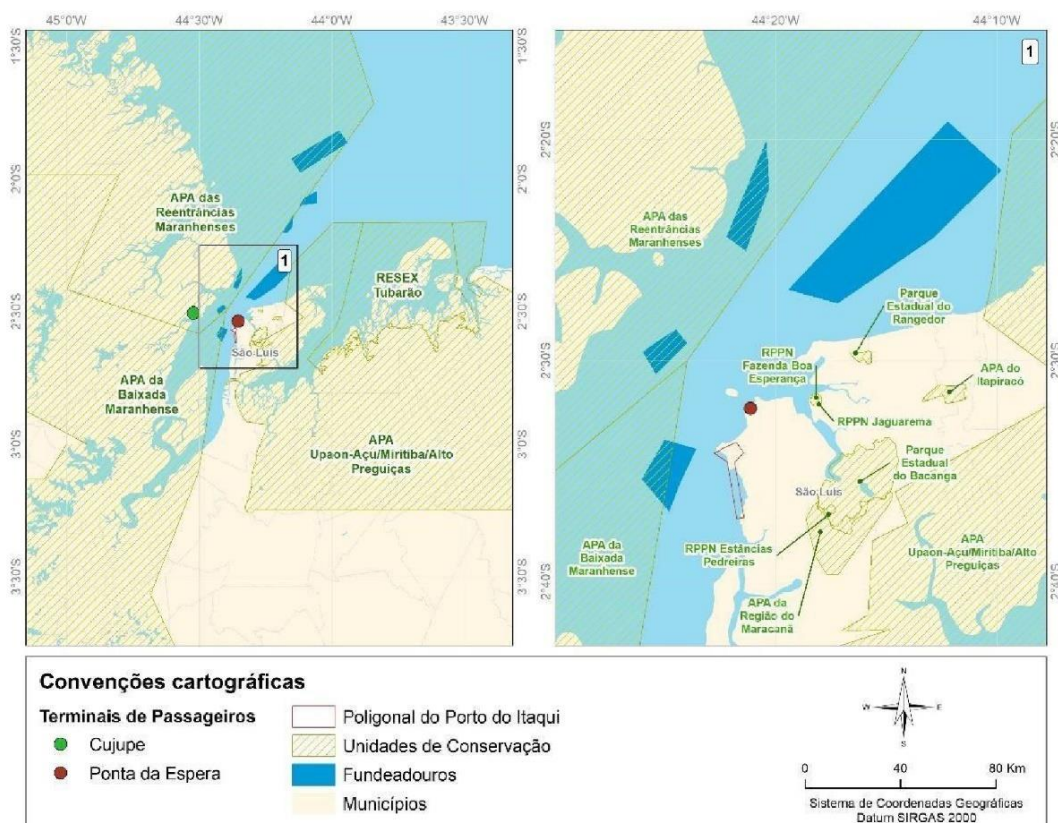
Além das APAs de maior abrangência regional, o PDZ identifica a APA da Região do Maracanã, localizada a cerca de 6,3 km do porto, e a APA do Itapiracó, a aproximadamente 10,4 km, ambas de uso sustentável e sob gestão estadual. Embora não incidam diretamente sobre a poligonal portuária, essas áreas reforçam o caráter ambientalmente condicionado do território metropolitano de São Luís e a necessidade de uma abordagem integrada entre porto, cidade e meio ambiente.

Entre as Unidades de Conservação de Proteção Integral, o Parque Estadual do Bacanga e o Parque Estadual do Rangedor merecem destaque. O Parque do Bacanga, localizado a cerca de 6,8 km do Porto do Itaqui, representa uma área de alta sensibilidade ambiental, na qual são vedadas atividades industriais e intervenções que comprometam a integridade dos ecossistemas. O PDZ e o Plano Mestre indicam que, apesar da existência de plano de manejo, a zona de amortecimento do Parque do Bacanga não se encontra claramente definida, o que, na prática, tende a resultar em maior rigor no licenciamento de empreendimentos localizados em seu entorno.

Para o estudo de caso, essa condição implica uma diretriz objetiva: infraestruturas sensíveis do cluster, como unidades de eletrólise, áreas de armazenamento de insumos e instalações com maior risco tecnológico, não devem ser implantadas em áreas que ampliem pressões ambientais sobre o parque. O mesmo raciocínio se aplica ao Parque Estadual do Rangedor, ainda que este se encontre a maior distância da área portuária.

O PDZ identifica ainda Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs) e a RESEX Tubarão, localizada a mais de 20 km do porto, que, embora não interfiram diretamente na implantação do cluster, reforçam a regulação ambiental do território.

Figura 8.1.1.1.5: Unidades de Conservação no território do Porto do Itaqui (MMA)



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

Do ponto de vista do ordenamento territorial, o PDZ estabelece que o Porto do Itaqui se encontra parcialmente inserido em uma Zona Industrial (ZI3) e majoritariamente em Zona de Proteção Ambiental (ZPA2), inclusive em sua área de expansão. Esse enquadramento é importante na análise da viabilidade do cluster. Enquanto as áreas industriais apresentam maior compatibilidade com a implantação de plantas produtivas, as zonas de proteção ambiental exigem maior cautela, soluções de menor impacto e justificativas técnicas estruturadas. Na retroárea, esse raciocínio se amplia, quanto maior a proximidade com rios, manguezais e lagoas identificados no PDZ, maior a probabilidade de restrições e condicionantes (EMAP, 2019)

Importa destacar que o Porto do Itaqui possui licenciamento ambiental vigente, incluindo EIA/RIMA para suas expansões, além de um conjunto de instrumentos de gestão

ambiental — Plano de Monitoramento Ambiental, Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, Plano de Emergência Individual, entre outros — que estruturam a operação portuária sob a ótica ambiental (EMAP, 2019). Nesse contexto, a inserção de uma planta de hidrogênio verde é tecnicamente possível, desde que respeitados os limites estabelecidos pelo PDZ e incorporadas as condicionantes típicas do licenciamento portuário-industrial.

O Plano de Descarbonização do Porto do Itaquí reforça essa leitura ao reconhecer a viabilidade da introdução de cadeias energéticas de baixo carbono, incluindo o hidrogênio verde, desde que integradas aos instrumentos de planejamento, licenciamento e compensação ambiental existentes. Assim, o projeto não se configura como ruptura, mas como desdobramento coerente da estratégia ambiental já adotada.

O mesmo plano também sustenta, como diretriz de governança ambiental, que mecanismos de compensação e neutralização devem ser integrados a instrumentos de gestão portuária, incluindo sua incorporação em licenças e concessões, com acompanhamento e verificação (EMAP, 2025). Assim, projetos como o desse estudo de caso precisam nascer com “entregáveis ambientais” explícitos: controle de efluentes, gestão de riscos tecnológicos, medidas de contenção de emissões difusas, plano de emergências e monitoramentos associados às condicionantes típicas de empreendimentos portuário e industriais.

A análise das APAs e Unidades de Conservação previstas no PDZ demonstra, portanto, que o território do Porto do Itaquí não inviabiliza a implantação de um cluster portuário de hidrogênio verde, mas define limites e exigências. Áreas de Proteção Integral funcionam como zonas de exclusão para instalações industriais, enquanto as APAs impõem condicionantes que orientam a escolha locacional, o desenho do empreendimento e as soluções tecnológicas adotadas. A viabilidade do projeto está diretamente associada à priorização de áreas portuárias e retroportuárias já antropizadas, ao cumprimento rigoroso do licenciamento ambiental e à incorporação de medidas de mitigação e compensação compatíveis com a capacidade de suporte dos sistemas locais.

8.1.1.2. COMPOSIÇÃO NÃO NATURAL

A caracterização da composição não natural do Porto do Itaquí e de sua retroárea tem como objetivo analisar os elementos infraestruturais, logísticos e operacionais que condicionam a viabilidade da implantação de um cluster portuário de hidrogênio verde. Nesta etapa do estudo de caso, a análise concentra-se nas estruturas já existentes e nas possibilidades de expansão, considerando a capacidade do porto, a disponibilidade de terminais de armazenagem e a articulação da rede logística multimodal.

A. CAPACIDADE DO PORTO

A análise da capacidade operacional permite avaliar se o complexo portuário dispõe de escala, especialização e infraestrutura física compatíveis com o projeto. Para tanto, são considerados o perfil e o volume de cargas movimentadas, bem como a infraestrutura

instalada de berços, píeres e terminais, com ênfase nas operações envolvendo granéis líquidos e produtos energéticos.

O Porto do Itaquí apresenta um perfil de cargas fortemente concentrado em granéis sólidos e granéis líquidos, característica que o posiciona entre os principais portos públicos brasileiros em termos de volume movimentado. Dados da ANTAQ indicam que, nos últimos anos, o porto vem mantendo patamares elevados de movimentação anual, com volumes superiores a 30 milhões de toneladas, inserindo-se de forma estratégica no escoamento da produção do MATOPIBA e na recepção de insumos energéticos e industriais (ANTAQ, 2024).

Em 2022, o porto movimentou aproximadamente 34 milhões de toneladas, sendo 69% de granéis sólidos, 26% de granéis líquidos e 5% de carga geral, evidenciando sua vocação para operações em larga escala e cadeias produtivas de base energética e agroindustrial. Os granéis sólidos vegetais, especialmente soja e milho, constituem a principal classe de carga, representando cerca de 33% de todo o tráfego do porto, com tendência de crescimento associada à expansão da fronteira agrícola do Centro-Norte.

Os granéis líquidos, que incluem derivados de petróleo, combustíveis e GLP, configuram a segunda categoria mais relevante e representam aproximadamente 14% do total movimentado, além dos hidrocarbonetos destinados ao transbordo, com cerca de 10%, e do GLP, confirmando a vocação do porto para operações com produtos energéticos e químicos. Complementam o perfil as cargas de fertilizantes, carvão mineral e carga geral, incluindo celulose, que, embora representem menor participação relativa, reforçam a diversidade operacional do complexo.

Dados mais recentes de movimentação, consolidados pela EMAP em 2025, indicam a manutenção desse padrão, com mais de 34,3 milhões de toneladas movimentadas, sendo aproximadamente 24,6 milhões de toneladas de granéis sólidos, 8,2 milhões de toneladas de granéis líquidos e 1,6 milhão de toneladas de carga geral, sobretudo celulose. Esses números confirmam a robustez operacional do porto e sua estabilidade mesmo diante de oscilações do mercado.

O Plano Mestre projeta a continuidade desse crescimento no horizonte de longo prazo, estimando volumes superiores a 65 milhões de toneladas anuais até 2060, no cenário tendencial. Essa projeção coloca o porto em uma trajetória de crescimento acima da média nacional, sobretudo nos segmentos de granéis sólidos e líquidos, diretamente relacionados a cadeias produtivas de base energética e industrial (BRASIL, 2018).

Do ponto de vista da infraestrutura física, o Porto do Itaquí dispõe de um conjunto de berços e píeres compatíveis com operações de grande porte e com diferentes naturezas de carga. O porto dispõe de nove berços operacionais, distribuídos ao longo de 2.156 metros de faixa acostável, organizados em dois trechos contínuos de cais multiuso e três berços exclusivos para granéis líquidos, projetados para atender diferentes naturezas de carga, incluindo granéis sólidos vegetais, granéis sólidos minerais, granéis líquidos (combustíveis, derivados de petróleo e GLP) e carga geral, como celulose.

Figura 8.1.1.2.1: Infraestrutura de acostagem do Porto do Itaquí, localização dos berços



Fonte: Website do Porto de Itaquí (2025)

O primeiro trecho de cais é composto pelos berços 99, 100, 101, 102 e 103, com aproximadamente 1.036 metros de extensão, enquanto o segundo trecho compreende os berços 104 e 105, somando 480 metros. Complementam essa estrutura os berços 106 e 108, ambos dedicados exclusivamente à operação de granéis líquidos, sendo o berço 106 conhecido como Pier Petrolero e o berço 108 o mais recente, com primeira atracação registrada em 2018. O berço 107 encontra-se desativado, em função de incompatibilidades operacionais e riscos à manobra.

As características dos berços, sintetizadas na Tabela 8.1.1.2.1, comprovam a capacidade do porto para operar navios de grande porte, com profundidades que variam de 12 a 19 metros e calados máximos autorizados de até 18,5 metros, especialmente nos berços dedicados a granéis líquidos. Essa condição, associada às características naturais da Baía de São Marcos, permite a atracação de embarcações de grande calado, ampliando a eficiência logística e a competitividade do porto.

Tabela 8.1.1.2.1: Características dos Berços do Porto de Itaquí

Berço	Comp. Estrutural (m)	Comp. Útil – Caixa Navio (m)	DWT (t)	Larg. (m)	Prof. (m)	Calado Máx. (m)	Boca Máx. (m)	LOA Máx. (m)
99	264	238	83.400	40	15	14,5 + HB	40	229
100	320	278	100.000	50	15	14,5 + HB	40	240
101	223	200	80.000	50	12	11,5 + HB	40	200
102	223	200	80.000	50	12	11,5 + HB	40	200
103	270	236	100.000	50	15	14,5 + HB	40	229
104	200	200	80.000	50	13	12,5 + HB	40	184
105	280	235	150.000	50	18	17,5 + HB	45	229
106	340	315	155.000	50	19	18,5 + HB	50	280
108	300	275	91.600 ¹	50	15	14,5 + HB	40	245

Fonte: Website do Porto de Itaquí (2025)

Seu canal de acesso possui profundidade de 23 metros, largura limitante de 500 metros, calado máximo autorizado de 22,3 metros e comprimento aproximado de 101 km, parâmetros que o colocam entre os mais profundos e seguros do sistema portuário

nacional. Essas condições são relevantes para a movimentação de granéis líquidos e produtos energéticos, que demandam navios de grande porte e elevado calado.

O PDZ explicita que o zoneamento portuário prevê áreas específicas para a operação de granéis líquidos, segregadas das demais naturezas de carga, o que reduz conflitos operacionais e amplia a segurança das atividades. Além disso, o plano identifica áreas retroportuárias com potencial de expansão industrial, permitindo a implantação de novas instalações associadas a cadeias energéticas, desde que compatibilizadas com as restrições ambientais e urbanas vigentes (EMAP, 2019).

O Plano de Descarbonização, por sua vez, reconhece que a infraestrutura existente constitui uma base favorável para a introdução de novos combustíveis de baixo carbono, incluindo o hidrogênio verde e seus derivados. O documento destaca que a presença de berços, píeres e sistemas de movimentação de líquidos reduz significativamente as barreiras iniciais para a adaptação ou implantação de novos terminais energéticos, deslocando o foco do investimento para adequações tecnológicas e normativas específicas, e não para a criação de infraestrutura básica (EMAP, 2025).

A combinação entre alto volume de cargas, predominância de granéis sólidos e líquidos, infraestrutura existente para líquidos energéticos e projeções elevadas de crescimento indica que o Porto do Itaquí apresenta capacidade operacional compatível com a implantação de um cluster portuário de hidrogênio verde. Diferentemente de portos com perfil predominantemente containerizado ou de carga geral, Itaquí já opera com cadeias energéticas complexas, reduzindo barreiras técnicas iniciais para a implantação do cluster.

As limitações identificadas nesta etapa não se relacionam à ausência de capacidade portuária, mas à necessidade de adequação às especificidades do hidrogênio, bem como à compatibilização com o zoneamento portuário e ambiental estabelecido no PDZ. Esses aspectos serão aprofundados nas subseções seguintes, relativas aos terminais de armazenamento e à rede logística.

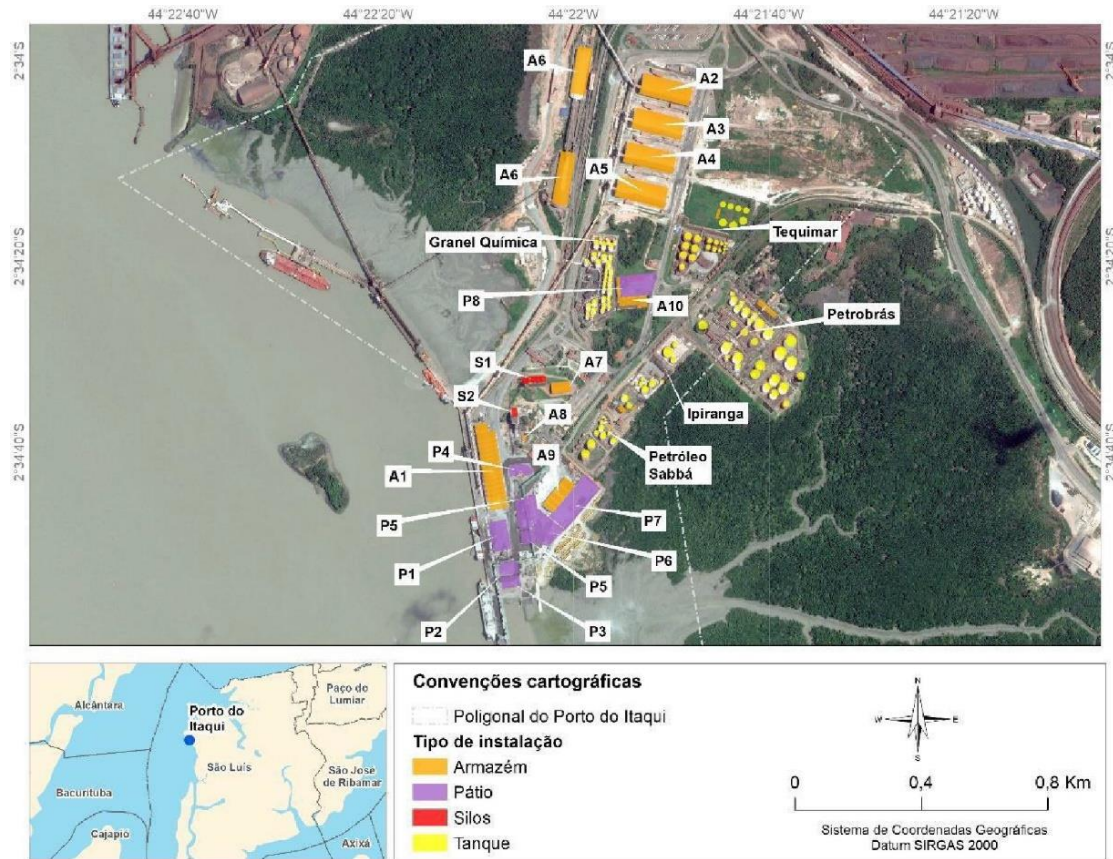
B. TERMINAIS DE ARMAZENAMENTO

A análise dos terminais de armazenamento visa avaliar a capacidade instalada existente, bem como o potencial de expansão física e funcional para a implantação de novas estruturas industriais associadas ao hidrogênio verde e a seus derivados. Essa avaliação considera o perfil atual dos tanques operacionais e a vocação do porto para granéis líquidos.

O Porto do Itaquí já dispõe de infraestrutura para armazenagem e movimentação de granéis líquidos voltados a derivados de petróleo, combustíveis, GLP e produtos químicos, o que constitui uma base segura para a futura adaptação ou complementação voltada a novos vetores energéticos. As operações com granéis líquidos concentram-se principalmente nos berços 104, 106 e 108, que atendem terminais dedicados a esse tipo de carga, com ligação direta a sistemas de dutos e áreas de tanques localizadas na poligonal portuária e em sua retroárea imediata.

Os armazéns, pátios e silos existentes estruturam a logística de cargas sólidas e de carga geral, com destaque para a armazenagem de grãos, fertilizantes, celulose e produtos alimentícios. O porto dispõe de 15 armazéns, 8 pátios de estocagem e 22 silos, a maior parte sob regime de arrendamento, atendendo às cadeias do agronegócio e da indústria de base.

Figura 8.1.1.2.2: Localização dos terminais de granéis líquidos e áreas de tanques no Porto do Itaqui



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

O elemento mais importante para o cluster de hidrogênio verde reside no parque de tancagem de granéis líquidos, combustíveis e químicos. O PDZ identifica a atuação de operadores e distribuidores como Transpetro, Tequimar, Granel Química, BR Distribuidora, Ipiranga e Petróleo Sabbá, com dezenas de tanques destinados ao armazenamento de derivados de petróleo, etanol, biodiesel, soda cáustica e GLP. Somadas, essas estruturas representam centenas de milhares de metros cúbicos de capacidade nominal instalada, conectadas aos berços especializados de granéis líquidos e integradas à malha interna do porto.

Os terminais atualmente em operação contam com tanques metálicos de grande capacidade, projetados para produtos líquidos inflamáveis e pressurizados. Essa condição é particularmente relevante do ponto de vista da transição energética, uma vez que derivados do hidrogênio, como a amônia e o metanol, compartilham requisitos semelhantes de controle operacional, segurança industrial e segregação de áreas.

Tabela 8.1.1.2.2: Síntese da tancagem instalada com potencial de interface com derivados do H₂

Operador/Distribuidor	Tipologia	Produtos atualmente associados (exemplos no PDZ)	Volume nominal total (m ³)	Observação relevante para H ₂ /derivados
Transpetro	Tanques + esferas	Diesel, VLSFO, GLP, água	84.439	Indica operação com armazenamento pressurizado (GLP) e líquidos combustíveis.
BR Distribuidora	Tanques	Gasolina, diesel, óleos combustíveis, QAV, biodiesel, etanol, água	87.323	Parte fora da poligonal, porém conectada ao cais e à distribuição.
Tequimar	Tanques	Gasolina, diesel, etanol, biodiesel, água	94.063	Terminal dedicado a granéis líquidos, escala relevante para futuros derivados.
Granel Química	Tanques	Gasolina, diesel, álcool/etanol, soda cáustica, biodiesel, água	78.038	Inclui químicos (ex.: soda cáustica), aproximando a lógica de terminal químico.
Ipiranga	Tanques	Gasolina, diesel, etanol, B100, água	21.130	Estrutura menor, mas integrada ao sistema de combustíveis.
Petróleo Sabbá S.A.	Tanques + água incêndio	Gasolina, álcool anidro, diesel, água	37.002	Inclui tanques específicos para água (combate a incêndio).

Fonte: elaboração própria

Os terminais atualmente em operação contam com tanques metálicos de grande capacidade, projetados para produtos líquidos inflamáveis e pressurizados. Essa condição é particularmente relevante do ponto de vista da transição energética, uma vez que derivados do hidrogênio, como a amônia e o metanol, compartilham requisitos semelhantes de controle operacional, segurança industrial e segregação de áreas.

Embora não existam, no estado atual, tanques dedicados especificamente ao armazenamento de hidrogênio — seja na forma gasosa ou líquida —, a presença de uma cadeia estruturada de granéis líquidos reduz as barreiras iniciais para a implantação de novas unidades, sobretudo para derivados líquidos, que são mais compatíveis com a lógica portuária tradicional.

Do ponto de vista técnico, o hidrogênio puro apresenta desafios específicos de armazenamento, sobretudo quando considerado em larga escala, em função de sua baixa densidade volumétrica, alta difusividade e requisitos rigorosos de segurança. Em razão disso, os próprios documentos do porto indicam que, no contexto portuário, a prioridade recai sobre o armazenamento e a exportação de derivados do hidrogênio, como amônia verde, metanol verde e combustíveis verdes, que apresentam maior estabilidade físico-química e melhor compatibilidade com a infraestrutura existente (EMAP, 2025).

Nesse sentido, o Plano de Descarbonização aponta explicitamente a amônia verde como vetor prioritário para uma fase inicial de implantação, considerando sua ampla utilização industrial, sua demanda internacional crescente e a viabilidade logística associada ao uso de tanques atmosféricos refrigerados ou pressurizados, tecnologias já dominadas no setor portuário. A adaptação de áreas atualmente destinadas a granéis líquidos para esse fim é tecnicamente factível, desde que atendidas as exigências normativas específicas.

Além da infraestrutura existente, o Porto do Itaquí apresenta capacidade de expansão física, especialmente em áreas já antropizadas da poligonal portuária e, de forma ainda mais significativa, em sua retroárea industrial. O PDZ e o Plano Mestre identificam zonas destinadas à expansão portuária e industrial, com vocação para atividades de apoio logístico, armazenagem e transformação de cargas. Essas áreas configuram espaços estratégicos, por exemplo, para a implantação de novos parques de tanques dedicados a derivados do hidrogênio; unidades de compressão, liquefação ou síntese (amônia, metanol) e sistemas auxiliares de segurança, utilidades industriais e integração logística.

A possibilidade de implantação dessas estruturas na retroárea reduz conflitos operacionais com o cais, amplia a flexibilidade de *layout* e facilita a integração com redes de dutos internos, sistemas rodoviários e ferroviários, além de permitir maior controle sobre riscos industriais. O próprio Plano de Descarbonização reconhece essa estratégia como fundamental para viabilizar o hidrogênio verde sem comprometer a eficiência das operações portuárias existentes.

Em resumo, a análise dos terminais de armazenamento indica que o Porto do Itaquí não parte de uma condição de ausência de infraestrutura, mas sim de uma base estruturada que pode ser progressivamente adaptada e ampliada para atender à cadeia do hidrogênio verde. A inexistência atual de tanques dedicados ao hidrogênio não constitui uma limitação estrutural, mas sim uma condição esperada em portos em fase de transição, superável por meio de investimentos e planejamento integrado. Além disso, a conjugação entre infraestrutura existente, zonas de expansão definidas e diretrizes institucionais sustenta a viabilidade da implantação de novas instalações industriais voltadas ao armazenamento e à exportação de derivados do hidrogênio

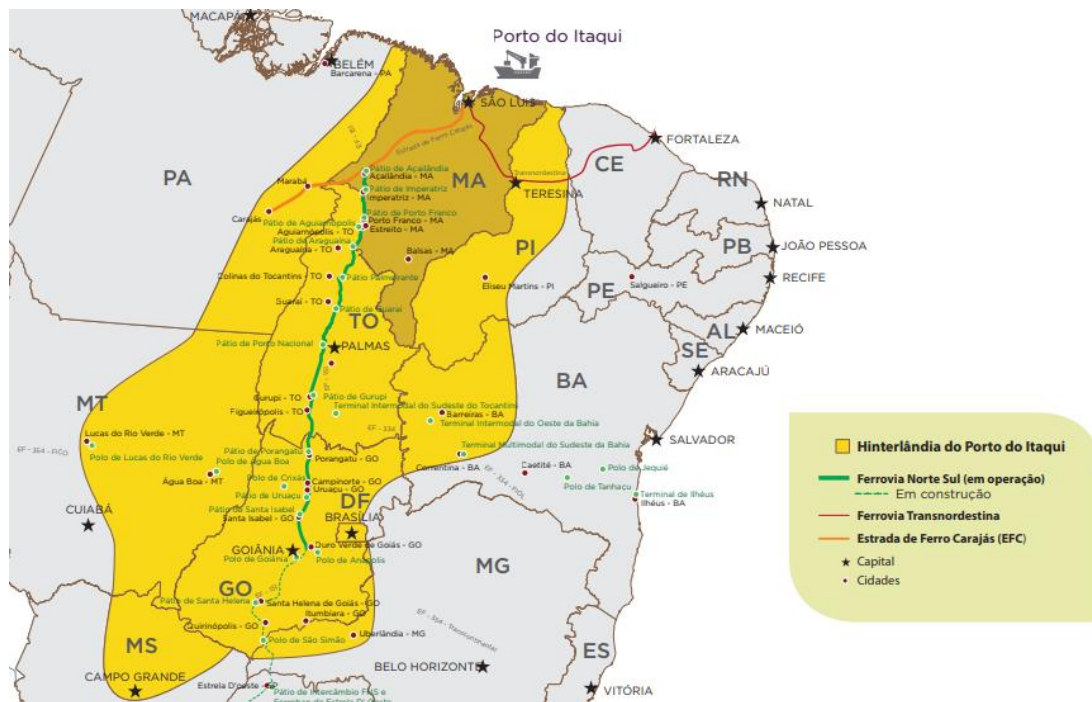
C. REDE LOGÍSTICA E TRANSPORTE

A rede logística associada ao Porto do Itaquí constitui um dos principais vetores de competitividade do complexo portuário, conferindo-lhe elevada capacidade de integração territorial, eficiência operacional e alcance nacional e internacional. A infraestrutura articula acessos rodoviários, ferroviários, dutoviários e aquaviários, com forte conexão à sua *hinterlândia* e às áreas industriais da retroárea. Essa configuração logística permite ao porto desempenhar papel estratégico no escoamento de granéis sólidos vegetais e minerais, combustíveis, fertilizantes e carga geral, atendendo tanto aos mercados internos quanto às rotas internacionais de exportação, especialmente para a América do Norte, Europa e Ásia.

A *hinterlândia* corresponde à área territorial de influência logística e econômica de um porto, abrangendo os espaços produtores, industriais e consumidores que se conectam ao sistema portuário por meio das redes de transporte e infraestrutura associadas (RODRIGUE, COMTOIS, SLACK, 2017). Trata-se de um conceito fundamental na análise da competitividade portuária, pois expressa a capacidade do porto de articular fluxos de carga em escala regional, nacional e internacional.

No caso do Porto do Itaqui, a *hinterlândia* apresenta dimensão ampliada, caráter multimodal e grande diversidade produtiva, extrapolando os limites do estado do Maranhão e alcançando regiões estratégicas do território nacional. Essa área de influência concentra importantes polos agrícolas, minerais e industriais, destacando-se a produção de soja, milho e farelo no MATOPIBA, a extração mineral na Província de Carajás e os polos industriais e de distribuição de combustíveis no entorno da Ilha de São Luís. Essa diversidade produtiva reduz a vulnerabilidade do porto a flutuações setoriais e reforça sua posição como *hub* logístico.

Figura 8.1.1.2.3: *Hinterlândia* do Porto do Itaqui



Fonte: Website do Porto de Itaqui (2025)

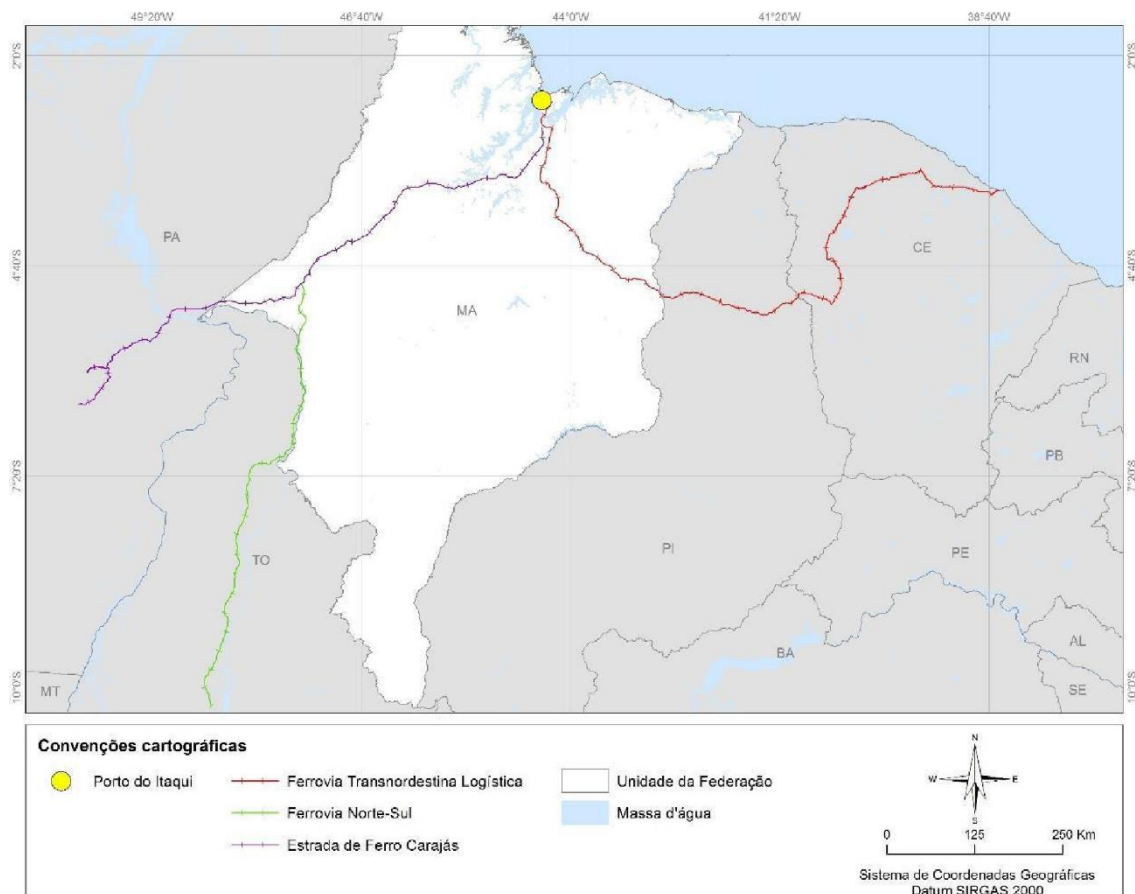
Outro aspecto relevante é a integração funcional entre a *hinterlândia* regional e a retroárea portuária, especialmente por meio do Distrito Industrial de São Luís (DISAL). Essa relação permite que parte significativa das atividades industriais, de armazenagem e de transformação ocorra fora da poligonal portuária, otimizando o uso do território, reduzindo conflitos operacionais e ampliando a capacidade de expansão do complexo sem comprometer áreas ambientalmente sensíveis. O PDZ e o Plano Mestre reconhecem essa complementaridade como elemento importante no planejamento de longo prazo.

A *hinterlândia* é, por sua vez, sustentada por uma estrutura logística multimodal, na qual se destacam as conexões ferroviárias de longa distância, os acessos rodoviários regionais, a infraestrutura aquaviária de águas profundas e os sistemas dutoviários associados à movimentação de granéis líquidos. A caracterização desses modais é apresentada a seguir.

- **Ferrovias**

O modal ferroviário é responsável pela maior parte dos fluxos de longa distância associados às cargas de exportação e importação que compõem sua *hinterlândia*. Conforme destacado no PDZ e no Plano Mestre, a presença de duas ferrovias de alcance nacional — a Estrada de Ferro Carajás e a Ferrovia Norte-Sul — confere ao porto uma posição singular no sistema logístico brasileiro, ao articular áreas produtoras do interior diretamente ao litoral por meio de infraestrutura de alta capacidade (BRASIL, 2018; EMAP, 2021).

Figura 8.1.1.2.4: Malha ferroviária do complexo portuário do Itaqui



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

A Estrada de Ferro Carajás (EFC) é uma ferrovia de uso predominantemente dedicado, operada pela Vale S.A., com aproximadamente 892 km de extensão, ligando a Província Mineral de Carajás, no sudeste do Pará, ao Porto do Itaqui. Trata-se de uma ferrovia de alto padrão técnico, com bitola larga, elevado nível de automação e capacidade para trens de grande comprimento e carga por eixo. Sua operação é voltada majoritariamente ao

transporte de minério de ferro para exportação, mas também contempla o escoamento de combustíveis, grãos e insumos industriais. No contexto do Porto do Itaqui, a EFC viabiliza fluxos contínuos de grandes volumes, com forte inserção nos mercados internacionais, sobretudo asiáticos (BRASIL, 2018).

A Ferrovia Norte–Sul (FNS) complementa essa estrutura ao estabelecer a integração longitudinal do território nacional. No Maranhão, a FNS conecta-se ao Porto do Itaqui por meio de ramais operacionais que permitem o acesso direto ao complexo portuário, ampliando sua *hinterlândia*. A ferrovia atende áreas produtoras do Tocantins, Goiás, Mato Grosso e Bahia, sendo estratégica para o transporte de grãos, fertilizantes, combustíveis e carga geral. Diferentemente da EFC, a FNS opera em regime de acesso aberto, o que amplia sua flexibilidade logística e favorece a diversificação de cargas (EMAP, 2021).

Ambas as ferrovias se encontram em operação, com capacidade instalada compatível com os volumes atualmente movimentados pelo porto. O Plano Mestre indica, entretanto, a necessidade de adequações e expansões graduais, sobretudo em terminais intermodais, pátios ferroviários e interfaces porto–ferrovia, de modo a absorver o crescimento projetado da demanda até o horizonte de longo prazo (BRASIL, 2018).

Complementarmente às ferrovias já em operação, o planejamento logístico considera a Ferrovia Transnordestina, empreendimento estruturante ainda em fase de implantação, cujo traçado projetado amplia de forma significativa o alcance da *hinterlândia* do porto no Nordeste brasileiro. A Transnordestina foi concebida para conectar áreas produtoras do interior do Nordeste aos portos de Pecém (CE) e Suape (PE), com possibilidade de articulações futuras com outros corredores logísticos nacionais, incluindo conexões indiretas com o sistema Norte–Sul (BRASIL, 2018; EMAP, 2021).

Embora o eixo principal da Transnordestina não tenha o Porto do Itaqui como terminal final, o Plano Mestre reconhece seu potencial estratégico para a reconfiguração dos fluxos logísticos regionais. A integração entre a Transnordestina, a Ferrovia Norte–Sul e a Estrada de Ferro Carajás pode criar uma malha ferroviária mais densa no Nordeste, ampliando a competitividade dos portos da região e diversificando alternativas de escoamento para produtos agrícolas, minerais e industriais (BRASIL, 2018).

Do ponto de vista funcional, o modal ferroviário responde pela conexão entre o Porto do Itaqui e os principais polos produtores da sua *hinterlândia*: o minério de ferro proveniente do Pará, os grãos do MATOPIBA e do Centro-Oeste, além de fertilizantes e combustíveis destinados ao abastecimento regional. Essa configuração reduz a dependência do modal rodoviário para longas distâncias, diminui custos logísticos e contribui para menor intensidade de emissões por tonelada transportada, aspecto relevante no contexto de cadeias produtivas de baixo carbono.

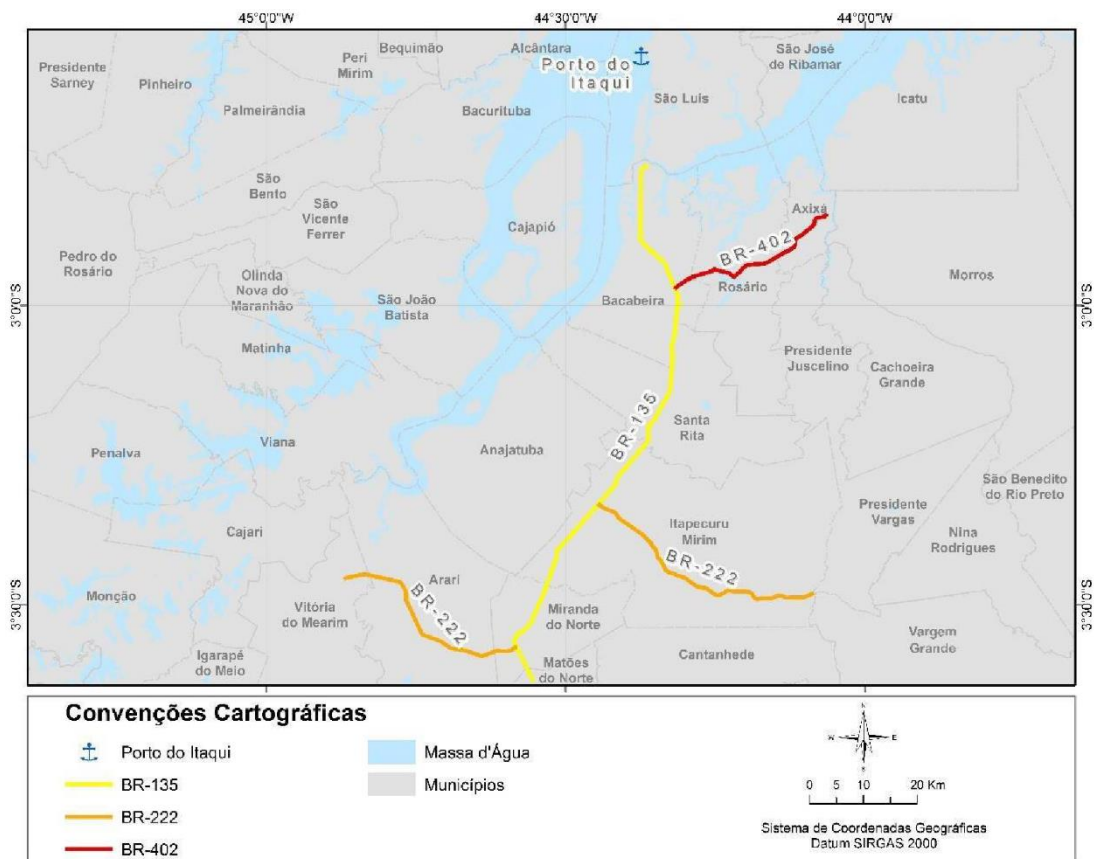
No que se refere à implantação do cluster portuário de hidrogênio verde, a infraestrutura ferroviária existente é uma condicionante estratégica. Ainda que o hidrogênio em si dificilmente seja transportado por ferrovia em sua forma gasosa, o modal é essencial para o transporte de insumos industriais, equipamentos de grande porte, materiais de

construção, bem como para a circulação de derivados sólidos ou líquidos associados à sua cadeia.

- **Rodovias**

O modal rodoviário exerce papel complementar, porém estratégico, na logística do porto, especialmente no atendimento à retroárea, na distribuição regional de cargas e na articulação entre os demais modais. Conforme o PDZ e o Plano Mestre, a acessibilidade rodoviária é fundamental para a integração porto–cidade, para o abastecimento industrial local e para a operação intermodal com ferrovia e dutovias, ainda que não seja o modal prioritário para longas distâncias e grandes volumes (BRASIL, 2018; EMAP, 2021).

Figura 8.1.1.2.5: Localização das rodovias da *hinterlândia* do Porto do Itaqui



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

O principal eixo de acesso ao porto é a BR-135, rodovia federal que conecta São Luís ao interior do estado e ao interior do Maranhão, funcionando como corredor estruturante entre o complexo portuário, a região metropolitana e os polos produtivos estaduais. A BR-135 também estabelece conexão com outros eixos importantes, como a BR-222 e a BR-316, ampliando a capilaridade regional. No âmbito urbano e metropolitano, vias estaduais e municipais complementam o sistema, garantindo o acesso direto às áreas operacionais do porto e à retroárea industrial.

De acordo com o Plano Mestre, o modal rodoviário é responsável principalmente pelo transporte de fertilizantes, combustíveis, carga geral, insumos industriais e apoio às

operações portuárias, desempenhando papel relevante na alimentação dos terminais ferroviários e dutoviários. No entanto, os instrumentos de planejamento reconhecem restrições operacionais associadas à saturação de trechos urbanos, interferências entre porto e cidade, limitações geométricas e necessidade de melhorias de capacidade e segurança viária (BRASIL, 2018).

O PDZ destaca que a intensificação dos fluxos rodoviários exige ações de gestão do tráfego, requalificação de acessos e compatibilização com o uso urbano do solo, de modo a reduzir conflitos com áreas residenciais e mitigar impactos ambientais e sociais. Nesse sentido, o modal rodoviário é tratado como elemento a ser qualificado e racionalizado, e não como eixo principal de expansão logística a longo prazo.

No contexto da implantação desse projeto, o transporte rodoviário apresenta função de suporte. Sua principal contribuição está associada ao deslocamento de equipamentos, materiais de construção, serviços de manutenção, insumos auxiliares e à distribuição local de derivados para mercados regionais. Para o transporte de grandes volumes energéticos ou para exportação, o modal rodoviário tende a ser menos competitivo, sendo substituído por soluções ferroviárias, dutoviárias ou marítimas

Apesar dessas limitações, a presença de uma malha rodoviária integrada aos demais modais é essencial para garantir a flexibilidade operacional do porto, permitindo respostas rápidas a variações de demanda, atendimento a mercados locais e integração com o DISAL e outras áreas produtivas da retroárea.

- **Dutovias**

O modal dutoviário está diretamente associado à movimentação de grânéis líquidos, combustíveis e produtos químicos, com grande eficiência operacional e reduzida interferência urbana. Conforme destacado no PDZ e no Plano Mestre, trata-se de um modal estruturante para a competitividade do porto (BRASIL, 2018; EMAP, 2021). No contexto do porto, são consideradas também como modal dutoviário as correias transportadoras que interligam instalações portuárias a áreas externas, em função de seus atributos de transporte contínuo e dedicado.

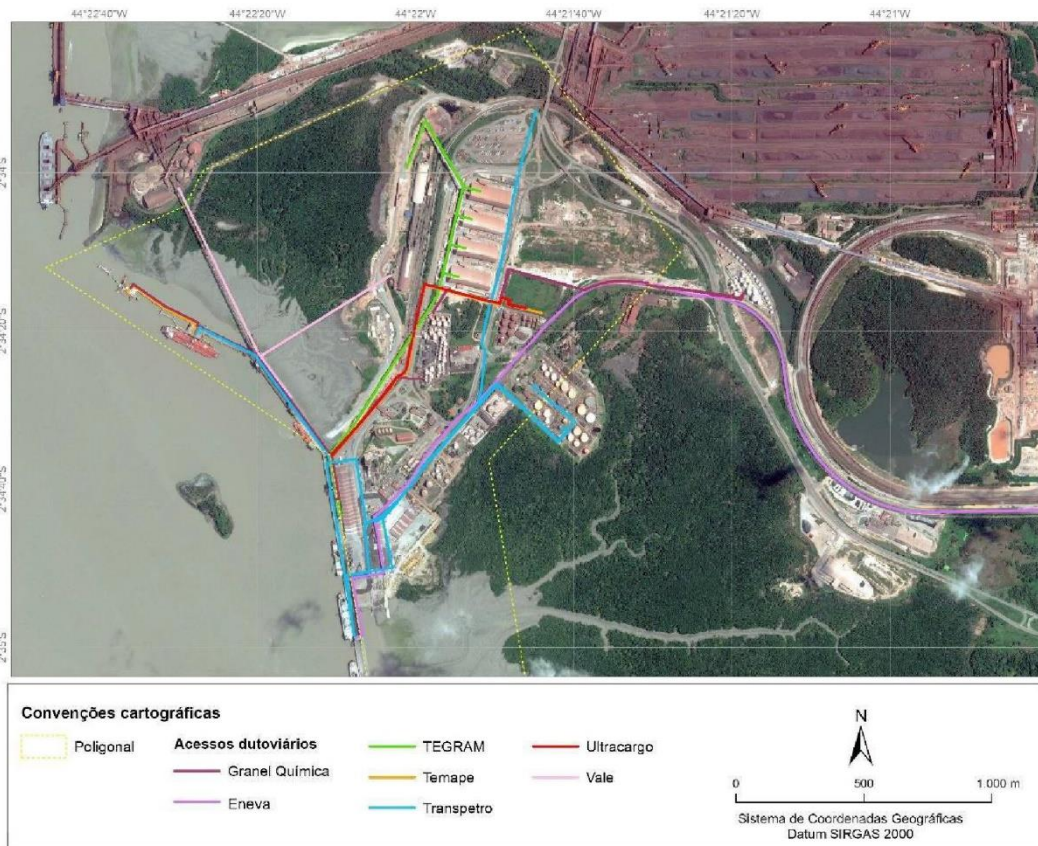
O Porto do Itaquí dispõe de uma infraestrutura dutoviária consolidada, integrada aos terminais de grânéis líquidos e aos berços especializados, permitindo a conexão direta entre os navios atracados, os parques de tancagem e as instalações industriais localizadas dentro e fora da poligonal portuária. Por meio desse modal, são movimentadas cargas como carvão mineral, grânéis líquidos, grãos e efluentes líquidos, como água quente, destacando-se que a movimentação de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) ocorre exclusivamente por dutovias. Essa rede atende, principalmente, às operações de derivados de petróleo, GLP, etanol, biodiesel e produtos químicos, operadas por empresas como Transpetro, Tequimar, Granel Química, Ipiranga e Petróleo Sabbá.

Do ponto de vista operacional, o sistema dutoviário apresenta algumas vantagens logísticas como capacidade de transporte contínuo, menores custos operacionais por unidade transportada, redução de riscos associados ao tráfego rodoviário, menor emissão

de poluentes e maior segurança no manuseio de produtos perigosos. Essas movimentações ocorrem mediante contratos de direito de passagem sobre áreas do porto.

A maior área concedida, com aproximadamente 14.695,77 m², é destinada à Usina Termelétrica Porto do Itaqui Geração de Energia S.A. (UTE Itaqui). Localizada a cerca de cinco quilômetros do Porto Organizado, a UTE responde por aproximadamente 65% do fornecimento de energia elétrica do Estado do Maranhão, dependendo do suprimento contínuo de carvão mineral proveniente do porto por meio de correias transportadoras, além de sistemas dutoviários para captação de água e descarte de efluentes (EMAP; 2021).

Figura 8.1.1.2.6: Acessos dutoviários internos do Porto do Itaqui



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

Embora atualmente não existam dutos dedicados ao transporte de hidrogênio ou de seus derivados, a presença de corredores técnicos, faixas de servidão e experiência operacional com produtos energéticos cria condições favoráveis para adaptações futuras. O Plano de Descarbonização reconhece a possibilidade de utilização dos dutos para a movimentação de hidrogênio, amônia verde, metanol verde ou outros vetores energéticos (EMAP, 2025).

Do ponto de vista territorial, a implantação de novos dutos está condicionada ao zoneamento, às restrições ambientais e à compatibilização com áreas sensíveis e usos urbanos. No entanto, diferentemente do modal rodoviário, o dutoviário permite reduzir

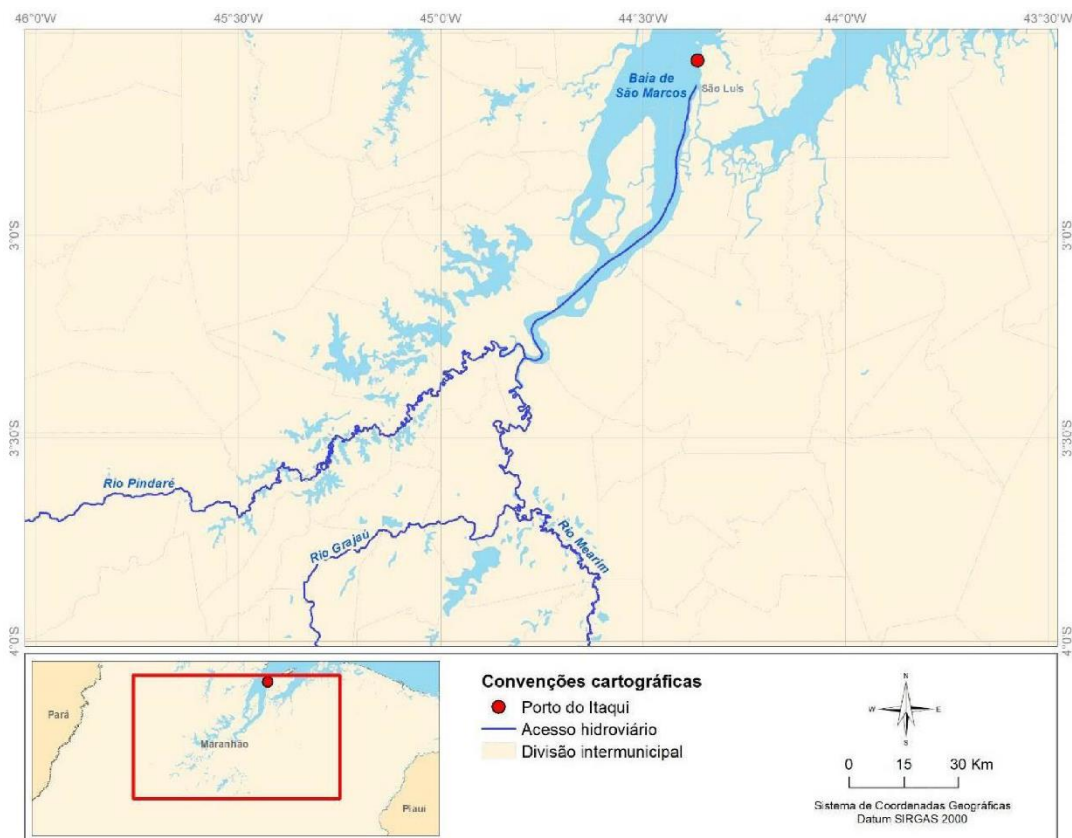
significativamente conflitos entre porto e cidade, uma vez que opera de forma subterrânea ou segregada, com menor impacto visual e menor interferência no tráfego urbano.

Em termos de limitações, destacam-se o alto investimento inicial, a rigidez espacial do traçado e a necessidade de planejamento de longo prazo. Essas características exigem que a adoção desse modal esteja associada a projetos de escala suficiente para justificar economicamente sua implantação.

- **Hidrovias**

O Porto do Itaqui está inserido no contexto hidrográfico da Baía de São Marcos, integrante da bacia hidrográfica do Nordeste, que recebe as águas dos rios Mearim, Grajaú e Pindaré. Desses cursos d'água, os rios Grajaú e Pindaré são afluentes do rio Mearim, sendo este o principal eixo hidrográfico que estabelece a ligação natural entre o interior do Estado do Maranhão e o ambiente estuarino da baía. A Hidrovia do Mearim constitui, portanto, o único ponto de conexão hidroviária entre esses rios e o sistema marítimo da Baía de São Marcos, conforme mapeado no PDZ do Porto do Itaqui.

Figura 8.1.1.2.7: Hidrovias de acesso ao Porto do Itaqui e TUPs adjacentes



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

Do ponto de vista normativo, os rios Mearim, Grajaú e Pindaré são classificados como navegáveis, segundo a listagem oficial das hidrovias brasileiras disponibilizada pelo então Ministério da Infraestrutura. Contudo, essa classificação não se traduz em viabilidade efetiva para a navegação comercial em grande escala. O Planejamento

Hidroviário Estratégico, elaborado pelo Ministério dos Transportes, indica que, no horizonte de análise até 2031, nenhum desses rios apresentaria condições técnicas adequadas para o transporte regular de cargas ou passageiros em escala comercial, sendo utilizados predominantemente por pequenas embarcações de madeira, autopropulsadas, com capacidade entre 2 e 15 toneladas (EMAP; 2021).

O rio Mearim, principal eixo hidroviário da região, possui cerca de 645 km de extensão navegável, dividida nos trechos Alto, Médio e Baixo. A navegabilidade ao longo desse percurso é fortemente condicionada por fatores físicos, como variações acentuadas de declividade, largura e profundidade. O principal entrave identificado é a baixa profundidade em determinados segmentos, com cotas que chegam a aproximadamente 0,80 m, o que inviabiliza a navegação segura e contínua, sobretudo para embarcações de maior porte (EMAP; 2021).

O rio Grajaú apresenta uma extensão navegável estimada em 330 km, enquanto o rio Pindaré alcança aproximadamente 456 km. O encontro entre os rios Pindaré e Mearim ocorre já nas proximidades da Baía de São Marcos configurando uma confluência do ponto de vista hidrológico. Apesar disso, as características físicas do Pindaré impõem limitações ainda mais severas à navegação: sua nascente, situada a cerca de 400 m de altitude, confere alta declividade ao trecho do Alto Pindaré, tornando-o inadequado para a navegação segura. Além disso, o rio apresenta grande variação de largura, que oscila entre 50 m e 80 m na nascente e pode atingir quase 200 m nas proximidades da baía, sem que isso represente ganho efetivo de navegabilidade (EMAP; 2021).

Nesse contexto, embora o modal hidroviário componha o sistema natural de drenagem e conexão regional do Porto do Itaqui, sua função logística é residual quando comparada aos modais ferroviário, rodoviário e dutoviário. O PDZ e o Plano Mestre reconhecem que a navegação fluvial na área de influência do porto exerce papel limitado, restrito principalmente a deslocamentos locais e atividades de pequena escala, não configurando alternativa competitiva para a movimentação de cargas (EMAP, 2021).

Assim, para fins de planejamento logístico e para a implantação de empreendimentos industriais de grande porte, o modal hidroviário não se apresenta como vetor estruturante. Sua relevância permanece circunscrita ao contexto ambiental e territorial, enquanto a integração logística do Porto do Itaqui com sua *hinterlândia* e com os mercados nacionais e internacionais é assegurada prioritariamente pelos demais modais.

O Porto do Itaqui apresenta, por sua vez, elevada conectividade com centros industriais e mercados consumidores em escala regional, nacional e internacional, apoiada na proximidade com o DISAL e com áreas industriais em sua retroárea. Essa condição assegura demanda potencial imediata para insumos energéticos e produtos industriais, além de facilitar a inserção do porto em cadeias globais de exportação, aspecto relevante para projetos voltados à produção de hidrogênio e derivados.

A integração entre os modais ferroviário, rodoviário e dutoviário e ocorre de forma funcional, com conexões diretas entre berços, terminais, pátios, parques de tancagem e

ramais de acesso externo. Essa articulação intermodal reduz etapas de transbordo, aumenta a eficiência operacional e amplia a flexibilidade logística do complexo portuário. No contexto do planejamento territorial e logístico estabelecido pelo PDZ e pelo Plano Mestre, essa estrutura cria condições objetivas para a incorporação de novos fluxos industriais e energéticos. Assim, essas características reforçam a viabilidade logística do porto como plataforma para a produção, distribuição e a exportação de hidrogênio verde e seus derivados no contexto nacional e internacional.

8.1.2. LEVANTAMENTO DA LEGISLAÇÃO URBANA E DO PORTO

A segunda fase da Etapa de Identificação de Oportunidades tem como objetivo analisar o arcabouço normativo que regula o uso e a ocupação do solo no território do porto e em sua área de influência urbana, com ênfase no Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto (PDZ) e no Plano Diretor Municipal. Nesta etapa do estudo de caso, a atenção desloca-se da leitura físico-territorial para a identificação dos condicionantes legais, institucionais e regulatórios que incidem sobre a implantação de novas atividades produtivas no complexo portuário e em sua retroárea. A análise busca compreender de que forma os instrumentos de planejamento portuário e urbano disciplinam usos, intensidades, restrições e possibilidades de expansão, constituindo o suporte normativo para a avaliação da compatibilidade da proposta com as diretrizes vigentes e para a tomada de decisões nas etapas subsequentes do método.

Antes de entrar nos conteúdos específicos dos planos, vale reiterar um ponto importante, o PDZ não substitui a legislação urbana e o Plano Diretor não “rege” o porto, mas há zonas de contato relevantes. O porto organizado é disciplinado por instrumentos setoriais (PDZ/Plano Mestre e demais normas portuárias), enquanto o município exerce sua competência urbanística sobre o território urbano e rural (uso e ocupação do solo, parâmetros construtivos, licenças urbanísticas etc.). Essa distinção não elimina influências recíprocas, o Plano Diretor tende a condicionar a retroárea (onde se localizam áreas industriais, acessos, faixas técnicas, servidões e usos de apoio), e o PDZ, por sua vez, tende a induzir demandas urbanas (viário, logística, compatibilização com áreas sensíveis e diretrizes entre porto e cidade), o que torna necessária uma leitura articulada entre os dois instrumentos.

8.1.2.1. PLANO DIRETOR

O ordenamento territorial do município de São Luís é estruturado a partir de dois instrumentos urbanísticos complementares: o Plano Diretor Municipal (PDM) e a Lei de Zoneamento, Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo Urbano. Enquanto o Plano Diretor estabelece as diretrizes gerais de desenvolvimento urbano e territorial, a Lei de Zoneamento operacionaliza essas diretrizes por meio da definição objetiva de zonas urbanas, usos permitidos, tipologias edilícias e parâmetros construtivos.

No contexto do presente estudo de caso, o PDZ disciplina exclusivamente o território do porto organizado, enquanto a retroárea portuária permanece sob plena competência do planejamento urbano municipal. Assim, a compatibilidade da implantação de um cluster portuário de hidrogênio verde depende diretamente das normas estabelecidas pelo Plano Diretor e pela legislação de uso do solo vigente.

O Plano Diretor de São Luís em vigor foi instituído pela Lei nº 7.122, de 12 de abril de 2023 consolida as diretrizes da política urbana do município. No que se refere às atividades produtivas, o plano reconhece o papel estratégico do Complexo Portuário do Itaqui e de sua área de influência como vetor de desenvolvimento econômico e logístico regional. O documento orienta a consolidação de áreas destinadas a atividades industriais, logísticas e de apoio portuário, ao mesmo tempo em que estabelece diretrizes de proteção ambiental, controle de impactos e integração entre porto e cidade. No entanto, o PDM atua predominantemente em nível estratégico e orientador, não detalhando, de forma normativa, os parâmetros construtivos ou a permissibilidade específica de usos.

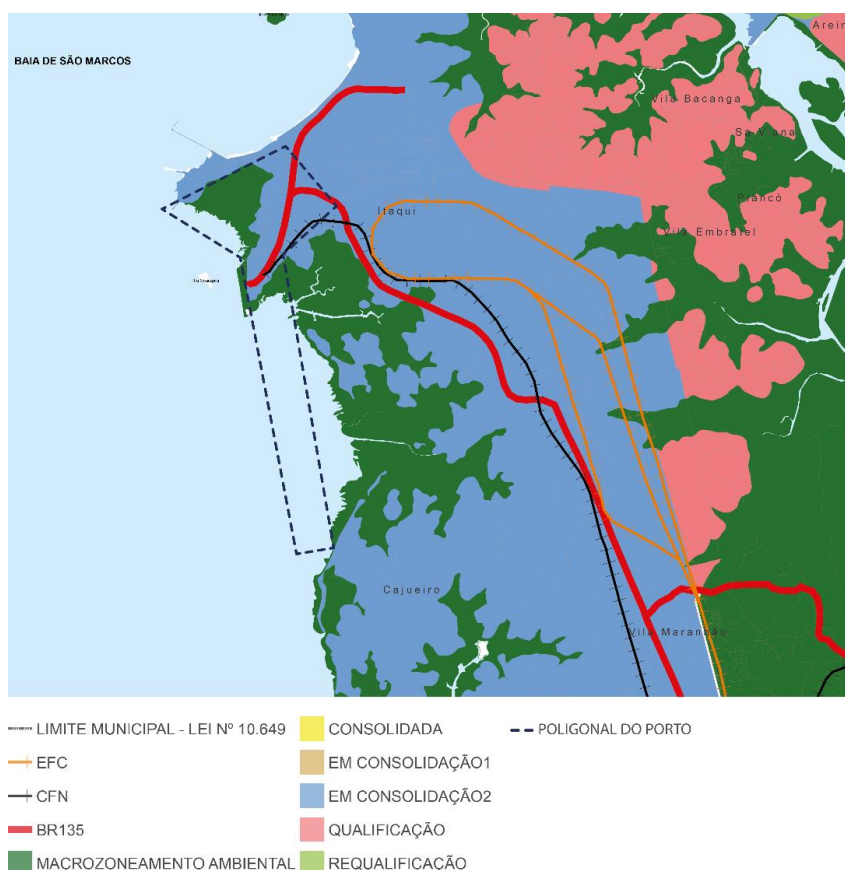
Essa função normativa é exercida, principalmente, pela legislação de zoneamento urbano, que permanece como referência obrigatória nos processos de licenciamento urbanístico. A definição concreta dos usos do solo e dos parâmetros urbanísticos em São Luís é regulada pela Lei nº 3.253, de 29 de dezembro de 1992, que dispõe sobre o zoneamento, o parcelamento, o uso e a ocupação do solo urbano. Apesar de sua antiguidade, essa lei continua vigente e trata-se, portanto, do instrumento que efetivamente autoriza ou restringe a implantação de atividades no território municipal.

Embora o Plano Diretor de 2023 tenha sido atualizado, a Lei nº 3.253/1992 não foi integralmente revisada, o que gera uma assimetria entre as diretrizes de desenvolvimento urbano e uma legislação de uso do solo concebida em um contexto territorial anterior à consolidação do Porto do Itaqui. Reconhecendo essa defasagem, o município instituiu, em 2025, uma comissão técnica para revisão da legislação de zoneamento; contudo, até a conclusão desse processo, a lei de 1992 permanece como referência normativa.

A inclusão da retroárea portuária nessa macrozona revela um enquadramento urbanístico estratégico, pois reconhece o território como uma área de transição entre espaços consolidados e áreas em processo de estruturação, compatível com a implantação de atividades produtivas, logísticas e industriais, desde que observadas as diretrizes de ordenamento urbano e as restrições ambientais aplicáveis. Trata-se, portanto, de uma macrozona que não impõe vedação prévia a usos de maior intensidade econômica, mas que condiciona sua implantação à adequada integração com o entorno urbano.

O plano caracteriza essa área como uma macrozona que apresenta boa disponibilidade de infraestrutura urbana e um certo grau de urbanização, embora ainda marcada por descontinuidades espaciais e áreas subutilizadas. Essas características são particularmente evidentes na retroárea do Porto do Itaqui, onde coexistem usos industriais, logísticos, áreas institucionais, vazios urbanos e ocupações residenciais de diferentes padrões socioeconômicos.

Figura 8.1.2.1.1: Mapa de Macrozoneamento do Plano Diretor de São Luís



Fonte: Plano Diretor Municipal de São Luís, Lei nº 7.122/2023

Os objetivos definidos pelo Plano Diretor para a Macrozona em Consolidação – 2 fornecem importantes balizas para a análise da viabilidade urbanística do projeto. Entre esses objetivos, destacam-se:

- estimular a ocupação do território, por meio da promoção imobiliária e da implantação de habitação de mercado popular ou de interesse social;
- gerar empregos, com ênfase no setor de serviços, mas também em atividades produtivas capazes de dinamizar a economia local;
- promover a complementação do tecido urbano, o aproveitamento do potencial paisagístico e o cumprimento da função social da propriedade.

No contexto da retroárea do Porto do Itaquí, esses objetivos são compatíveis com a implantação de empreendimentos industriais de base tecnológica e energética. O próprio enquadramento da área nessa macrozona indica que o Plano Diretor não apenas admite, como incentiva, a atração de investimentos estruturantes capazes de induzir desenvolvimento urbano qualificado.

Outra parcela significativa da retroárea do Porto do Itaquí encontra-se inserida na Macrozona de Qualificação. Essa macrozona é composta por áreas predominantemente habitadas por população de baixa renda e baixo nível de escolaridade, marcadas por

elevada concentração de assentamentos espontâneos, infraestrutura urbana incompleta e déficit de equipamentos públicos e serviços essenciais.

Do ponto de vista territorial, a Macrozona de Qualificação caracteriza-se por um padrão de ocupação fragmentado, com deficiências estruturais relacionadas ao saneamento, à mobilidade, ao acesso a serviços urbanos e à regularização fundiária. Trata-se de áreas que demandam investimentos públicos estruturantes para a melhoria das condições de habitabilidade e para a efetivação do direito à cidade.

Esses atributos impõem restrições relevantes à implantação direta de empreendimentos industriais de grande porte, especialmente aqueles associados a atividades de maior risco tecnológico ou impacto ambiental. No entanto, o PDM não caracteriza essa macrozona como área de exclusão produtiva. Ao contrário, seus objetivos estratégicos incluem:

- a melhoria da infraestrutura urbana;
- a promoção da habitação de interesse social;
- a ampliação do acesso ao transporte coletivo;
- a regularização fundiária e
- a geração de empregos.

Nesse sentido, essa área introduz um importante condicionante social e urbano à implantação do cluster portuário de hidrogênio verde. Embora a instalação direta de plantas industriais de maior complexidade tecnológica seja mais adequada às áreas classificadas como Macrozona em Consolidação ou a zonas industriais específicas, a proximidade com áreas de qualificação urbana reforça a necessidade de estratégias de mitigação de impactos, de integração com políticas públicas e de geração de oportunidades econômicas locais.

Assim, do ponto de vista do planejamento urbano, a Macrozona de Qualificação também não inviabiliza a implantação do cluster, mas impõe exigências adicionais relacionadas à compatibilização de usos, à proteção das populações residentes e à articulação com programas de desenvolvimento urbano e social.

Por outro lado, a análise do zoneamento urbano no município de São Luís permite identificar os usos permitidos, parâmetros construtivos e condicionantes legais que incidem sobre o Porto do Itaqui e, sobretudo, sobre sua retroárea imediata. Embora essa legislação seja anterior à consolidação do porto organizado em sua configuração atual, ela constitui referência obrigatória para a análise urbanística fora da poligonal portuária, onde o PDZ não possui competência direta.

O território correspondente a poligonal do porto e sua retroárea encontram-se, majoritariamente, classificados como Zona Industrial 3 (ZI-3). Trata-se de uma zona destinada prioritariamente à implantação de atividades industriais de médio e grande porte. A figura a seguir apresenta o mapa de zoneamento.

geral de compatibilidade, enquanto o PDZ estabelece as regras efetivas de ordenamento do espaço portuário.

Na porção nordeste da retroárea, o zoneamento urbano predominante é a Zona Residencial 4 (ZR-4). Diferentemente da ZI-3, essa zona é caracterizada por uma ocupação mista, com predominância residencial, mas com admissão de uma ampla gama de atividades comerciais, de serviços e industriais de baixo a médio impacto.

Os parâmetros urbanísticos da ZR-4 refletem essa vocação urbana intermediária. Os lotes devem possuir área mínima de 250 m² com Área Total Máxima de Edificação (ATME) de até 120% da área do terreno, Área Livre Mínima do Lote (ALML) de 40%, afastamento frontal mínimo de 3 m e gabarito máximo de quatro pavimentos. Esses parâmetros são incompatíveis com a implantação direta de plantas industriais de grande porte.

No entanto, a ZR-4 admite uma variedade significativa de usos não residenciais, incluindo comércio varejista e atacadista, serviços locais e diversificados, instituições e indústrias não incômodas (I1) e toleradas (I2). Destacam-se, entre os usos permitidos, atividades relacionadas ao comércio de materiais de grande porte, produtos agropecuários, máquinas, equipamentos, metais, materiais elétricos e hidráulicos, além de serviços e equipamentos institucionais.

Do ponto de vista do cluster portuário de hidrogênio verde, a ZR-4 não se apresenta como área adequada para a implantação direta da planta industrial principal, mas desempenha papel relevante como território de suporte urbano e logístico, podendo abrigar atividades complementares, serviços especializados, centros administrativos, bases de apoio, oficinas, comércio técnico e equipamentos institucionais associados ao empreendimento.

De forma complementar, a Zona de Proteção Ambiental 2 (ZPA-2) também está presente no entorno imediato da poligonal portuária e em algumas áreas dentro do porto. Essa zona abrange áreas de terra firme e de proteção às bacias hidrográficas, lagos, lagoas, manguezais, igarapés, rios e demais áreas sujeitas à inundação por marés, sendo considerada de preservação ambiental todo o seu interior e uma faixa adicional de 50 metros a partir das margens dos corpos hídricos. Trata-se, portanto, de uma zona que atua como elemento estruturador de transição entre o espaço urbano-industrial e os sistemas naturais que conformam a paisagem costeira e estuarina da Baía de São Marcos.

A ZPA-2 impõe restrições claras à ocupação do solo, exigindo que quaisquer projetos de edificação, reforma ou intervenção sejam submetidos à apreciação conjunta da Secretaria Municipal de Urbanismo e de órgãos ambientais estaduais e federais competentes. A legislação estabelece, entre outros parâmetros, a obrigatoriedade de afastamento mínimo de 50 metros em relação às margens de cursos d'água, a manutenção de, no mínimo, 75% de cobertura arbóreo-vegetal na faixa não edificável e a vedação de obras que comprometam o livre escoamento das águas. São admitidos apenas usos de baixo impacto, prioritariamente voltados à recreação, ao lazer público e a atividades compatíveis com a preservação ambiental, o que restringe significativamente a implantação de novas estruturas industriais nessas áreas.

Do ponto de vista do estudo de viabilidade do cluster portuário de hidrogênio verde, a presença da ZPA-2 não inviabiliza o projeto, mas delimita com precisão os espaços aptos à implantação de novas infraestruturas. As áreas diretamente inseridas na poligonal portuária permanecem sob competência do PDZ e do licenciamento ambiental portuário, enquanto as faixas enquadradas como ZPA-2 funcionam como zonas de amortecimento ambiental, onde intervenções devem ser evitadas ou rigorosamente condicionadas.

A Tabela 8.1.2.1.1 apresenta uma síntese dos parâmetros urbanísticos e dos usos permitidos nas zonas que incidem sobre a área do Porto do Itaquí e sua retroárea imediata.

Tabela 8.1.2.1.1: Síntese dos parâmetros urbanísticos e dos usos permitidos nas zonas incidentes

Aspecto	Zona Industrial 3 (ZI-3)	Zona Residencial 4 (ZR-4)	Zona de Proteção Ambiental 2 (ZPA-2)
Abrangência territorial	Poligonal portuária e retroárea	Retroárea	Poligonal portuária e retroárea
Competência predominante	PDZ (ordenamento funcional e operacional)	Planejamento urbano municipal (Plano Diretor e Zoneamento) Residencial mista, com	Planejamento urbano municipal e órgãos ambientais
Vocação principal	Industrial pesada, logística portuária e energética	atividades comerciais, serviços e industriais de baixo a médio impacto	Preservação ambiental, proteção de recursos hídricos e áreas sensíveis
Área mínima do lote	10.000 m ²	250 m ²	Não aplicável
Testada mínima	50 m	10 m	Não aplicável
Área Total Máxima de Edificação (ATME)	30% (indústrias poluentes) / 45% (demais usos)	120% da área do lote	Edificações não permitidas, salvo exceções condicionadas
Área Livre Mínima do Lote (ALML)	80% (indústrias poluentes) / 70% (demais usos)	40%	Mínimo de 75% de cobertura arbóreo-vegetal na faixa não edificável
Afastamento frontal mínimo	20 m	3 m	50 m das margens de cursos d'água; 15 m apenas para vias de acesso
Gabarito máximo	Não especificado (condicionado à análise)	4 pavimentos	Não aplicável
Exigências ambientais	Obrigatória apresentação de RIMA e análise conjunta com outros órgãos.	Sujeita ao licenciamento ambiental conforme porte e impacto da atividade	Licenciamento ambiental obrigatório; análise conjunta por órgãos ambientais; vedação de obras que comprometam o escoamento hídrico
Usos industriais permitidos	I1, I2, I3 e I4 (inclui indústrias incômodas e perigosas, químicas, metalúrgicas, combustíveis e lubrificantes)	I1 e I2 (indústrias não incômodas e toleradas)	Não permitidos

Outros usos permitidos	Institucional local (E1)	Residencial, comércio varejista e atacadista (C1, C2, C3), serviços locais e diversificados (S1, S2), institucional (E1, E2, E3)	Comércio diversificado (C2) e comércio de consumo no local/diversões (C2.2), desde que compatíveis com a preservação ambiental
Compatibilidade com planta industrial de hidrogênio	Alta – compatível com plantas industriais de grande porte	Baixa – não compatível para planta principal; adequada para usos de apoio	Inexistente – área imprópria para implantação industrial
Papel no cluster de hidrogênio verde	Implantação da planta industrial, tancagem e infraestrutura portuária	Suporte urbano, serviços técnicos, comércio especializado, apoio logístico e institucional	Zona de proteção e amortecimento ambiental, limitando a expansão física

Fonte: elaboração própria

No âmbito do planejamento urbano municipal, o PDM de São Luís estabelece diretrizes ambientais que definem áreas de proteção ambiental, zonas sensíveis e condicionantes ao uso e à ocupação do solo. Essas diretrizes têm como objetivo compatibilizar o desenvolvimento urbano e econômico com a preservação dos sistemas naturais, considerando elementos como corpos hídricos, manguezais, áreas de recarga aquífera, remanescentes de vegetação nativa e zonas sujeitas a riscos ambientais.

Nesse contexto, a implantação de atividades industriais e de infraestrutura energética está condicionada à obtenção das licenças ambientais cabíveis, conforme a legislação federal, estadual e municipal. O Plano Diretor explicita que empreendimentos potencialmente poluidores ou de significativo impacto ambiental devem ser submetidos a processos formais de licenciamento, podendo ser exigidos estudos ambientais compatíveis com sua tipologia e porte, como Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (EIA/RIMA) ou estudos equivalentes.

Essas condicionantes dialogam com os aspectos já abordados na caracterização da composição natural do Porto do Itaqui, que evidenciou a presença de ecossistemas sensíveis e áreas de proteção ambiental. Desse modo, embora o arcabouço urbanístico e ambiental não inviabilize a implantação de uma planta de hidrogênio verde, ele impõe exigências técnicas, ambientais e locacionais. O atendimento a essas restrições constitui não apenas uma obrigação legal, mas também um elemento estratégico para assegurar a viabilidade ambiental, institucional e social do empreendimento no longo prazo.

8.1.2.2. PLANO DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO

O Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto do Itaqui constitui o principal instrumento de ordenamento do território portuário, responsável por disciplinar o uso, a ocupação e a expansão das áreas sob jurisdição da autoridade portuária. Elaborado em 2021 pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) em atendimento às

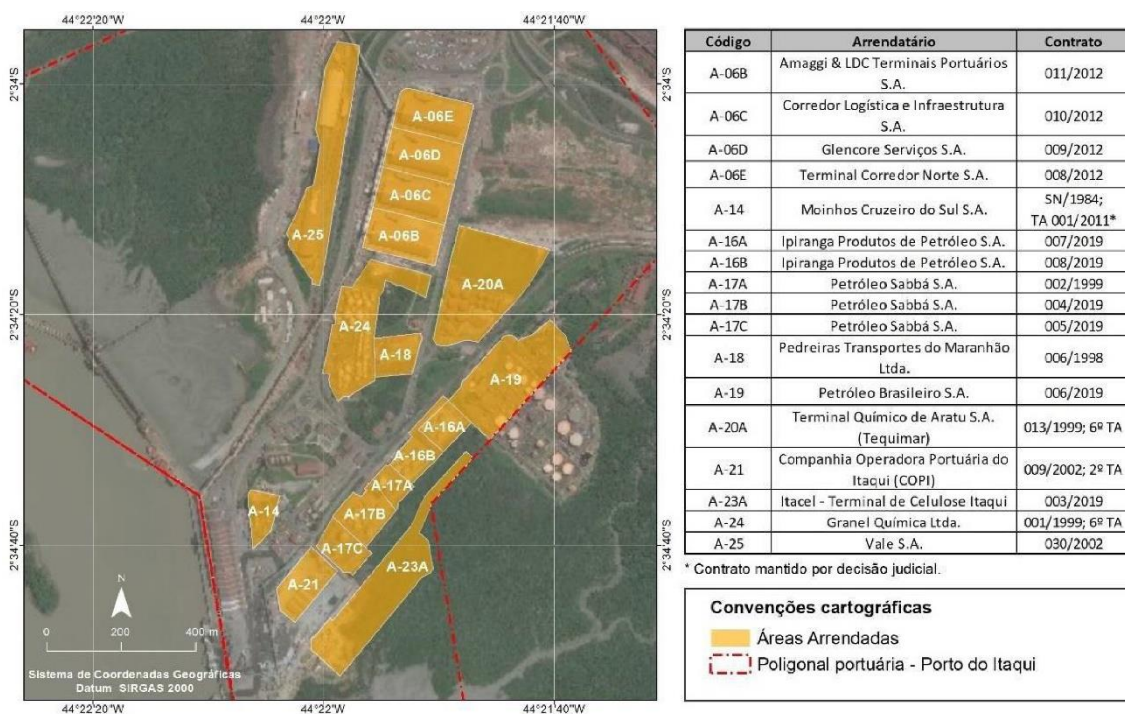
diretrizes da Secretaria Nacional de Portos e Transportes Aquaviários, o PDZ foi desenvolvido com base no Plano Mestre do Complexo Portuário do Itaqui e em estudos socioambientais, operacionais e de demanda, adotando um horizonte de planejamento de curto, médio e longo prazo (EMAP, 2019).

O PDZ tem como finalidade orientar o desenvolvimento físico, funcional e ambiental do porto organizado, assegurando a compatibilização entre eficiência logística, expansão da capacidade operacional, sustentabilidade ambiental e integração entre porto e cidade. Para tanto, o plano estabelece o zoneamento interno do porto, definindo áreas destinadas a usos específicos — como operação portuária, armazenagem, apoio logístico, circulação de cargas, infraestrutura energética e serviços — bem como áreas com restrições de uso em função de condicionantes ambientais, operacionais ou de segurança. Esse zoneamento constitui a base para a avaliação da disponibilidade de áreas aptas à implantação de novas instalações.

No contexto do estudo de caso, o PDZ é o instrumento mais importante na análise da viabilidade territorial do cluster portuário de hidrogênio verde. A partir dessa norma, é possível avaliar a disponibilidade física de áreas, a adequação funcional dos usos propostos e o alinhamento do projeto às diretrizes de modernização, diversificação de cargas e descarbonização das atividades portuárias previstas no planejamento oficial.

O PDZ é um instrumento estratégico para a atração de novos empreendimentos alinhados à vocação portuária. No cenário atual, o porto apresenta uma combinação de áreas ocupadas, áreas livres não operacionais e áreas *greenfield* e *brownfield* destinadas à expansão, o que confere flexibilidade territorial para projetos de médio e grande porte.

Figura 8.1.2.2.1: Áreas arrendadas



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

De acordo com o PDZ, o Complexo Portuário do Itaqui possui aproximadamente 499.207 m² de áreas arrendadas, ocupadas por 17 contratos em vigor, além de 4 contratos de passagem, que utilizam cerca de 16.921 m², principalmente para sistemas dutoviários e correias transportadoras. Esse conjunto corresponde a cerca de 71,6% das áreas destinadas às operações portuárias, evidenciando um elevado grau de ocupação funcional, porém ainda com margens relevantes para reorganização e expansão (EMAP, 2021).

O plano também reconhece a existência de áreas *greenfield* projetadas para expansão futura, especialmente orientadas à implantação de novos terminais e arrendamentos voltados à movimentação de granéis líquidos e sólidos.

Figura 8.1.2.2.2: Áreas arrendáveis



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

O Plano de Descarbonização do Porto do Itaqui (2025) atualizou esse quadro ao indicar que as áreas IQI-03, IQI-11 e IQI-12 encontram-se atualmente arrendadas pela empresa Santos Brasil, consolidando sua destinação para operações associadas à movimentação e

à armazenagem de granéis líquidos e produtos energéticos. Adicionalmente, a área IQI-13 passou a ser arrendada pelo Terminal Químico de Aratu (TEQUIMAR),

A tabela a seguir resume os principais aspectos das áreas arrendadas e arrendáveis do Porto do Itaquí. A síntese apresentada permite comparar a vocação operacional das áreas, sua condição de ocupação, as conexões logísticas existentes e os condicionantes ambientais e urbanísticos aplicáveis.

Tabela 8.1.2.2.1: Síntese da situação das áreas no Porto de Itaquí

Nome da área	Área (m²)	Situação atual	Tipo de área	Destinação operacional preferencial	Potencial estratégico
IQI 12	34.183,00	Arrendada (Santos Brasil)	Ocupada	Granéis líquidos (combustíveis e químicos)	Muito alto – novos terminais líquidos
IQI 13	32.078,00	Arrendada (TEQUIMAR)	Ocupada	Granéis líquidos (combustíveis e químicos)	Muito alto – novos terminais líquidos
A-02C	80.836,25	Livre	<i>Greenfield</i>	Granéis sólidos e líquidos	Alto – flexibilidade operacional
A-03A	39.228,60	Livre	<i>Greenfield</i>	Granéis líquidos	Alto
A-07	4.396,84	Livre	<i>Greenfield</i>	Granéis líquidos e/ou carga geral	Médio
A-09	21.272,77	Livre	<i>Greenfield</i>	Granéis sólidos minerais	Médio
A-13	23.095,64	Livre	<i>Greenfield</i>	Granéis sólidos	Médio
A-15A	29.720,03	Livre	<i>Greenfield</i>	Granéis sólidos vegetais e carga geral	Médio
IQI 03	25.416,00	Arrendada (Santos Brasil)	<i>Brownfield</i>	Granéis líquidos (diesel, gasolina, etanol, biodiesel)	Muito alto – tancagem existente
IQI 11	33.217,00	Arrendada (Santos Brasil)	<i>Brownfield</i>	Petróleo e derivados	Muito alto – planta consolidada
A-06B	40.327,00	Arrendada (Amaggi/LDC – TEGRAM)	Ocupada	Granéis sólidos vegetais	Alto
A-06C	40.327,00	Arrendada (Corredor Logística – TEGRAM)	Ocupada	Granéis sólidos vegetais	Alto
A-06D	40.327,00	Arrendada (Glencore – TEGRAM)	Ocupada	Granéis sólidos vegetais	Alto
A-06E	40.327,00	Arrendada (Terminal Corredor Norte – TEGRAM)	Ocupada	Granéis sólidos vegetais	Alto
A-14	8.279,00	Arrendada (Moinhos Cruzeiro do Sul)	Ocupada	Granéis sólidos vegetais	Baixo
A-18	11.930,68	Arrendada (Pedreiras Transportes)	Ocupada	Carga geral	Médio
A-19	43.404,44	Arrendada (Petrobras)	Ocupada	Petróleo e derivados	Alto
A-20A	52.408,38	Arrendada (Tequimar)	Ocupada	Granéis líquidos	Alto
A-21	16.000,00	Arrendada (COPI)	Ocupada	Granéis sólidos e carga geral	Médio
A-23A	53.545,00	Arrendada (ITACEL)	Ocupada	Carga geral (celulose)	Médio

Nome da área	Área (m ²)	Situação atual	Tipo de área	Destinação operacional preferencial	Potencial estratégico
A-24	44.105,04	Arrendada (Granel Química)	Ocupada	Granéis líquidos	Alto
A-25	53.600,00	Arrendada (Vale S.A.)	Ocupada	Granéis sólidos minerais / pátio ferroviário	Alto

Fonte: elaboração própria

A área A-02C (80.836,24 m²) é descrita no PDZ como área arrendável com destinação preferencial para granéis sólidos e líquidos. Em termos funcionais, isso é decisivo: o PDZ já reconhece essa área como zona de vocação líquida, isto é, com lógica territorial e operacional compatível com produtos energéticos, infraestrutura de dutos, parque de tancagem e berços especializados — exatamente o tipo de suporte que uma cadeia de amônia verde e biocombustíveis e, em menor escala, hidrogênio, exige (EMAP, 2021).

Assim, a partir da análise do PDZ, observa-se que o melhor encaixe para eletrolisadores e indústria de subprodutos tende a ser a A-02C, por três razões práticas:

- Área maior e mais flexível: por admitir sólidos e líquidos, a A-02C oferece maior margem de layout para módulos de eletrólise, subestação, sistema de água (tratamento/desmineralização), compressores/segurança, utilidades e áreas de expansão por fases. Em clusters de H₂, essa folga espacial diminui o custo de rearranjos e facilita o crescimento por módulos.
- Menor dependência imediata de tancagem: a produção por eletrólise pode operar com estocagem tampão (curto prazo) e direcionar o vetor principal para a síntese ou para carregamento. A A-02C funciona bem como plataforma industrial do sistema.
- Compatibilização mais direta com segurança de processo: áreas maiores facilitam o atendimento de distâncias de separação internas (unidades, rotas, barreiras, zonas classificadas), o que pesa especialmente se houver conversão para derivados ou compressão.

A leitura dos instrumentos de planejamento urbano (Plano Diretor Municipal e Lei de Zoneamento) e do Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto do Itaquí comprova que a viabilidade locacional do projeto decorre da complementaridade de competências entre cidade e porto. Enquanto o PDM e a Lei de Zoneamento disciplinam a retroárea, estabelecendo parâmetros urbanísticos, usos compatíveis e áreas de proteção ambiental, o PDZ define com precisão as áreas afetas às operações portuárias, sua vocação logística e energética, bem como as condições de arrendamento e expansão industrial.

Nesse contexto, o recorte formado pela área A-02C consolida-se como mais aderente à implantação do projeto na poligonal do porto, por reunir vocação operacional para granéis líquidos e energia, disponibilidade territorial para implantação faseada e conectividade direta com berços e sistemas dutoviários. A inserção do empreendimento em um ambiente costeiro sensível, com incidência de ZPA2 e APPs, não representa impedimento, mas

estabelece condicionantes claras: o núcleo industrial e a tancagem devem localizar-se fora das faixas ambientalmente protegidas, enquanto estas devem ser tratadas como áreas de amortecimento, drenagem e compensação ambiental, com licenciamento e soluções técnicas compatíveis com produtos energéticos.

A retroárea também se configura como ambiente possível para implantação de outras indústrias vinculadas ao cluster, como a produção de derivados do hidrogênio. Assim, a análise conjunta do PDM e do PDZ confirma que o Porto do Itaqui dispõe de base normativa compatível com a implantação do cluster, desde que observadas as exigências urbanísticas e ambientais vigentes.

8.1.3. DEMANDA DE MERCADO

A demanda de mercado constitui o compromisso efetivo de consumo do vetor energético produzido. O termo de mercado refere-se aos acordos ou à perspectiva concreta de aquisição do produto por parte de usuários finais — industriais, energéticos ou logísticos — assegurando previsibilidade de demanda, redução de riscos econômicos e viabilidade financeira ao empreendimento. Diferentemente de análises genéricas de mercado, a abordagem de mercado permite vincular a produção de hidrogênio verde a usos territoriais específicos, ancorados em cadeias produtivas existentes ou em processos de transição energética já em curso.

A adoção desse conceito no projeto do cluster justifica-se pela natureza intensiva em capital da produção de hidrogênio por eletrólise e pela necessidade de estabilidade operacional de longo prazo. Projetos internacionais bem-sucedidos demonstram que a viabilidade econômica do hidrogênio verde depende menos do potencial técnico isolado e mais da existência de consumidores ancorados, capazes de absorver volumes contínuos e de internalizar o vetor energético em seus processos produtivos (IRENA, 2021; UNIDO, 2023).

No presente estudo, a análise da demanda de mercado é conduzida a partir de duas óticas complementares: a ótica intraportuária, considerando o próprio Porto do Itaqui como consumidor direto e estruturante da demanda, em especial no âmbito de sua estratégia de descarbonização; e a ótica da retroárea e do entorno industrial. Essa dupla abordagem corrobora para que o porto atue simultaneamente como nó logístico, consumidor âncora e indutor de novas cadeias produtivas.

A. PORTO DO ITAQUI

Sob a primeira ótica, o Porto do Itaqui configura-se como o principal demandante inicial de hidrogênio verde e derivados, em função do volume de emissões associado às suas operações e da existência de um compromisso institucional explícito com a descarbonização. O Plano de Descarbonização do Porto estabelece metas progressivas de redução de emissões de gases de efeito estufa, alinhadas às diretrizes nacionais e internacionais de transição energética, reconhecendo que a atividade portuária, embora

estratégica do ponto de vista logístico, é intensiva em consumo energético e combustíveis fósseis.

De acordo com o Inventário de Emissões de GEE, no ano de 2022 o Porto do Itaquí foi responsável pela emissão de aproximadamente 189 ktCO₂, valor que expressa a relevância climática de suas atividades no contexto regional e nacional. Desse total, 82 ktCO₂ são atribuídas diretamente à atividade portuária propriamente dita, incluindo as emissões associadas à permanência dos navios atracados em berço, às operações internas de movimentação de cargas, ao uso de equipamentos portuários e à frota operacional sob responsabilidade da autoridade portuária. As 107 ktCO₂ restantes correspondem às operações de navegação, fundeio e manobras das embarcações, confirmando o peso significativo das atividades marítimas associadas ao porto no balanço total de emissões. A Figura 8.1.3.1 apresenta os dados de emissões.

Figura 8.1.3.1: Resultados da pegada de carbono do Porto de Itaquí 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: Plano de Descarbonização do Porto do Itaquí, 2025

Em termos relativos, a atividade portuária do Itaquí apresenta uma intensidade média de emissão de 5,63 kgCO₂ por tonelada de carga movimentada, indicador que reforça a necessidade de intervenções para a redução da pegada de carbono das operações. Esse valor está diretamente relacionado à elevada dependência de combustíveis fósseis, especialmente óleo diesel e óleo combustível marítimo, utilizados tanto nos equipamentos portuários quanto nas embarcações durante atracação e operações auxiliares (EMAP, 2024).

A análise dos dados evidencia que parcela significativa das emissões sob governabilidade do porto está concentrada nos Escopos 1 e 2, associados, respectivamente, ao consumo direto de combustíveis em fontes móveis e estacionárias e ao consumo de energia elétrica. Entre as principais fontes emissoras destacam-se os equipamentos de movimentação de

granéis, veículos operacionais internos, geradores auxiliares, embarcações de apoio e sistemas de suporte às operações portuárias. Embora o Escopo 3 concentre emissões expressivas relacionadas à cadeia logística ampliada, o Plano de Descarbonização prioriza ações nos escopos diretamente controláveis, onde a substituição tecnológica pode ser implementada de forma mais imediata e eficaz.

Nesse contexto, o hidrogênio verde e seus derivados são reconhecidos como vetores energéticos estratégicos para a redução dessas emissões. O Plano de Descarbonização aponta, de forma explícita, a necessidade de substituir progressivamente os combustíveis fósseis utilizados nas operações portuárias por alternativas de baixo carbono (EMAP, 2024), destacando:

- a aplicação de hidrogênio, amônia ou combustíveis sintéticos em equipamentos portuários pesados;
- o uso de HVO e e-combustíveis produzidos a partir de hidrogênio verde como solução de transição, permitindo redução imediata de emissões sem substituição integral da frota;
- a eletrificação híbrida associada a sistemas baseados em hidrogênio; e
- a preparação da infraestrutura portuária para atendimento futuro a embarcações com propulsão alternativa.

Dessa forma, antes mesmo de considerar mercados externos ou consumidores industriais na retroárea, o Porto do Itaquí apresenta-se como consumidor âncora do hidrogênio verde, ancorado em metas institucionais de descarbonização, em volumes relevantes de consumo energético e em uma base operacional compatível com a adoção de novos combustíveis.

Além da autoridade portuária enquanto consumidora direta, o Porto do Itaquí abriga um conjunto diversificado de terminais e operadores industriais cujas atividades apresentam elevado consumo energético e uso intensivo de combustíveis fósseis, especialmente em operações de movimentação, armazenagem, aquecimento, bombeamento e transporte interno. Esse perfil confere ao complexo portuário um potencial imediato de demanda cativa para hidrogênio verde, amônia, HVO e outros combustíveis sintéticos de baixo carbono.

De acordo com o PDZ, predominam no porto operações associadas a granéis líquidos energéticos, granéis sólidos minerais, granéis vegetais e carga geral, com forte presença de empresas dos setores de combustíveis, química, mineração, agronegócio e celulose. Esses setores são internacionalmente reconhecidos como setores com maior maturidade tecnológica e regulatória para a adoção do hidrogênio e seus derivados em estratégias de descarbonização industrial e logística (UNIDO, 2023).

No caso específico do Itaquí, a proximidade física entre berços especializados, parques de tancagem, dutovias e áreas industriais cria condições técnicas favoráveis para o uso compartilhado de infraestrutura energética, reduzindo custos de adaptação e facilitando a

transição gradual dos combustíveis convencionais para alternativas de baixo carbono, conforme previsto no Plano de Descarbonização (EMAP, 2025).

A tabela a seguir apresenta os principais terminais e operadores instalados no porto, destacando sua localização, características operacionais e a vocação potencial para consumo de hidrogênio verde ou derivados, seja no curto, médio ou longo prazo.

Tabela 8.1.3.1: Terminais e indústrias instalados no Porto do Itaquí e potencial de demanda de mercado

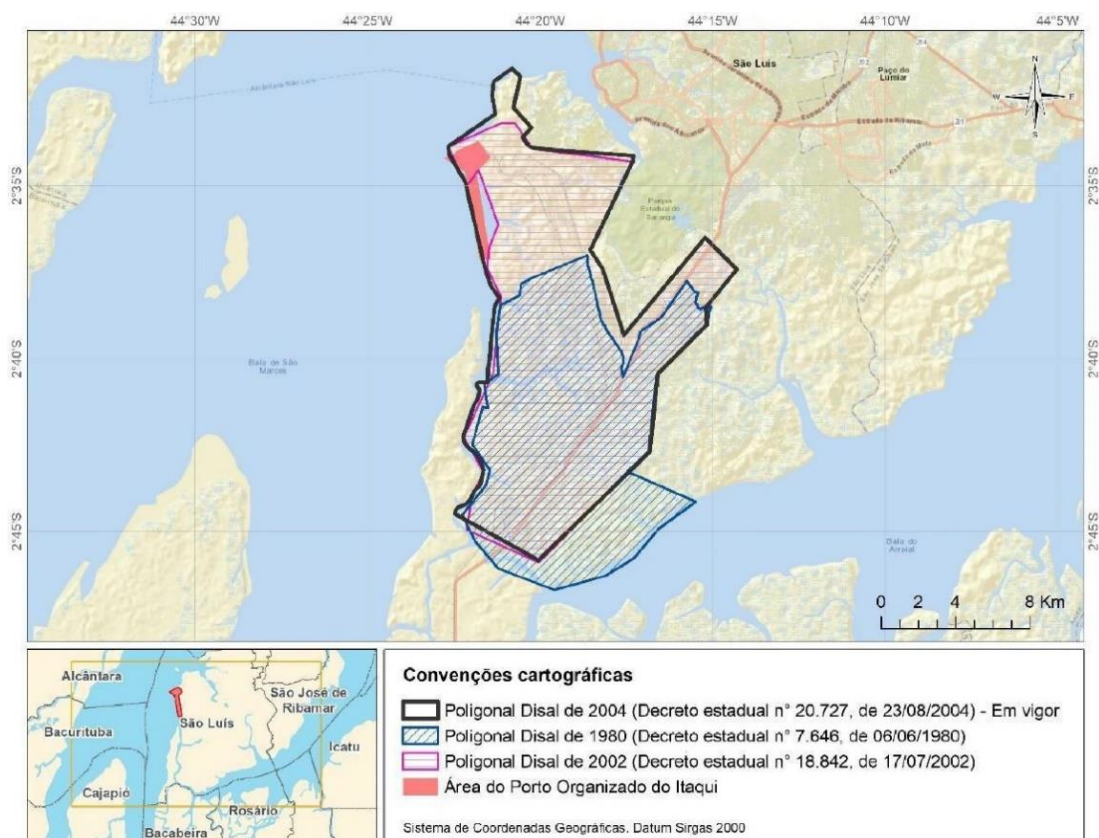
Empresa / Terminal	Tipo de operação	Localização no porto (PDZ)	Perfil energético predominante	Vocação para consumo de H₂ verde e derivados
Transpetro (Petrobras)	Armazenagem e movimentação de combustíveis e GLP	Áreas A-19 / Berços líquidos	Diesel, óleo combustível, GLP, energia elétrica	Alta – uso potencial de H ₂ em sistemas auxiliares, substituição de diesel por HVO e futura adaptação de dutos
Tequimar (Terminal Químico)	Granéis líquidos químicos e combustíveis	Área A-20A / Berços 104, 106 e 108	Diesel, energia térmica e elétrica	Alta – forte aderência metanol verde e H ₂ como insumo energético e logístico
Granel Química Ltda.	Produtos químicos e combustíveis	Área A-24	Combustíveis fósseis líquidos	Alta – compatibilidade com derivados do hidrogênio e uso de dutos dedicados
Ipiranga Produtos de Petróleo	Armazenagem e distribuição de combustíveis	Área A-16 (IQI 03)	Diesel, gasolina, etanol	Média–Alta – potencial para substituição por HVO e e-combustíveis
Petróleo Sabbá S.A.	Combustíveis e derivados	Área A-17 (IQI 11)	Diesel, gasolina, biodiesel	Média–Alta – vocação para combustíveis sintéticos e blends de baixo carbono
Vale S.A.	Granéis sólidos minerais (cobre)	Área A-25 / integração ferroviária	Diesel, eletricidade	Média – potencial indireto via descarbonização logística e uso de H ₂ em equipamentos
TEGRAM (Amaggi, Glencore, Corredor Norte, TCN)	Granéis sólidos vegetais	Áreas A-06 B a E	Diesel, eletricidade	Média – uso inicial de HVO e, no longo prazo, H ₂ em equipamentos pesados
ITACEL (Celulose)	Carga geral – celulose	Área A-23	Diesel, energia elétrica	Média – potencial para H ₂ em logística interna e operações portuárias
Pedreiras Transportes	Carga geral	Área A-18	Diesel	Baixa–Média – transição via HVO e eletrificação
Autoridade Portuária (EMAP)	Operação e gestão portuária	Áreas comuns	Diesel, eletricidade	Muito alta – principal demanda âncora para descarbonização das operações

Fonte: elaboração própria

B. RETROÁREA

No contexto da análise da retroárea do Porto do Itaqui, o Distrito Industrial de São Luís (DISAL) destaca-se como um dos principais elementos estruturantes do território. A existência de um distrito industrial, contíguo ao complexo portuário e diretamente conectado aos sistemas ferroviário, rodoviário e dutoviário, constitui um fator decisivo para a identificação de demanda para hidrogênio verde e de seus derivados, uma vez que concentra indústrias intensivas em energia, insumos químicos e logística pesada.

Figura 8.1.3.2: Sobreposição dos limites do Disal (1980, 2002, 2004)



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

Criado originalmente em 1980, em área doada pela União ao Governo do Estado do Maranhão, o DISAL foi concebido como instrumento de ordenamento territorial voltado ao uso industrial na porção oeste do município de São Luís, região afastada da área central e estrategicamente destinada à promoção do desenvolvimento socioeconômico local e regional (EMAP, 2021). Desde então, o distrito passou por sucessivas revisões de perímetro, acompanhando a expansão das atividades portuárias e industriais associadas ao Porto do Itaqui e aos terminais adjacentes.

É importante destacar que a inclusão formal da infraestrutura terrestre do Porto do Itaqui na poligonal do DISAL ocorreu apenas a partir da revisão de 2002, enquanto a área aquática do Porto Organizado — excluindo os acessos aquaviários — foi incorporada na atualização de 2004. Essa evolução normativa mostra a integração entre o planejamento industrial estadual e a dinâmica portuária, consolidando o DISAL como suporte territorial

módulos industriais, cada qual com diretrizes específicas de uso e ocupação do solo, estabelecidas de forma a garantir a compatibilidade funcional entre as atividades portuárias, industriais e logísticas. Nesse contexto, destacam-se o Módulo H, o Módulo G e o Módulo F Norte, todos diretamente articulados às operações do Porto do Itaqui e aos Terminais de Uso Privado (TUPs).

- **Módulo H:** Área que abriga o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM) e o Terminal de Passageiros da Ponta da Espera, apresentando forte vocação para atividades portuárias e industriais associadas à cadeia mineral e logística.
Uso adequado: indústrias que recebam e/ou importem produtos por meio dos portos.
Uso tolerado: instalações para prestação de serviços de utilidade pública ao Distrito Industrial, tais como Correios, bancos, postos de assistência médica, Corpo de Bombeiros, além de atividades de apoio às operações industriais, como restaurantes, postos de combustíveis e armazéns.
Uso proibido: novas construções com fins exclusivamente residenciais, não integradas a projetos industriais ou localizadas fora de núcleos residenciais projetados.
- **Módulo G:** Área onde se encontra em implantação o Terminal Portuário de São Luís, com perfil voltado ao suporte industrial e logístico de menor escala.
Uso adequado: indústrias de pequeno e médio porte que recebam e/ou importem produtos por meio dos portos existentes.
Uso tolerado: instalações para prestação de serviços de utilidade pública ao Distrito Industrial, incluindo Correios, bancos, postos de assistência médica, Corpo de Bombeiros e atividades de apoio industrial, como restaurantes, postos de combustíveis e armazéns.
Uso proibido: novas construções com fins exclusivamente residenciais, não vinculadas a projetos industriais ou situadas fora de núcleos residenciais projetados.
- **Módulo F Norte:** Localizado no extremo sul da área do Porto, caracteriza-se pela capacidade de suporte a empreendimentos industriais de maior porte.
Uso adequado: indústrias diversificadas de pequeno, médio e grande porte, destinadas ao beneficiamento de minerais ferrosos e não ferrosos, bem como à implantação de refinaria de petróleo.
Uso tolerado: instalações para prestação de serviços de utilidade pública ao Distrito Industrial, como Correios, bancos, postos de assistência médica, Corpo de Bombeiros e atividades de apoio às operações industriais, incluindo restaurantes, postos de combustíveis e armazéns.
Uso proibido: novas construções com fins exclusivamente residenciais, não integradas a projetos industriais ou implantadas fora de núcleos residenciais projetados.

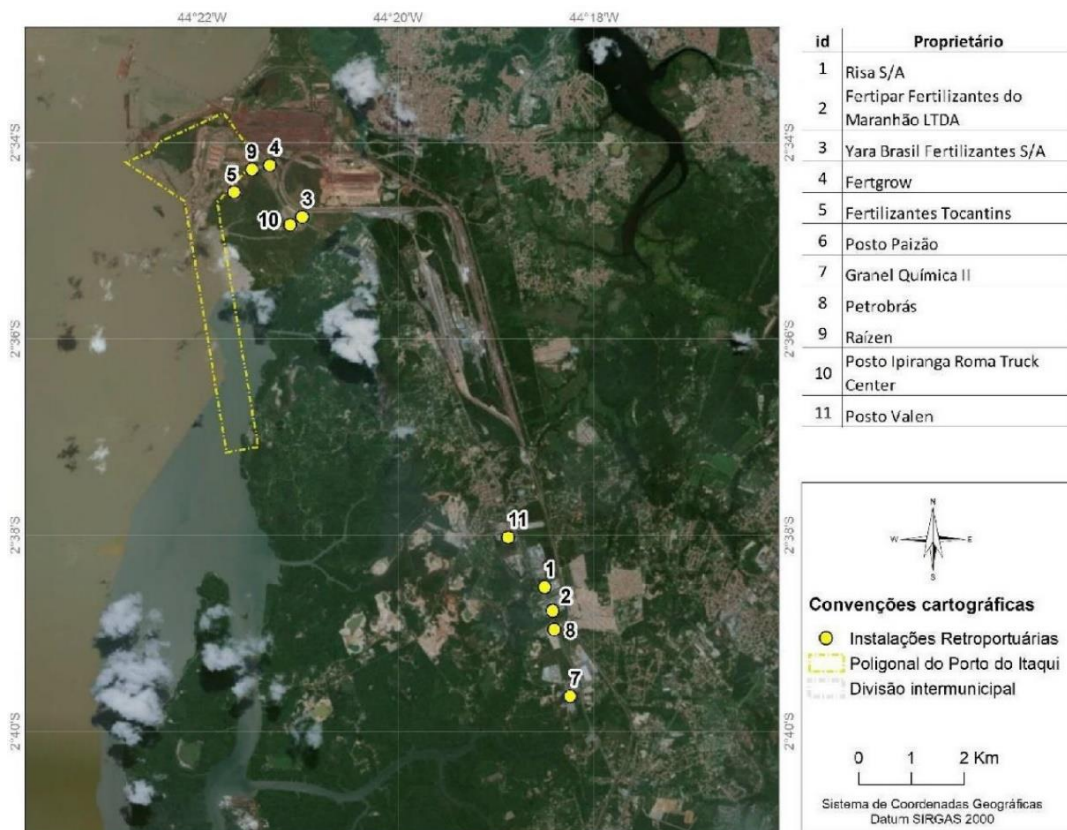
Nos últimos anos, o Governo do Estado do Maranhão tem promovido ações de modernização do DISAL, com foco na atração de investimentos privados, na geração de

empregos e na requalificação de áreas subutilizadas. Essas iniciativas concentram-se sobretudo na melhoria da infraestrutura de transporte e logística, bem como na reversão de lotes abandonados para a propriedade estadual, com vistas à sua reintrodução no mercado produtivo.

A retroárea estrutura-se, portanto, a partir de um conjunto de instalações industriais, logísticas e de armazenagem que complementam a área primária alfandegada do Porto Organizado. Esse sistema é composto por terminais de grânéis líquidos, instalações de fertilizantes, pátios logísticos e unidades industriais, localizados, sobretudo na área do DISAL. As instalações retroportuárias incluem áreas de armazenagem vinculadas aos terminais da Granel Química e da Petrobras, voltadas majoritariamente à estocagem e transferência de grânéis líquidos, além de terminais e plantas industriais de fertilizantes.

A dinâmica econômica da retroárea está fortemente associada à expansão do agronegócio na região do MATOPIBA, que tem impulsionado de forma significativa a demanda por fertilizantes. Como reflexo desse processo, o fertilizante consolidou-se como uma das principais cargas movimentadas pelo Porto do Itaqui. Esse crescimento sustenta a presença e a ampliação de diversas empresas de fertilizantes instaladas na retroárea, cujas operações compreendem armazéns, misturadoras, balanças rodoviárias e frotas de caminhões, formando um sistema produtivo fortemente dependente do porto.

Figura 8.1.3.4: Áreas retroportuárias



Fonte: Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itaqui, 2021

Entre as principais empresas que interagem diretamente com o Porto do Itaqui destacam-se a Fertilizantes Tocantins (NPK do Brasil), que passou por processo de ampliação em 2014 e se consolidou como uma das maiores fábricas de fertilizantes complexos da região; a Fertipar Fertilizantes do Maranhão, especializada em formulações com micronutrientes e fertilizantes nitrogenados; a Fertgrow, com forte integração às operações da COPI e elevada dependência de insumos importados; a Risa, que opera como importante hub regional de grãos, fertilizantes e defensivos; e a Yara Brasil Fertilizantes, empresa global com unidade misturadora estrategicamente localizada em São Luís.

Além das plantas industriais, a retroárea abriga uma rede de estruturas de apoio logístico, como pátios reguladores e postos de serviços, que desempenham papel essencial na fluidez das operações portuárias. O Posto Paizão, parceiro do Consórcio TEGRAM, destaca-se pela escala operacional, com capacidade para aproximadamente 550 vagas de carretas, atendendo principalmente cargas de grãos e fertilizantes. Outros equipamentos, como o Posto Ipiranga – Roma Truck Center e o Posto Valen, ainda que em menor escala, reforçam a função logística da retroárea.

Complementarmente, o novo terminal da Granel Química II, localizado fora da poligonal do Porto Organizado, amplia a capacidade de armazenagem de produtos químicos e derivados de petróleo, com capacidade estática de 52.570 m³, sendo interligado ao terminal interno do porto por meio de nove linhas dutoviárias, incluindo uma linha dedicada a nitrogênio.

A Tabela 8.1.3.2 sintetiza as principais unidades industriais, logísticas e de armazenagem que compõem esse território, destacando sua localização, o perfil energético predominante de suas operações e a vocação potencial para o consumo de hidrogênio verde e de seus derivados.

Tabela 8.1.3.2: Unidades industriais, logísticas e de armazenagem na retroárea

Empresa / Terminal	Tipo de operação	Localização (retroárea)	Perfil energético predominante	Vocação para consumo de H₂ verde e derivados
Fertilizantes Tocantins (NPK do Brasil)	Fabricação de fertilizantes complexos	Retroárea (≈14 km)	Energia elétrica, diesel	Amônia verde
Fertipar Fertilizantes do Maranhão Ltda.	Mistura e distribuição de fertilizantes	DISAL	Energia elétrica, diesel	Amônia verde
Fertgrow	Comércio e mistura de fertilizantes	DISAL	Energia elétrica, diesel	Amônia verde
Risa S/A	Armazéns gerais, grãos e fertilizantes	DISAL	Diesel, eletricidade	Amônia verde e HVO
Yara Brasil Fertilizantes S.A.	Produção e mistura de fertilizantes	DISAL	Energia elétrica, insumos químicos	Amônia verde
Cibra	Fabricação de adubos e fertilizantes	DISAL	Energia elétrica	Amônia verde

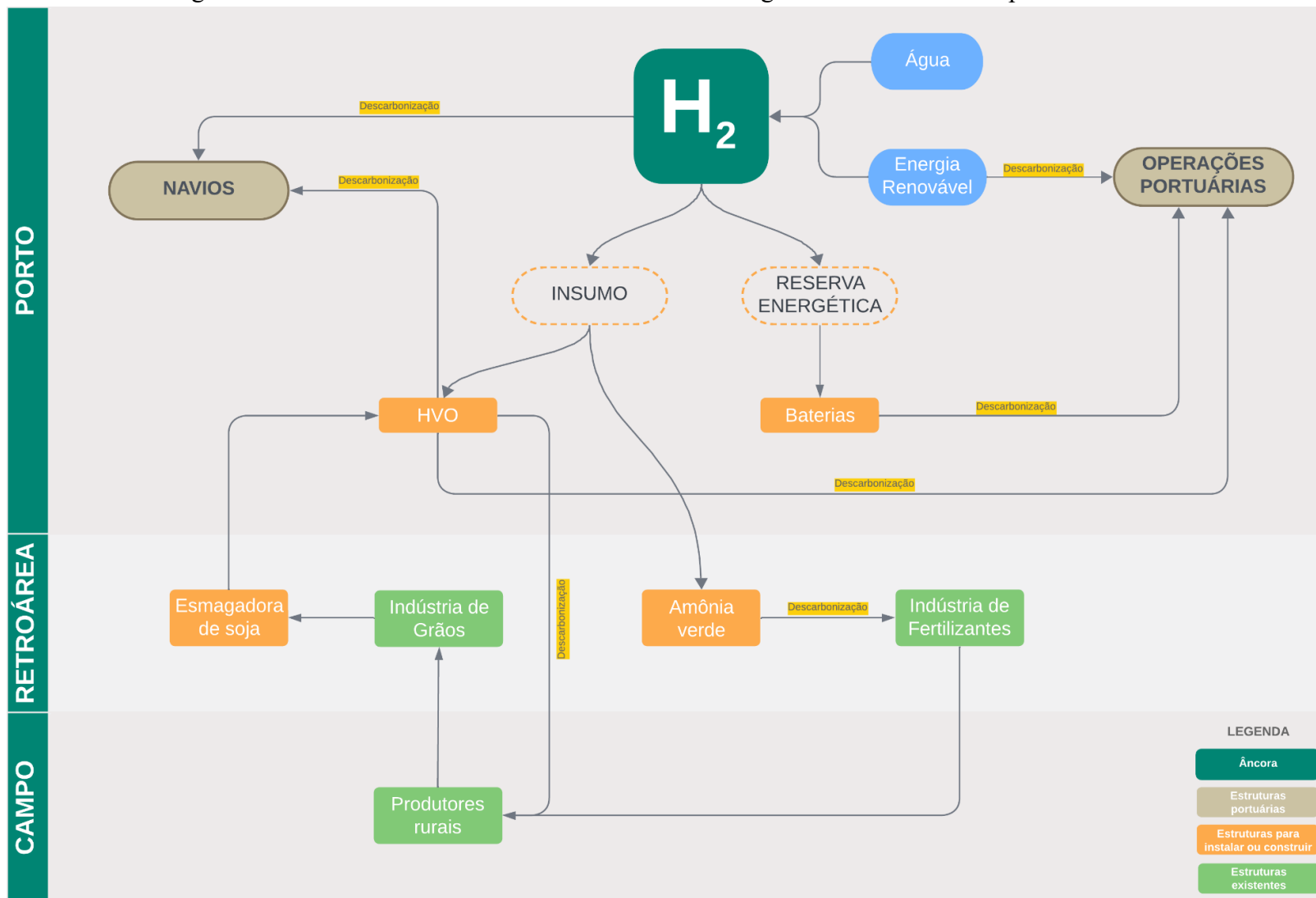
Empresa / Terminal	Tipo de operação	Localização (retroárea)	Perfil energético predominante	Vocação para consumo de H₂ verde e derivados
Mosaic Fertilizantes do Brasil Ltda.	Fertilizantes fosfatados e misturas	DISAL	Energia elétrica, insumos químicos	Amônia verde
A. de S. Pereira	Fabricação de fertilizantes	DISAL	Energia elétrica	Amônia verde
Comercial Bine	Fabricação de fertilizantes	DISAL	Energia elétrica	Amônia verde
WBO Souza	Fabricação de fertilizantes	DISAL	Energia elétrica	Amônia verde
Alquimia Produtos Químicos	Comércio atacadista de químicos	DISAL	Energia elétrica, combustíveis	HVO e H ₂ V
Granel Química II	Armazenagem de químicos e derivados	Retroárea	Energia elétrica, diesel	HVO e H ₂ V
Petrobras / terminais associados	Armazenagem de combustíveis	Retroárea	Derivados fósseis	HVO e H ₂ V
Raízen	Distribuição de combustíveis	Retroárea	Combustíveis líquidos	HVO
Posto Paizão / Pátio Regulador	Apoio logístico e triagem	Retroárea	Diesel	HVO
Posto Ipiranga – Roma Truck Center	Apoio logístico	Retroárea	Diesel	HVO
Posto Valen	Apoio logístico (implantação)	Retroárea	Diesel	HVO
Indústrias Blanco Ltda.	Fabricação de açúcar bruto	DISAL	Energia térmica e elétrica	H ₂ para processos térmicos
CDA – Cia. de Distribuição Araguaia	Produtos metálicos	DISAL	Energia elétrica	Uso indireto

Fonte: Elaboração própria

Concluída a caracterização dessas unidades, é possível construir um modelo síntese da demanda de mercado. Apresenta-se a seguir um esquema que articula porto, retroárea e campo a partir dos fluxos energéticos, produtivos e logísticos associados ao hidrogênio e a seus derivados. Embora o campo integre, em sentido amplo, a retroárea funcional do porto, optou-se por desagregá-lo no modelo conceitual por não se tratar da retroárea imediata, objeto direto dos instrumentos urbanos e portuários. Nesse contexto, o campo representa tanto a região produtiva mais distante — com destaque para o MATOPIBA — quanto áreas rurais do próprio entorno de São Luís, associadas à produção agroindustrial.

O diagrama evidencia as infraestruturas existentes (na cor verde), as estruturas a serem implantadas (na cor laranja) e as relações funcionais entre os diferentes elos da cadeia, permitindo visualizar o papel do porto como núcleo produtor e consumidor de hidrogênio, a retroárea como espaço de transformação industrial e o campo como origem e destino de insumos estratégicos. Essa representação consolida a viabilidade territorial da demanda de mercado e serve de base para o detalhamento apresentado nas seções subsequentes.

Figura 8.1.3.5: Síntese da demanda de mercado de hidrogênio verde no sistema porto–retroárea



Fonte: elaboração própria

A partir desse enquadramento, o esquema conceitual explicita como a demanda de mercado de hidrogênio verde se estrutura territorialmente no sistema porto–retroárea–campo, articulando produção energética, transformação industrial e consumo final. No núcleo do sistema, funcionando como âncora do projeto, o hidrogênio verde é produzido a partir da combinação entre água e energia renovável. A energia renovável, além de viabilizar a eletrólise, é também empregada diretamente na descarbonização das operações portuárias, reduzindo as emissões associadas a equipamentos, veículos operacionais e sistemas auxiliares

O hidrogênio produzido assume duas funções estratégicas complementares. A primeira é como **reserva energética**, sendo convertido em sistemas de armazenamento, como baterias, que retornam ao próprio porto para garantir maior segurança energética e estabilidade operacional, especialmente em atividades críticas. A segunda função é como **insumo industrial**, a partir do qual se estruturam cadeias produtivas de maior valor agregado, alinhadas às vocações econômicas do território.

Entre os principais derivados mapeados, destaca-se inicialmente o HVO (óleo vegetal hidrotratado), que desempenha papel fundamental na estratégia de descarbonização de curto e médio prazo. O HVO pode ser utilizado tanto nas operações portuárias quanto no transporte marítimo, contribuindo para a redução das emissões de navios atracados e em manobra, sem a necessidade imediata de substituição de frota. Paralelamente, esse combustível também se projeta como vetor de descarbonização no campo, sendo aplicável a máquinas agrícolas, equipamentos de transporte rural e cadeias logísticas associadas à produção agroindustrial.

A integração entre porto, retroárea e campo torna-se evidente na cadeia produtiva do HVO. A produção agrícola, especialmente de grãos oriundos do MATOPIBA e de áreas rurais do entorno de São Luís, alimenta a indústria de grãos localizada na retroárea portuária. Esses grãos seguem para uma planta de esmagamento de soja, estrutura ainda inexistente no território imediato e, portanto, identificada como uma infraestrutura a ser implantada, responsável pela produção do óleo vegetal que retorna ao sistema como insumo para a fabricação do HVO. Esse arranjo cria um circuito produtivo regionalizado, no qual o porto atua como âncora logística e energética.

Outro derivado estratégico é a amônia verde, cuja demanda se concentra principalmente na indústria de fertilizantes, localizada na retroárea ampliada do porto e fortemente conectada ao setor agropecuário regional. A substituição da amônia convencional por amônia verde permite descarbonizar a produção de fertilizantes, que retornam ao campo como insumos agrícolas de menor pegada de carbono, fechando um ciclo produtivo coerente com as metas climáticas nacionais e internacionais.

O esquema também evidencia o papel potencial do hidrogênio e de seus derivados na descarbonização do transporte marítimo. O HVO apresenta viabilidade imediata para uso em navios, enquanto o hidrogênio direto surge como alternativa de longo prazo, condicionado à evolução tecnológica das embarcações, à adaptação da frota e ao desenvolvimento de padrões regulatórios internacionais. Essa distinção temporal reforça

a importância de uma estratégia escalonada, na qual derivados líquidos assumem protagonismo inicial.

Do ponto de vista territorial, os elementos destacados em laranja no diagrama representam as estruturas que necessitam ser implantadas para viabilizar plenamente a cadeia do hidrogênio verde, como a planta de eletrólise, as unidades de produção de HVO e de amônia verde e a planta de esmagamento de soja. Em contraste, os elementos em verde correspondem às infraestruturas já existentes, como as indústrias de grãos, a indústria de fertilizantes e a base produtiva agropecuária, que funcionam como âncoras de demanda de mercado e reduzem os riscos associados à implantação do cluster.

Ao articular esses três espaços — porto, retroárea e campo — o modelo conceitual demonstra que a demanda de mercado de hidrogênio verde no Porto do Itaquí não depende exclusivamente de mercados externos, mas se ancora em consumos locais e regionais concretos, associados à descarbonização das operações portuárias, à transformação industrial e à produção agropecuária. Essa configuração reforça a viabilidade econômica do projeto, ao mesmo tempo em que evidencia seu alinhamento com as estratégias territoriais, logísticas e ambientais previamente analisadas.

8.2. AGREGAÇÃO DE VALOR

A etapa de agregação de valor inaugura o movimento de transição entre o reconhecimento das potencialidades territoriais e a construção de uma proposta de cluster portuário de hidrogênio verde. Diferentemente da fase anterior, de diagnóstico, esta etapa assume natureza propositiva ao organizar os elos produtivos, logísticos, institucionais e espaciais necessários à viabilização do projeto.

No caso do Itaquí, a agregação de valor permite compreender como as oportunidades identificadas podem ser articuladas em uma cadeia de negócios coerente, capaz de internalizar fluxos econômicos, induzir novas atividades produtivas e potencializar os efeitos territoriais positivos do empreendimento. Assim, esta etapa estabelece a base que orienta a elaboração da cadeia do hidrogênio verde, o desenho da atividade âncora e a organização das atividades secundárias e de apoio, consolidando o porto não apenas como nó logístico, mas como plataforma estratégica de agregação de valor, inovação e desenvolvimento urbano-regional sustentável.

8.2.1. CADEIA DE NEGÓCIO

A primeira etapa da agregação de valor consiste na identificação das atividades econômicas necessárias à implantação e ao funcionamento de um cluster portuário de hidrogênio verde, considerando a cadeia de negócios associada a esse vetor energético. Essa identificação foi realizada a partir da demanda potencial de mercado do hidrogênio verde e de seus derivados identificadas no capítulo anterior.

Para estruturar essa etapa, adotou-se a organização da cadeia de negócios nos quatro segmentos conceituais propostos por Yamashita (2024) — montante, âncora, jusante e apoio —, entendendo o cluster como um sistema produtivo integrado e interdependente. Cada um desses segmentos foi desdobrado internamente em categorias econômicas (produção primária, indústria, comércio e serviços), de modo a capturar a diversidade de atividades envolvidas ao longo da cadeia.

O segmento de montante abrange as atividades relacionadas ao fornecimento de insumos, equipamentos e serviços técnicos essenciais à implantação e operação da cadeia, incluindo engenharia, fabricação e manutenção de equipamentos, geração de energia renovável, infraestrutura elétrica e serviços especializados. A atividade âncora corresponde ao núcleo produtivo do cluster, representado pela planta de produção de hidrogênio verde, cujo processo central é a eletrólise da água a partir de fontes renováveis. O segmento jusante compreende as atividades de transformação e uso final do hidrogênio e de seus derivados, incorporando aplicações industriais e energéticas. Por fim, o segmento de apoio engloba as funções transversais necessárias ao funcionamento do cluster, tais como logística, transporte, armazenagem, certificação, pesquisa e desenvolvimento, capacitação de mão de obra, governança institucional, regulação e financiamento.

Com base nessa estrutura, procedeu-se à identificação dos códigos da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) correspondentes a cada atividade necessária ao cluster. A classificação foi realizada até o nível de subclasse, de forma a garantir maior precisão na caracterização da estrutura produtiva requerida. O resultado desse procedimento é a consolidação de uma cadeia de negócios formalizada em termos econômicos, que traduz o modelo conceitual do hidrogênio verde em um conjunto de atividades compatíveis com bases estatísticas e instrumentos de política pública.

Em seguida, a segunda etapa da agregação de valor consiste no confronto entre a cadeia de negócios formalizada em CNAEs e a estrutura econômica efetivamente existente no território. Para essa análise, utilizou-se a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), base administrativa de abrangência nacional que reúne informações declaradas pelos estabelecimentos empregadores, permitindo identificar a presença de atividades econômicas por CNAE e o número de estabelecimentos associados a cada uma delas.

Em função da forma de disponibilização dos dados da RAIS, o recorte territorial adotado foi o município de São Luís/MA, uma vez que a base não permite a desagregação por áreas específicas, como porto ou retroárea portuária. Esse recorte é considerado adequado ao objetivo da análise, pois São Luís concentra a maior parte das atividades econômicas, institucionais e logísticas relacionadas ao Porto do Itaqui, mesmo quando não fisicamente localizadas em sua área imediata.

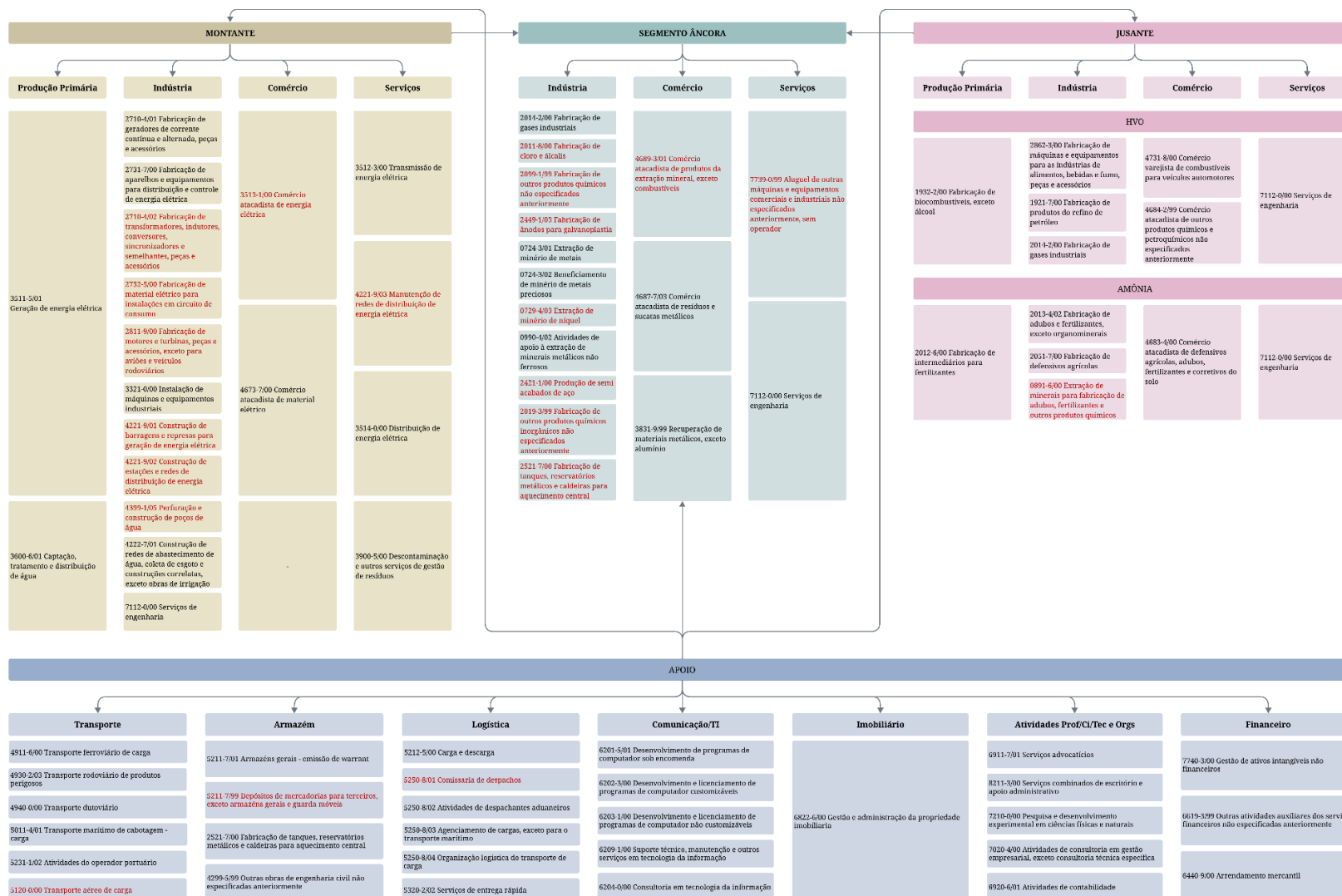
A partir da extração da lista de estabelecimentos por CNAE para o município, realizou-se o cruzamento entre as atividades econômicas existentes e os CNAEs previamente identificados como necessários à cadeia de negócios do hidrogênio verde. A vinculação das atividades da cadeia aos códigos CNAE cumpre dupla função metodológica. Por um

lado, permite traduzir a cadeia conceitual do hidrogênio verde em categorias econômicas formais, compatíveis com bases nacionais. Por outro, possibilita avaliar o grau de aderência entre a estrutura econômica existente no território e as atividades necessárias à consolidação do cluster, identificando elos já presentes, elos incipientes e lacunas produtivas que demandam indução por políticas públicas ou estratégias de atração de investimentos.

Os elos ausentes ou pouco representados indicam as lacunas para a consolidação do cluster e foram destacados graficamente na cadeia de negócios na cor vermelha. Esses elos não devem ser interpretados como fragilidades, mas como oportunidades para a atração de novas empresas, implantação de unidades industriais, fortalecimento de serviços especializados e indução de investimentos. Assim, o confronto entre a cadeia necessária e a estrutura existente constitui o principal instrumento de diagnóstico e orientação estratégica na etapa de agregação de valor.

A Figura 8.2.1.1 apresenta a cadeia de negócios do hidrogênio verde estruturada para o município de São Luís, onde se encontra o Porto de Itaqui, organizada nos segmentos de montante, âncora, jusante e apoio, com a identificação das atividades econômicas associadas a cada segmento segundo o CNAE e o destaque dos elos ausentes na estrutura produtiva.

Figura 8.2.1.1: Cadeia de Negócio do Hidrogênio Verde associada ao Porto de Itaquí



Fonte: elaboração própria

A partir do confronto entre a cadeia de negócios do hidrogênio verde e a estrutura econômica existente no município de São Luís, observa-se que o território concentra uma parcela significativa das atividades necessárias à consolidação do cluster portuário. Ainda que nem todos os elos estejam presentes, o resultado geral indica elevada aderência entre a base produtiva local e as demandas da cadeia, especialmente quando considerada a função logística, industrial e energética já desempenhada pelo município no contexto regional e nacional. A análise por eixo da cadeia permite compreender com maior precisão a natureza dos elos ausentes, sua relevância para a viabilidade do cluster e as estratégias necessárias para sua superação.

No segmento **montante**, verifica-se que a maior parte das atividades identificadas está presente no território, sobretudo nos campos de geração e distribuição de energia, engenharia, construção e serviços técnicos especializados. Os elos ausentes concentram-se principalmente em atividades industriais altamente específicas, relacionadas à fabricação de componentes, peças e equipamentos de elevada complexidade tecnológica. A ausência dessas atividades não compromete a viabilidade da cadeia, uma vez que se trata de segmentos com forte concentração produtiva em escala nacional ou internacional, cuja localização não depende necessariamente da proximidade com o porto. No que se refere à produção de energia, destaca-se que a política institucional do Porto do Itaqui prevê investimentos em fontes renováveis, o que indica que parte dos elos atualmente ausentes já possui previsão de implantação, reforçando a coerência entre o planejamento portuário e a estruturação do cluster.

No segmento **âncora**, observa-se que a maior parte das atividades ausentes está diretamente relacionada à produção do hidrogênio verde propriamente dita, em especial às etapas de eletrólise da água e aos equipamentos associados a esse processo. Essa ausência é esperada, uma vez que a planta de produção de hidrogênio ainda não se encontra implantada no território. Além disso, parte significativa dos equipamentos utilizados na eletrólise possui produção concentrada fora do país, o que explica a inexistência de determinadas subclasses industriais na estrutura econômica local. Assim, os elos faltantes no segmento âncora não representam fragilidade da cadeia, mas refletem o caráter indutor do projeto, cuja implantação introduz novas atividades no território.

No segmento **jusante**, a análise evidencia a presença da maioria das atividades necessárias à transformação e ao uso final do hidrogênio e de seus derivados. Tanto para a produção de HVO quanto para a produção de amônia, observa-se uma cadeia relativamente completa, com poucos elos ausentes. Esse resultado confirma a vocação industrial do território e a coerência com as demandas de mercado previamente identificadas, reforçando a viabilidade do cluster e sua capacidade de internalizar valor ao longo das etapas de processamento e uso dos derivados do hidrogênio verde.

Por fim, no segmento de **apoio**, a cadeia apresenta-se amplamente estruturada e diversificada. As atividades relacionadas a transporte, logística, armazenagem, serviços técnicos, engenharia, tecnologia da informação, atividades imobiliárias e serviços financeiros estão bem representadas no município. Esse resultado está diretamente

associado ao papel histórico de São Luís como centro logístico, industrial e energético, evidenciando que o território já dispõe das condições institucionais e operacionais necessárias para absorver novos investimentos de grande porte, como o cluster portuário de hidrogênio verde.

A análise evidencia que o território apresenta elevada aderência à proposta de implantação do cluster portuário de hidrogênio verde, uma vez que concentra a maior parte das atividades necessárias ao funcionamento da cadeia de negócios e dispõe de condições compatíveis com o porte do empreendimento. O mapeamento da cadeia e sua vinculação aos códigos CNAE existentes permitiram identificar os possíveis gargalos produtivos localizados sobretudo em elos industriais altamente especializados e nas atividades diretamente associadas à produção do hidrogênio, cuja ausência é inerente ao caráter indutor do projeto. Nesse sentido, a análise não apenas confirma a viabilidade do cluster, como também fornece subsídios concretos para a formulação de políticas de atração de investimentos e de encadeamento produtivo, orientadas à internalização gradual dos elos faltantes, à redução de dependências externas e ao fortalecimento da capacidade do território de capturar valor ao longo da cadeia do hidrogênio verde.

8.2.2. ATIVIDADE ÂNCORA

A atividade âncora estrutura-se a partir da implantação da planta de hidrogênio verde, concebida como o elemento central de articulação entre os sistemas energéticos, industriais e logísticos do território portuário. Trata-se do núcleo a partir do qual se organizam os fluxos de insumos, processos e produtos. Do ponto de vista infraestrutural, a planta de hidrogênio verde é composta por três sistemas principais, interdependentes e indissociáveis no processo produtivo:

- Sistema de coleta e tratamento de água para eletrólise, responsável por garantir o fornecimento contínuo de água em qualidade compatível com os requisitos dos eletrolisadores, incluindo as etapas de captação, pré-tratamento, purificação e adequação físico-química;
- Sistema de geração de energia renovável, constituído por parques solares e/ou eólicos, assegurando a origem renovável da energia elétrica utilizada no processo de eletrólise e, consequentemente, a classificação do hidrogênio como verde;
- Planta de eletrólise, na qual ocorre a dissociação da molécula de água em hidrogênio e oxigênio, por meio de eletrolisadores do tipo PEM, tecnologia adotada neste estudo em função de sua maior flexibilidade operacional e maturidade tecnológica para aplicações industriais.

O dimensionamento da planta de hidrogênio verde parte da definição da quantidade de hidrogênio a ser produzida, a qual não é assumida de forma arbitrária, mas sim derivada da demanda dos subprodutos estratégicos associados à atividade âncora, identificados na demanda de mercado: amônia verde e o HVO. Adota-se, portanto, uma lógica de cálculo

“de trás para frente”, na qual a necessidade de hidrogênio é determinada a partir das quantidades desejadas de produtos finais.

Nesse sentido, inicialmente são estabelecidas as quantidades-alvo de produção de amônia e HVO, em consonância com as vocações industriais e logísticas do porto, bem como com os mercados consumidores identificados na análise de demanda. A partir dessas quantidades, aplica-se a relação técnica de consumo específico de hidrogênio para cada derivado, permitindo estimar a massa total de hidrogênio necessária para atender simultaneamente às duas cadeias produtivas.

Esse procedimento garante maior aderência entre a capacidade instalada da planta de eletrólise e a efetiva demanda industrial do cluster, evitando tanto o subdimensionamento quanto a superdimensionamento da infraestrutura produtiva. Com a quantidade total de hidrogênio definida, torna-se possível avançar para o dimensionamento dos sistemas de suporte, água e energia.

Para a estimativa da produção de hidrogênio verde e o conseqüente dimensionamento da planta de eletrólise, este estudo adota como ferramenta de apoio a Plataforma *MIPSYSTEM*, desenvolvida pela Nectere no âmbito de projeto de pesquisa financiado pelo CNPq, voltado à Concepção de um porto-indústria para fabricação offshore de hidrogênio verde. A utilização da plataforma permite integrar os parâmetros técnicos de produção, consumo de insumos e eficiência dos sistemas, oferecendo uma base consistente para a simulação de cenários produtivos. A ferramenta opera a partir da inserção das premissas definidas e das demandas de produtos finais, retornando os valores necessários de hidrogênio, energia elétrica e água, bem como indicadores auxiliares. Dessa forma, o uso da *MIPSYSTEM* confere maior rigor técnico ao processo de dimensionamento do projeto, assegurando transparência metodológica e rastreabilidade dos cálculos.

Além das premissas e parâmetros identificados através da plataforma, foram considerados os parâmetros adicionais sintetizados na Tabela 8.2.2.1.

Tabela 8.2.2.1: Parâmetros de produção

UN	PLANTA PEQUENA (<1 MW)	PLANTA MÉDIA (1-50 MW)	PLANTA GRANDE (>50 MW)	FONTE
t/d	0,05 - 2	2 - 100	100+	<i>Irena, 2019; IEA, 2023 e FCH JU, 2020</i> <i>IEA; IRENA; SEIA; DNV; Nel Hydrogen; NREL.</i>
m ²	10 - 200	200 – 10.000	10.000	
MW		50 MW por tonelada de H ₂		
l/t		9.000 l por tonelada de H ₂		

Fonte: elaboração própria

A definição da capacidade de produção de amônia verde considerada neste projeto parte da análise da movimentação de fertilizantes no Porto do Itaquí, um dos principais corredores de insumos agrícolas do país. De acordo com dados operacionais da EMAP (2025), o porto movimentou uma média diária de 12.606,08 toneladas de fertilizantes,

valor adotado como base para o dimensionamento da demanda potencial associada à cadeia de fertilizantes nitrogenados.

No contexto nacional, o Plano Nacional de Fertilizantes – PNF 2050 (MAPA, 2022) indica que o nitrogênio corresponde a aproximadamente 29% do total de nutrientes aplicados na agricultura brasileira, percentual que, neste estudo, é utilizado como aproximação para estimar a fração associada aos fertilizantes nitrogenados no volume total movimentado. A partir dessa premissa, obtém-se um montante estimado de 3.655,76 t/dia de fertilizantes nitrogenados associados à movimentação do Porto do Itaquí.

Dentro do segmento de fertilizantes nitrogenados, a ureia apresenta posição dominante no mercado brasileiro, respondendo por cerca de 60% do consumo, conforme dados consolidados da Associação Nacional para Difusão de Adubos – ANDA (2022–2024). Aplicando-se esse percentual, estima-se uma demanda aproximada de 2.193,46 t/dia de ureia vinculada ao volume de fertilizantes nitrogenados movimentados no porto.

Do ponto de vista industrial, a produção de ureia depende diretamente da disponibilidade de amônia, considerando a estequiometria do processo e a eficiência típica das plantas industriais, a síntese de 1 tonelada de ureia demanda, em média, 0,56 tonelada de amônia (NH_3). Com base nesse fator, a demanda total de amônia associada à produção estimada de ureia alcança aproximadamente 1.228,34 t/dia de NH_3 .

Entretanto, em consonância com as diretrizes de transição energética e mitigação de emissões estabelecidas pelo PNF 2050, o projeto não assume a substituição integral da amônia convencional no curto prazo. Em vez disso, adota-se como referência a meta de substituição de 20% da amônia convencional por amônia de baixo carbono ou amônia verde até 2030, valor compatível com cenários progressivos de descarbonização do setor de fertilizantes. Dessa forma, a capacidade de produção de amônia verde adotada no projeto corresponde a 245,67 t/dia de NH_3 , equivalente a 20% da demanda total estimada.

A produção dessa quantidade de amônia verde requer o suprimento de hidrogênio verde (H_2V) como insumo energético e químico. A partir de relações estequiométricas, a produção de 245,67 t/dia de NH_3 implica uma demanda teórica de aproximadamente 44 t/dia de H_2V . Esse valor representa uma condição ideal de conversão, sem considerar perdas inerentes aos processos industriais.

Por fim, o projeto incorpora a eficiência média do processo Haber-Bosch, estimada em 63%, conforme indicado pela *Ammonia Energy Association* (2021). Essa eficiência reflete perdas energéticas e limitações operacionais. Ao aplicar esse fator de eficiência, a demanda efetiva de hidrogênio verde é ajustada para aproximadamente 69,8 t/dia. A seguir, apresentam-se os principais resultados consolidados:

- Fertilizantes totais movimentados no Porto em 2025: 12.606,08 t/dia
- Fertilizantes nitrogenados (29%): 3.655,76 t/dia
- Ureia (60% dos nitrogenados): 2.193,46 t/dia
- Amônia total associada à ureia: 1.228,34 t/dia de NH_3
- Amônia considerada no projeto (20%): 245,67 t/dia de NH_3

- Hidrogênio verde (63% de eficiência no processo): 69,8 t/dia

O dimensionamento da produção de HVO parte do levantamento do consumo de diesel associado às operações do complexo portuário do Itaqui, abrangendo, a combustão estacionária — relacionada a geradores, motores-bomba e sistemas auxiliares —, a combustão móvel, que inclui veículos de transporte interno, frota operacional e equipamentos fora de estrada e o consumo dos terminais privados que operam dentro do complexo portuário. Esses dados são extraídos do Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Porto do Itaqui (EMAP, 2023), que consolida o consumo energético das operações próprias do porto e dos terminais privados. O consumo médio diário é de aproximadamente 3.275 litros de diesel, valor adotado como referência para a demanda mínima de substituição por HVO no âmbito estritamente portuário.

Entretanto, a implantação de uma unidade de produção de HVO integrada a um cluster de hidrogênio verde requer uma escala produtiva superior àquela demandada exclusivamente pelas operações portuárias. Assim, de forma complementar, o projeto incorpora um cenário de atendimento parcial ao mercado urbano de combustíveis do município de São Luís (MA). De acordo com dados estatísticos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2020), o consumo médio diário de combustíveis no município é da ordem de 1.442.604 litros por dia.

Considerando critérios de prudência técnica e econômica, adota-se um cenário otimista e conservador de suprimento de 20% desse consumo urbano, compatível com estratégias graduais de introdução de combustíveis avançados observadas em experiências internacionais. A aplicação desse percentual resulta em uma demanda adicional de aproximadamente 288.520,8 litros por dia de HVO associada ao mercado urbano.

Somando-se essa parcela à demanda portuária identificada no inventário da EMAP (2023), obtém-se uma necessidade total aproximada de 291.796 litros por dia de HVO, valor que define a capacidade de produção considerada no projeto. Para fins de conversão, adota-se uma densidade média do HVO de 0,78 kg/L, o que corresponde a uma produção diária de cerca de 227,6 toneladas de HVO.

A produção dessa quantidade de HVO requer o suprimento contínuo de hidrogênio verde. Neste estudo, adota-se como referência o consumo específico de 23,82 kg de H₂ por tonelada de HVO produzido, conforme indicado por Lorenzi et al. (2020). Reconhecendo as perdas inerentes aos processos industriais de hidrotreatamento, o projeto incorpora uma eficiência global de processo de 80%, conforme Lorenzi et al. (2020). A aplicação desse fator de eficiência ajusta a demanda efetiva de hidrogênio verde para aproximadamente 6,78 t/dia, valor que passa a orientar o dimensionamento da planta de eletrólise. A seguir, apresentam-se os principais resultados consolidados:

- Consumo de diesel no Complexo Portuário do Itaqui (operações próprias + terminais privados – Inventário de Emissões, EMAP, 2023): 3.275 L/dia
- Consumo total de combustíveis no município de São Luís (ANP): 1.442.604 L/dia
- Parcela do consumo urbano considerada no projeto (20%): 288.520,8 L/dia

- Demanda total de HVO considerada no projeto (porto + cidade): 291.796 L/dia
- Hidrogênio verde efetivo considerado no projeto (80% de eficiência do processo): 6,78 t/dia de H₂

Com base nos dimensionamentos apresentados para as duas rotas produtivas analisadas, o presente projeto adota como referência consolidada de produção de hidrogênio verde a soma das demandas diárias associadas a ambos os vetores. No caso da amônia verde, a capacidade considerada corresponde a uma demanda efetiva de 69,8 t/dia de H₂ e a rota de produção de HVO a demanda 6,78 t/dia de H₂. Dessa forma, o projeto adota como valor de referência global uma produção total de aproximadamente 76,6 t/dia de hidrogênio verde, a ser suprida pela infraestrutura de eletrólise integrada ao cluster portuário. Esse valor representa a base para o dimensionamento dos sistemas energéticos e hídricos associados e foi validado por meio de simulações realizadas na plataforma *MIPSYSTEM* desenvolvida pela Nectere cujas comprovações estão no anexo desse trabalho.

A partir desse valor de produção diária de hidrogênio verde, procede-se ao cálculo dos insumos necessários, com destaque para a demanda energética e hídrica do sistema de eletrólise. Para tanto, adotam-se como referências técnicas as diretrizes da IEA e IRENA, considerando, para fins de dimensionamento preliminar, um consumo médio de 50 MW de energia elétrica por tonelada de H₂ produzida e uma demanda hídrica de 9.000 litros de água por tonelada de H₂, parâmetros utilizados em estudos internacionais.

A seguir, apresentam-se os resultados de dimensionamento dos insumos para a produção de hidrogênio verde (amônia + HVO):

- Produção total de H₂ de referência no projeto: 76,6 t/dia
- Demanda de energia elétrica para eletrólise (50 MWh/t H₂): 3.830 MWh/dia
- Demanda de água para eletrólise (9.000 L/t H₂): 689.400 L/dia (≈ 689,4 m³/dia)

Esses valores constituem a base para o dimensionamento preliminar da infraestrutura energética e hídrica do cluster, incluindo capacidade de geração/contratação elétrica, subestações e sistemas de captação, tratamento e armazenamento de água. A consistência dos resultados é demonstrada por meio das simulações realizadas na plataforma de apoio ao planejamento.

Para o dimensionamento preliminar da área necessária à instalação dos eletrolisadores, adotou-se o parâmetro específico para tecnologia PEM, conforme definido na própria plataforma de simulação utilizada no projeto, que estabelece uma relação média de 0,8 m² por kg/h de H₂ produzido.

A partir da produção de hidrogênio verde adotada como referência global do projeto (76,6 t/dia), procedeu-se à conversão para base horária, resultando em uma capacidade equivalente de 3.197,67 kg/h de H₂. Aplicando-se o parâmetro de área por unidade de produção, obtém-se uma necessidade aproximada de 2.553,34 m² destinados exclusivamente à instalação dos eletrolisadores. Esse valor representa a área técnica mínima requerida para os módulos de eletrólise.

Para dimensionamento da produção de energia renovável, inicialmente, considerou-se a possibilidade de utilização da infraestrutura energética prevista no Plano de Descarbonização (2025), o qual contempla a implantação de um sistema fotovoltaico com capacidade instalada aproximada de 14,3 MWp e geração anual estimada entre 6,4 e 7,7 GWh. Contudo, a análise comparativa entre a capacidade de geração desse sistema e a demanda energética estimada para a planta de hidrogênio verde evidenciou uma discrepância significativa. Considerando que a produção de hidrogênio requer aproximadamente 3.830 MWh/dia, o consumo anual associado alcança cerca de 1.397.950 MWh, equivalente a 1.397,95 GWh/ano. Dessa forma, mesmo no cenário mais favorável, a geração energética prevista no plano de descarbonização representaria apenas cerca de 0,55% da demanda total do projeto. Em razão dessa contribuição marginal, optou-se por desconsiderar tal infraestrutura como solução principal e, conseqüentemente, desenvolver uma planta de geração dedicada.

Foram adotados os seguintes parâmetros técnicos obtidos na plataforma *MIPSYSTEM*:

- Painel solar: 430 Wp, 2 m², fator de capacidade 21%
- Turbina eólica *onshore*: 3,6 MW, 35% fator, 0,3 km²/turbina
- Turbina eólica *offshore*: 8 MW, 45% fator, 0,2 km²/turbina

Com base nesses parâmetros, foram estruturados três cenários prospectivos para suprimento energético da planta de hidrogênio verde.

O primeiro cenário contempla o atendimento integral da demanda energética por meio da geração solar fotovoltaica. Os cálculos indicaram a necessidade de aproximadamente 1,77 milhão de painéis solares, resultando em uma potência instalada estimada em cerca de 759,8 MWp. Do ponto de vista territorial, a implantação desses módulos demandaria uma área aproximada de 353,4 hectares, considerando apenas a área física dos painéis, sem incluir espaçamentos operacionais, vias de manutenção ou áreas complementares.

O segundo cenário considera o atendimento energético exclusivamente por meio da geração eólica, sendo subdividido em duas alternativas tecnológicas: implantação *onshore* e *offshore*. No caso da geração eólica terrestre, estima-se a necessidade de aproximadamente 127 aerogeradores de 3,6 MW, ocupando uma área total estimada de 38.100.000 m², equivalente a 3.810 hectares. Já a alternativa *offshore* demandaria cerca de 45 aerogeradores de 8 MW, com ocupação territorial aproximada de 900 hectares. Observa-se que a geração *offshore* apresenta maior densidade energética e menor demanda espacial relativa, embora envolva desafios tecnológicos, ambientais e econômicos distintos, associados principalmente às condições de instalação marítima e à infraestrutura de transmissão.

O terceiro cenário propõe um sistema híbrido, combinando geração solar e eólica, com participação de 50% para cada fonte. A adoção desse modelo fundamenta-se em critérios técnicos relacionados à complementaridade energética e à estabilidade operacional. Em regiões com elevada incidência solar, sistemas fotovoltaicos apresentam maior eficiência e previsibilidade de geração durante o período diurno. Por outro lado, áreas com regimes

de vento constantes, especialmente com velocidades médias superiores a 7 m/s, favorecem o desempenho de aerogeradores, ampliando a confiabilidade da produção energética. Sistemas híbridos tendem a reduzir a variabilidade da geração renovável, minimizando a dependência da rede elétrica e ampliando a segurança energética do empreendimento.

A caracterização natural da área de estudo evidenciou condições favoráveis tanto para a geração solar quanto para a geração eólica, justificando a adoção de uma matriz energética balanceada entre essas duas fontes. Nesse cenário, o atendimento de 50% da demanda energética por meio da energia solar demandaria aproximadamente 883 mil painéis fotovoltaicos, com potência instalada estimada em cerca de 379,9 MWp e ocupação territorial aproximada de 176,7 hectares. Paralelamente, o atendimento dos outros 50% da demanda por meio da geração eólica *onshore* exigiria a implantação de aproximadamente 64 aerogeradores, com área estimada de 1.920 hectares.

Tabela 8.2.2.2: Síntese da infraestrutura energética

Fonte Energética	Equipamentos	Potência Instalada	Área (m ²)	Área (ha)
Solar Fotovoltaica	≈ 1.767.000 painéis	≈ 759,8 MWp	3.534.000	353,4
Eólica <i>Onshore</i>	≈ 127 turbinas (3,6 MW)	≈ 457,2 MW instalados	38.100.000	3.810
Eólica <i>Offshore</i>	≈ 45 turbinas (8 MW)	≈ 360 MW instalados	9.000.000	900
Híbrido (50% Solar + 50% Eólica <i>Onshore</i>)	≈ 883.000 painéis + 64 turbinas	≈ 379,9 MWp (solar) + 230,4 MW (eólica)	20.967.000	2.096,7

Fonte: elaboração própria

Conforme identificado na caracterização natural, a área de estudo apresenta uma recarga potencial direta estimada em 755,91 m³/s, equivalente a aproximadamente 65 milhões de m³ por dia. Quando comparada à demanda hídrica do projeto para a produção de hidrogênio verde — estimada em 689,4 m³/dia —, observa-se que o volume requerido representa uma fração extremamente reduzida desse potencial, evidenciando viabilidade hídrica plena do ponto de vista quantitativo.

Nesse contexto, a utilização de água subterrânea é uma alternativa tecnicamente atrativa, uma vez que, em geral, demanda menor nível de tratamento em comparação à água superficial. Todavia, embora a disponibilidade volumétrica não se configure como restrição, o dimensionamento definitivo da infraestrutura de captação, tratamento e uso da água somente poderá ser estabelecido a partir de estudos hidrogeológicos detalhados da região, incluindo a caracterização da qualidade da água subterrânea e a compatibilização com os parâmetros específicos do eletrolisador adotado. Assim, conclui-se que, sob o critério de quantidade, a utilização de água subterrânea é plenamente viável, permanecendo condicionada às análises técnicas e ambientais necessárias para sua implementação.

Conforme os resultados apresentados, verifica-se que a área requerida para a implantação dos eletrolisadores é relativamente reduzida quando comparada à disponibilidade espacial do sítio analisado. A demanda estimada de aproximadamente 2.553,34 m² para os módulos de eletrólise mostra-se plenamente compatível com a Área A-02C, previamente

definida na caracterização não natural do território, a qual dispõe de 80.836,24 m², permitindo a inserção da planta de eletrólise sem conflitos relevantes de uso ou necessidade de remanejamentos significativos.

Entretanto, ao se considerar a infraestrutura energética associada à produção de hidrogênio verde, constata-se que as áreas previamente identificadas não são suficientes para acomodar integralmente esse conjunto de estruturas. Diante disso, torna-se necessário que, nas fases subsequentes de implantação ou detalhamento do projeto, sejam avaliadas áreas alternativas, especialmente na retroárea do complexo portuário, de modo a viabilizar a inserção adequada da infraestrutura energética de suporte.

8.2.3. ATIVIDADES SECUNDÁRIAS

Essa etapa tem como objetivo identificar as Unidades de Transformação Produtiva associadas ao uso do hidrogênio verde como insumo nos processos industriais. A identificação dessas indústrias decorre diretamente da análise da demanda de mercado, a partir da qual foram reconhecidas duas rotas produtivas prioritárias para o território: a produção de HVO e a produção de amônia verde.

No que se refere à sua implantação espacial, as duas unidades apresentam condicionantes distintas. A planta de produção de HVO é prevista no interior da poligonal do porto, uma vez que sua função está diretamente associada à descarbonização das operações portuárias, do transporte interno e do abastecimento do posto de combustíveis localizado na entrada do complexo, além de demandar forte integração logística com as atividades portuárias.

Por outro lado, em razão de restrições ambientais e de segurança associadas à produção e ao armazenamento de amônia, a unidade de amônia verde é prevista fora da poligonal portuária, em área da retroárea, mais próxima das indústrias de fertilizantes já instaladas que utilizam amônia como insumo, favorecendo a integração produtiva, reduzindo riscos operacionais e garantindo maior compatibilidade ambiental.

O dimensionamento da área necessária para a implantação da unidade de produção de amônia verde parte da capacidade definida para o projeto, correspondente a 245,67 t/dia de NH₃, valor compatível com plantas industriais de médio porte já em operação ou em fase avançada de implantação em diferentes contextos internacionais. Considerando que a amônia verde constitui um subproduto da cadeia do hidrogênio, e que sua rota tecnológica se encontra mais consolidada quando comparada a outras aplicações emergentes, optou-se por adotar referências de projetos existentes como base comparativa para a estimativa de área requerida.

De acordo com levantamentos técnicos e industriais apresentados por Endress+Hauser Portugal (2024) e por análises de mercado sistematizadas pela Fortune Business Insights (2025), unidades de produção de amônia verde com capacidade situada no intervalo de 200 a 2.000 toneladas por dia demandam áreas da ordem de 10.000 a 100.000 m², a depender do arranjo tecnológico, do nível de integração com sistemas auxiliares e das

exigências de segurança operacional. A partir desse intervalo, realizou-se um cálculo ponderado considerando a capacidade do projeto (245,67 t/dia), o que resulta em uma área estimada da ordem de 12.000 a 13.000 m² para a configuração base da planta.

Entretanto, visando conferir flexibilidade operacional e possibilidade de ampliação futura, o projeto considera um cenário de incremento de até 50% na capacidade produtiva, o que elevaria a produção para aproximadamente 370 t/dia de amônia. Nesse caso, a aplicação do mesmo critério ponderado indica uma área requerida da ordem de 18.000 a 20.000 m², valor adotado como referência de dimensionamento, de modo a assegurar margem adequada para expansão, áreas de segurança, circulação interna e integração com sistemas auxiliares.

À luz dessa estimativa, observa-se que a disponibilidade de áreas na retroárea do complexo portuário é amplamente compatível com a implantação da unidade de amônia verde, não se configurando a dimensão espacial como fator limitante ao empreendimento. Ademais, a produção e o armazenamento de amônia demandam áreas maiores e zonas de amortecimento em função de requisitos ambientais e de segurança, o que reforça a adequação da retroárea como local preferencial de implantação, em detrimento da poligonal portuária. Dessa forma, a escolha espacial atende simultaneamente a critérios técnicos, ambientais e de ordenamento territorial, mantendo coerência com a lógica de organização do cluster.

O dimensionamento da área necessária para a implantação da unidade de produção de HVO segue a mesma lógica metodológica adotada para a amônia verde, com base em referências de projetos existentes e em parâmetros reportados na literatura técnica sobre rotas industriais associadas ao hidrogênio verde. Considerando a demanda definida no projeto, correspondente a 227,6 t/dia de HVO, o porte da unidade enquadra-se no intervalo típico de plantas de pequena a média capacidade, conforme identificado em estudos setoriais e aplicações industriais consolidadas (IAPTEL, 2023; Cummins, 2024).

De acordo com essas referências, unidades de produção de HVO com capacidade situada entre 50 e 300 t/dia demandam áreas da ordem de 5.000 a 15.000 m², a depender do nível de integração do processo, da configuração dos reatores, dos sistemas de armazenamento intermediário e das áreas de apoio operacional. No âmbito deste estudo, opta-se por adotar o limite superior do intervalo (15.000 m²) como referência de dimensionamento, de forma a incorporar margem para aumento futuro da produção, maior flexibilidade operacional e adequada acomodação de sistemas auxiliares e áreas de segurança.

Diferentemente da amônia, a planta de HVO é prevista para implantação no interior da poligonal do porto, em função de sua forte articulação com a descarbonização das operações portuárias, do abastecimento do posto de combustíveis localizado na entrada do complexo e da necessidade de integração logística direta com o sistema de produção de hidrogênio verde. Essa proximidade reduz fluxos internos, simplifica a operação e reforça o papel do HVO como vetor imediato de transição energética no ambiente portuário.

Ao se considerar conjuntamente a área requerida para a planta de HVO ($\approx 15.000 \text{ m}^2$) e a área destinada aos eletrolisadores PEM ($\approx 2.553 \text{ m}^2$), obtém-se uma demanda total aproximada de 17.550 m^2 para as unidades industriais inseridas na poligonal do porto. Esse valor é amplamente compatível com a Área A-02C, que dispõe de $80.836,24 \text{ m}^2$, confirmando a plena viabilidade espacial da implantação conjunta da planta de hidrogênio e da unidade de HVO nessa área, com folga suficiente para circulação, áreas técnicas complementares e eventuais expansões futuras.

8.2.4. ATIVIDADES DE APOIO

Essa etapa trata das atividades de apoio ao cluster de hidrogênio verde, com o objetivo de organizar sua inserção espacial e funcional no território portuário, assegurando governança, eficiência logística, segurança operacional e capacidade de inovação ao empreendimento. Na análise da Cadeia de Negócio, foi possível identificar poucos elos faltantes, concentrados principalmente nas atividades de armazenamento e logística, o que reforça a maturidade do arranjo produtivo proposto. Essas atividades de apoio são fundamentais para a consolidação do cluster como um sistema integrado, articulando produção, transformação, armazenamento, circulação e gestão estratégica.

No que se refere às essas atividades de armazenamento, o projeto não parte da premissa de disponibilidade plena das áreas já arrendadas, mas da articulação entre áreas remanescentes e a infraestrutura logística e operacional existente no porto. Considerando que as áreas IQI-12 e IQI-13 encontram-se atualmente ocupadas, conforme indicado no Plano de Descarbonização, a estratégia proposta mantém a Área A-02C como o principal espaço com flexibilidade para a implantação de novas estruturas de tancagem associadas ao hidrogênio verde e a seus derivados, em complementaridade às áreas já consolidadas.

Para as atividades de administração e governança, propõe-se a implantação de uma área administrativa dedicada à gestão do cluster, responsável pela coordenação institucional, operacional e regulatória das atividades associadas ao hidrogênio verde e a seus derivados. Essa estrutura deve concentrar funções de planejamento, monitoramento de desempenho, interface com agentes públicos e privados, gestão ambiental e articulação com programas de incentivo e financiamento. Considerando as características físicas e funcionais do território, recomenda-se que essa área seja implantada na Área A-07, que possui $4.396,84 \text{ m}^2$ e apresenta proximidade imediata com a Área A-02C. Trata-se de uma área de dimensão reduzida para usos industriais de maior porte — embora o PDZ indique seu uso para graneis líquidos e sólidos —, o que a torna mais adequada para atividades administrativas, de governança, apoio técnico e inovação, sem comprometer áreas estratégicas destinadas à produção.

A Área A-02C, por sua vez, permanece destinada prioritariamente à implantação das unidades industriais — planta de hidrogênio verde e unidade de HVO —, concentrando também o centro de controle operacional do cluster, em função de sua maior disponibilidade espacial e de sua integração direta com os processos produtivos e a

infraestrutura logística do porto. Essa separação funcional contribui para maior racionalidade no uso do solo portuário e para a organização hierarquizada das atividades.

Por fim, no âmbito das atividades de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D), propõe-se que essas funções sejam integradas à Área A-07, em articulação direta com a estrutura administrativa e de governança do cluster. Essa área poderá abrigar laboratórios, instalações piloto e espaços de pesquisa aplicada, voltados ao aprimoramento dos processos de produção de hidrogênio verde, HVO e amônia, bem como ao desenvolvimento de novos usos, materiais, rotas tecnológicas e estratégias de eficiência energética. A proximidade física com a Área A-02C assegura a interação contínua com a operação industrial, permitindo testes em ambiente real sem a necessidade de inserção dessas atividades em áreas industriais de maior porte.

Dessa forma, o projeto adota uma lógica de implantação incremental e integrada, na qual a Área A-02C assume o papel central para a instalação das indústrias âncora e secundárias, do centro de controle e da expansão física da tancagem, enquanto a Área A-07 passa a concentrar as funções de administração, governança e P&D, otimizando o uso do solo portuário. As áreas IQI já ocupadas seguem contribuindo como suporte logístico e operacional, fortalecendo a viabilidade técnica e econômica do armazenamento e da futura exportação de hidrogênio verde e de seus derivados. A figura a seguir apresenta a indicação das áreas A-02C e A-07 no contexto do complexo portuário.

Figura 8.2.4.1: Áreas sugeridas para implantação do cluster



Fonte: elaboração própria

8.3. ANÁLISE DOS IMPACTOS URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS

A etapa final do estudo de caso, dedicada à análise dos impactos decorrentes da implantação do cluster portuário de hidrogênio verde, constitui uma síntese crítica entre a proposta conceitual desenvolvida ao longo da dissertação e as dinâmicas territoriais, urbanas, sociais e ambientais observadas no Porto de Itaquí e em sua área de influência. Mais do que avaliar efeitos isolados, este capítulo busca compreender os impactos de forma sistêmica, considerando o porto como um elemento estruturador do território e parte integrante de redes produtivas, logísticas e urbanas cada vez mais complexas.

8.3.1. IMPACTOS URBANOS

A avaliação dos impactos urbanos do projeto tem como objetivo verificar sua capacidade de reorganizar o uso do solo portuário e de aumentar a densidade funcional do território, a partir da ativação de áreas anteriormente classificadas como livres ou subutilizadas. Diferentemente de empreendimentos que promovem expansão territorial extensiva, a lógica adotada neste estudo prioriza a requalificação de áreas internas ao complexo portuário, alinhando-se a princípios de eficiência espacial, racionalização do uso do solo e fortalecimento de áreas já dotadas de infraestrutura.

Nesse sentido, a análise parte da identificação de parcelas do porto caracterizadas como *greenfield* ou áreas livres, que passam a desempenhar funções produtivas, administrativas e de apoio a partir da implantação do cluster de hidrogênio verde. A mensuração desse impacto é realizada por meio de indicadores quantitativos, permitindo avaliar de forma objetiva o grau de conversão de áreas subutilizadas e os efeitos estruturantes do projeto sobre a organização espacial do porto.

O primeiro indicador avalia a proporção de áreas anteriormente livres ou subutilizadas que são efetivamente convertidas em uso produtivo com a implantação do projeto. Para esse fim, adota-se a seguinte relação:

$$\text{Percentual de Conversão} = \frac{AC}{AS} * 100$$

onde:

- **AS (Área Subutilizada)** corresponde à soma das áreas livres identificadas no recorte de análise;
- **AC (Área Convertida)** corresponde à parcela dessas áreas que passa a ser ocupada por usos produtivos e de apoio diretamente associados ao cluster.

A área subutilizada (AS) considerada no cálculo corresponde ao conjunto de parcelas classificadas como livres no interior do complexo portuário, totalizando 198.550,13 m². Esse montante resulta da soma das áreas A-02C (80.836,25 m²), A-03A (39.228,60 m²), A-07 (4.396,84 m²), A-09 (21.272,77 m²), A-13 (23.095,64 m²) e A-15A (29.720,03 m²),

as quais, antes da implantação do projeto, não desempenhavam funções produtivas relevantes no contexto do porto.

A área convertida (AC) em uso produtivo pelo projeto corresponde às parcelas efetivamente ocupadas pelas unidades industriais, administrativas e de apoio associadas ao cluster de hidrogênio verde, totalizando 85.233,09 m². Essa área é composta pela A-02C (80.836,25 m²), destinada às unidades industriais e ao centro de controle operacional, e pela A-07 (4.396,84 m²), destinada às atividades de administração, governança e Pesquisa & Desenvolvimento (P&D).

$$\text{Percentual de Conversão} = \frac{85.233,09}{198.550,13} * 100 = \mathbf{42,9\%}$$

O resultado indica que aproximadamente 42,9% das áreas anteriormente livres ou subutilizadas são convertidas em uso produtivo. Como parâmetro de desempenho, Ferreira (2021) considera desejável que ao menos 50% da área ocupada por novas atividades tenha origem em terrenos anteriormente subutilizados ou de baixa densidade operacional. Embora o valor obtido se situe ligeiramente abaixo desse referencial, o resultado revela uma tendência consistente de requalificação do solo portuário, especialmente considerando que o projeto prioriza áreas estratégicas para implantação industrial e mantém parcelas livres como reserva territorial para expansões futuras. Assim, o indicador demonstra que o empreendimento contribui de forma relevante para a reorganização do uso do solo portuário, com potencial de ampliação do percentual de conversão em etapas posteriores de desenvolvimento do cluster.

A densidade funcional expressa o número de atividades distintas implantadas por unidade de área e constitui uma adaptação do conceito clássico de densidade urbana — tradicionalmente associado à moradia — para o contexto industrial e portuário. No âmbito de clusters produtivos, esse indicador é particularmente relevante, pois reflete o grau de integração funcional, diversificação produtiva e potencial de inovação do território, elementos centrais para a competitividade e a resiliência do sistema.

Para o cálculo da densidade funcional, adota-se a seguinte relação:

$$\text{Densidade funcional} = \frac{n^{\circ} \text{ de atividades distintas}}{\text{Área ocupada (ha)}}$$

onde o numerador corresponde às atividades efetivamente implantadas pelo projeto e o denominador refere-se à área convertida em uso produtivo (AC), já definida no indicador anterior.

No caso deste projeto, a área ocupada considerada é de 85.233,09 m², equivalente a 8,52 hectares, correspondente às áreas A-02C e A-07. No interior desse recorte espacial, o cluster incorpora um conjunto diversificado de funções, que vão além da produção primária de hidrogênio, incluindo etapas de transformação, armazenamento, serviços técnicos e funções de suporte. De forma sintética, podem ser identificadas as seguintes atividades distintas:

- 1) Produção de hidrogênio verde (eletrólise)
- 2) Produção de HVO
- 3) Centro de controle operacional do cluster
- 4) Administração e governança do cluster
- 5) Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) e laboratório aplicado
- 6) Armazenamento e tancagem de subprodutos
- 7) Serviços técnicos e utilidades (energia, água, sistemas auxiliares)

Assim, considera-se um total de 7 atividades distintas inseridas na área analisada.

A aplicação do indicador resulta em uma densidade funcional de aproximadamente:

$$\text{Densidade funcional} = \frac{7}{8,52} = \mathbf{0,82 \text{ atividades/ha}}$$

A aplicação do indicador de densidade funcional resultou em um valor aproximado de 0,82 atividades por hectare, considerando a inserção de 7 atividades distintas em uma área ocupada de 8,52 ha. À primeira vista, esse valor situa-se abaixo do parâmetro de desempenho proposto por Ferreira (2021), segundo o qual clusters urbanos sustentáveis devem apresentar densidade mínima entre 6 e 10 atividades por hectare, de modo a estimular a diversificação produtiva, a inovação e as sinergias territoriais.

Entretanto, a comparação direta deve ser realizada com cautela, uma vez que o referencial de Ferreira (2021) é formulado a partir de uma abordagem urbana, frequentemente associada a ambientes industriais de menor escala, uso misto ou tecidos produtivos urbanos consolidados, nos quais as atividades apresentam menor exigência espacial e menores condicionantes de segurança. No caso específico do complexo portuário, as atividades implantadas são caracterizadas por alta intensidade tecnológica, elevado grau de especialização funcional e significativas exigências de segurança, logística e áreas de amortecimento, o que resulta, estruturalmente, em menores densidades físicas de atividades por hectare.

Além disso, o cluster proposto concentra, em um único recorte territorial, funções que usualmente se encontram dispersas no território, tais como produção energética (hidrogênio verde), transformação industrial (HVO), armazenamento, governança, centro de controle e Pesquisa & Desenvolvimento. Sob essa perspectiva, ainda que a densidade numérica seja inferior ao intervalo de referência, o projeto promove um aumento substantivo da densidade funcional qualitativa, ao articular atividades complementares, intensivas em conhecimento e fortemente integradas em um espaço previamente caracterizado por baixa diversidade de usos.

Cabe destacar, por fim, que o próprio resultado do Indicador 1 evidencia que parte significativa das áreas livres permanece como reserva territorial, o que cria condições para a incorporação progressiva de novas atividades secundárias e terciárias em fases futuras do cluster. Nesse sentido, a densidade funcional observada deve ser compreendida como condição inicial de implantação, com potencial de evolução gradual em direção aos

parâmetros de referência indicados por Ferreira (2021), à medida que o cluster se consolide e diversifique suas atividades.

8.3.2. IMPACTOS SOCIAIS

A análise dos impactos sociais visa avaliar a capacidade de gerar empregos e de contribuir para a redução das desigualdades territoriais, a partir da implantação do cluster de hidrogênio verde e de suas unidades produtivas associadas. O foco recai sobre os efeitos diretos do empreendimento no mercado de trabalho e sobre sua aptidão para integrar empresas já existentes ao novo arranjo produtivo, ampliando a retenção de valor no território.

Para essa avaliação, são adotados dois indicadores principais: o número de empregos gerados, associado às atividades produtivas do cluster, e o percentual de empresas locais inseridas na cadeia de suprimentos (%), como medida do potencial de fortalecimento da economia local. Esses indicadores permitem analisar os impactos sociais tanto em termos de oportunidades de trabalho quanto de integração produtiva.

Para o cálculo do número de empregos gerados, considera-se, nesta etapa, apenas as indústrias principais do cluster, correspondentes às atividades âncora de produção de hidrogênio verde e às unidades de transformação produtiva associadas aos seus derivados, especificamente HVO e amônia verde. A opção por restringir a análise a essas atividades decorre do fato de que elas concentram os empregos diretos estruturantes do cluster, com maior intensidade tecnológica, maior estabilidade ocupacional e maior capacidade de indução de encadeamentos produtivos.

A estimativa de empregos é realizada com base em dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), tomando como referência o Brasil e utilizando os dados consolidados de dezembro de 2024. A RAIS permite identificar, por classe da CNAE, o número total de estabelecimentos e o total de vínculos formais, possibilitando o cálculo do emprego médio por estabelecimento, adotado neste estudo como parâmetro para estimar a geração de empregos diretos associada à implantação de uma unidade industrial de cada tipo no cluster.

O cálculo do emprego médio por estabelecimento é dado por:

$$\text{Empregos médios por empresa} = \frac{\text{Total de vínculos formais no CNAE}}{\text{Nº de estabelecimentos no CNAE}}$$

Para a atividade Fabricação de gases industriais (CNAE 2014-2/00), associada à produção de hidrogênio verde, a RAIS registra 254 estabelecimentos e 5.557 vínculos formais, resultando em uma média aproximada de 21,9 empregos por estabelecimento. Esse valor é adotado como referência para estimar os empregos diretos da unidade âncora de produção de hidrogênio verde prevista no projeto.

No caso da Fabricação de biocombustíveis, exceto álcool (CNAE 1932-2/00), representativa da produção de HVO, são identificados 78 estabelecimentos com 5.087

vínculos formais, o que corresponde a uma média de aproximadamente 65,2 empregos por estabelecimento. Esse resultado reflete o caráter mais intensivo em mão de obra das unidades de biocombustíveis, especialmente em operações contínuas e integradas.

Para a atividade de Fabricação de intermediários para fertilizantes (CNAE 2012-6/00), associada à produção de amônia, a RAIS indica 58 estabelecimentos e 4.210 vínculos formais, resultando em uma média de cerca de 72,6 empregos por estabelecimento, valor compatível com plantas químicas de médio porte e elevado grau de especialização técnica.

O total estimado é, portanto, de aproximadamente 160 empregos diretos, associados exclusivamente às atividades industriais centrais do cluster. Esse número deve ser interpretado como uma ordem de grandeza, baseada em médias setoriais nacionais, e não como um valor contratual ou definitivo, estando sujeito a variações em função do nível de automação, do arranjo tecnológico e da escala operacional adotada no projeto.

Ainda assim, o indicador evidencia que o cluster apresenta capacidade relevante de geração de empregos qualificados, concentrados em setores de maior intensidade tecnológica e valor agregado, criando uma base sólida para a indução de empregos e para a ampliação dos efeitos sociais positivos do empreendimento.

O segundo indicador de impactos sociais avalia a capacidade do projeto de integrar empresas locais à cadeia de suprimentos do cluster, contribuindo para a redução de desigualdades territoriais por meio da retenção de valor econômico, do fortalecimento da base produtiva existente e da ampliação das oportunidades de inserção empresarial no território. O horizonte de análise adotado corresponde ao município de São Luís, por se tratar do território mais próximo ao cluster e com maior influência direta sobre suas dinâmicas produtivas, logísticas e de emprego.

A mensuração do indicador é realizada a partir da Cadeia de Negócios estruturada por eixos funcionais — montante, âncora, jusante e apoio —, na qual foram identificados os CNAEs necessários ao funcionamento do cluster e, em seguida, verificada sua presença ou ausência no território. Adota-se a seguinte relação:

$$\% \text{ Inserção local} = \frac{N^{\circ} \text{ de CNAEs presentes no território}}{N^{\circ} \text{ total de CNAEs da cadeia}} \times 100$$

No eixo montante, que compreende atividades relacionadas ao fornecimento de insumos, equipamentos e serviços especializados, foram identificados 19 CNAEs, dos quais 8 correspondem a elos faltantes no território de São Luís. Dessa forma, 11 CNAEs (57,9%) apresentam presença local e potencial de inserção imediata na cadeia de suprimentos do cluster.

No eixo âncora, associado às atividades centrais de produção de hidrogênio verde e de seus derivados, foram identificados 16 CNAEs, com 9 elos faltantes. Nesse caso, 7 CNAEs (43,8%) encontram-se presentes no território, evidenciando que as atividades

mais intensivas em tecnologia e capital tendem a apresentar maior dependência de fornecedores externos, especialmente no estágio inicial de implantação do cluster.

O eixo jusante, relacionado às atividades de uso, distribuição e transformação final dos produtos, apresenta 13 CNAEs, dos quais apenas 1 é considerado elo faltante. Assim, 12 CNAEs (92,3%) já existem no território, indicando elevada capacidade local de absorção, utilização e integração dos produtos do cluster, sobretudo no contexto industrial e logístico de São Luís.

Por fim, o eixo de apoio, que engloba atividades administrativas, logísticas, técnicas, de manutenção, serviços especializados e suporte operacional, é composto por 30 CNAEs, com apenas 3 elos faltantes. Nesse eixo, 27 CNAEs (90,0%) apresentam presença local, o que revela uma base de serviços relativamente madura e apta a sustentar o funcionamento cotidiano do cluster.

Considerando o conjunto da cadeia de negócios, foram identificados 78 CNAEs, dos quais 57 apresentam presença no território de São Luís, enquanto 21 configuram elos faltantes. Isso resulta em um percentual aproximado de 73,1% de CNAEs com presença local, indicador que evidencia uma elevada capacidade de inserção de empresas locais na cadeia de suprimentos do cluster.

O resultado evidencia que o cluster proposto apresenta elevada capacidade de inserção de empresas do território de São Luís em sua cadeia de suprimentos. Esse valor supera de forma expressiva a meta recomendada na literatura e em experiências internacionais de clusters produtivos, segundo a qual ao menos 30% dos fornecedores devem ser locais, parâmetro inspirado em iniciativas como o Mission Bay (Estados Unidos) e o Cluster de Lyon (França).

A superação desse referencial indica que, no caso analisado, o cluster de hidrogênio verde não apenas atende, mas excede com ampla margem os critérios mínimos observados em experiências internacionais consolidadas, sobretudo nos eixos jusante (92,3%) e apoio (90,0%), nos quais a base produtiva e de serviços local demonstra elevada aderência às demandas do empreendimento.

Por outro lado, a menor taxa de inserção local observada nos eixos montante (57,9%) e âncora (43,8%), ainda que superior ao parâmetro mínimo de 30%, revela a existência de gargalos estruturais associados a atividades mais intensivas em tecnologia e capital, característica recorrente em cadeias emergentes como a do hidrogênio verde. Longe de representar uma fragilidade do projeto, essa constatação fornece subsídios estratégicos para a formulação de políticas públicas e instrumentos de governança do cluster, orientados à atração de investimentos, à capacitação produtiva e ao estímulo à inovação, com vistas ao preenchimento progressivo desses elos faltantes.

8.3.3. IMPACTOS AMBIENTAIS

A análise dos impactos ambientais do projeto tem como objetivo avaliar sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), em alinhamento com as

metas de descarbonização do setor portuário e de transportes. Diferentemente dos impactos urbanos, que se materializam espacialmente no território, os impactos ambientais associados ao hidrogênio verde e a seus derivados manifestam-se sobretudo por meio da substituição de combustíveis fósseis e da consequente mitigação de emissões de CO₂ equivalente ao longo do ciclo de uso da energia.

No âmbito deste estudo, opta-se por avaliar a redução de emissões exclusivamente a partir da rota do HVO, considerando apenas o volume destinado à descarbonização das operações do porto e de sua frota associada. Essa escolha decorre do fato de que, no caso do HVO, a relação entre produção, uso final e substituição direta do diesel fóssil é claramente identificável e mensurável, uma vez que se trata de um combustível “*drop-in*” utilizado em motores ciclo Diesel, com substituição volumétrica direta e aplicação local.

Por outro lado, a quantificação das emissões evitadas associadas à amônia verde apresenta maior complexidade, pois depende de fatores externos ao escopo imediato do projeto, como o tipo de fertilizante produzido, a escala de aplicação agrícola, as práticas de manejo, o balanço de emissões no uso final e, sobretudo, a distinção entre emissões diretas e indiretas ao longo do ciclo de vida do fertilizante. Diante dessas incertezas e da multiplicidade de cenários possíveis, a amônia não é considerada neste indicador específico.

Para o cálculo das emissões evitadas associadas ao uso do HVO, adota-se como base a plataforma *MIPSYSTEM*, que utiliza um modelo estequiométrico simplificado para estimar as emissões de CO₂ provenientes da combustão do diesel fóssil. O método parte da consideração de uma fórmula molecular média do diesel aproximada por C₁₆H₃₄.

A partir das massas molares dos reagentes e produtos — 226 g/mol para o diesel (C₁₆H₃₄) e 44 g/mol para o CO₂ — obtém-se que cada 226 g de diesel consumido gera aproximadamente 704 g de CO₂, o que corresponde a cerca de 3,16 kg de CO₂ emitidos por quilograma de diesel queimado. Essa relação é amplamente utilizada em inventários de emissões e constitui a referência para a comparação entre o diesel fóssil e combustíveis renováveis.

Com base nessas premissas, a plataforma *MIPSYSTEM* estima que, para o volume de 291.796,0 litros de HVO considerado no projeto, a redução de emissões de CO₂ em relação ao diesel fóssil atinge aproximadamente 85%. Esse percentual reflete a análise de ciclo de vida do HVO, considerando sua origem renovável e o balanço de carbono associado à matéria-prima.

A quantificação da redução de emissões de gases de efeito estufa associada ao uso do hidrogênio verde no projeto foi realizada a partir da rota do HVO destinado à descarbonização das operações portuárias, por se tratar de uma aplicação com substituição direta e mensurável do diesel fóssil. Com base nas premissas adotadas pela plataforma *MIPSYSTEM*, considera-se que a combustão do diesel fóssil emite, em média, 3,16 kg de CO₂ por quilograma de combustível, valor obtido a partir de relações estequiométricas simplificadas da reação de combustão do diesel.

Para o volume de 291.796 litros de HVO utilizado no porto, equivalente a aproximadamente 227,6 toneladas de combustível, as emissões associadas ao cenário de referência fóssil seriam da ordem de 719,2 tCO₂. Considerando que o HVO apresenta uma redução média de 85% nas emissões de CO₂ em relação ao diesel fóssil, conforme estimado pela plataforma *MIPSYSTEM*, o uso desse biocombustível renovável resulta na evitação de aproximadamente 611,3 tCO₂ nas operações portuárias.

Relacionando esse benefício ambiental à quantidade de hidrogênio verde efetivamente utilizada para a produção do HVO, estimada em 6,78 t de H₂, obtém-se o indicador ambiental. Assim, o projeto apresenta uma taxa de redução de emissões da ordem de **90,2 tCO₂eq por tonelada de hidrogênio verde produzida**, evidenciando a elevada efetividade da rota do HVO como vetor de mitigação de emissões no contexto portuário. Esse resultado reforça o papel do hidrogênio verde não apenas como insumo energético, mas como elemento estruturante de estratégias de descarbonização com impactos ambientais diretos, quantificáveis e alinhados às metas climáticas de curto e médio prazo.

8.4. TÓPICOS CONCLUSIVOS

O Porto de Itaqui demonstrou possuir condições naturais favoráveis à produção de hidrogênio verde, combinando disponibilidade hídrica, bom potencial solar e eólico, ainda que sob restrições ambientais que exigem rigoroso planejamento territorial.

A infraestrutura portuária existente, com forte vocação para granéis líquidos, rede dutoviária interna e boa conectividade ferroviária, rodoviária e hidroviária, mostrou um grau de prontidão relevante para receber um cluster portuário de H₂V, reduzindo o salto de adaptação necessário.

O enquadramento jurídico-territorial, a partir do Plano Diretor de São Luís e do PDZ do porto, indicou que há base normativa para acomodar o cluster como projeto estruturante, embora sejam necessários ajustes e alinhamentos específicos para garantir segurança jurídica e priorização na agenda de desenvolvimento.

A análise da demanda evidenciou que Itaqui é, simultaneamente, importante emissor e potencial consumidor de hidrogênio verde, com oportunidades em operações portuárias, transporte marítimo e cadeias industriais regionais, o que sustenta a viabilidade econômica de um cluster se houver políticas de indução e contratos de longo prazo.

A estruturação da cadeia de negócios mostrou que o hidrogênio verde pode atuar como atividade âncora capaz de reorganizar encadeamentos produtivos a montante e a jusante, mas também revelou lacunas em indústrias de transformação e serviços especializados, indicando a necessidade de políticas de adensamento produtivo.

A análise de impactos urbanos, sociais e ambientais apontou que o cluster em Itaqui tende a gerar benefícios em termos de emprego, arrecadação e redução de emissões, mas também pode intensificar pressões sobre o território e ecossistemas sensíveis, reforçando a urgência de arranjos de governança robustos e participativos.

CAPÍTULO 9. DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

9.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo discute e analisa os resultados obtidos com a aplicação do modelo conceitual do Cluster Portuário de Hidrogênio Verde (CP-H₂V) e do método proposto ao estudo de caso do Porto de Itaqui. A partir da leitura integrada do território, da infraestrutura portuária, do arcabouço normativo, da estrutura produtiva e dos indicadores de impacto, busca-se avaliar em que medida Itaqui reúne condições para abrigar um cluster portuário de hidrogênio verde e quais são as implicações urbanas, sociais e ambientais dessa concepção.

A análise que se segue está organizada em cinco eixos: (i) aderência do caso de Itaqui ao modelo conceitual do CP-H₂V; (ii) condições naturais e territoriais para a produção de hidrogênio verde; (iii) infraestrutura portuária, conectividade logística e enquadramento normativo; (iv) estruturação da cadeia de negócios e potencial de adensamento produtivo; e (v) impactos urbanos, sociais e ambientais associados ao cluster. Em cada eixo, os resultados empíricos são confrontados com os referenciais teóricos e metodológicos da dissertação, de modo a explicitar tanto as potencialidades quanto os limites do arranjo proposto.

9.2. ADERÊNCIA DO PORTO DE ITAQUI AO MODELO CONCEITUAL DO CP-H₂V

O primeiro aspecto a ser destacado diz respeito à aderência do Porto de Itaqui ao modelo conceitual do Cluster Portuário de Hidrogênio Verde elaborado no Capítulo 6. O modelo concebe o CP-H₂V como um sistema territorial multiescalar composto por uma moldura territorial, uma base natural e territorial, um subsistema de infraestrutura portuária e logística, um núcleo produtivo energético, uma cadeia de consumo e um sistema de governança transversal.

A aplicação desse modelo ao Itaqui evidenciou que o porto se encaixa de forma consistente nessa estrutura: (i) o território portuário e sua retroárea apresentam condições físicas e institucionais relevantes; (ii) a base natural oferece recursos estratégicos (água, potencial solar e eólico) em nível competitivo; (iii) a infraestrutura portuária já opera com forte vocação para granéis líquidos e para integração intermodal; (iv) há espaço para instalação de um núcleo produtivo de hidrogênio verde e de indústrias consumidoras associadas; e (v) existem arranjos incipientes de governança que podem ser mobilizados e ampliados para sustentar o cluster.

Essa aderência confirma a capacidade do modelo conceitual de orientar a leitura territorial e funcional de um porto real, ao mesmo tempo em que evidencia que a consolidação do CP-H₂V em Itaqui dependerá de processos de fortalecimento da governança, de adensamento da cadeia de negócios e de qualificação da regulação.

9.3. CONDIÇÕES NATURAIS E TERRITORIAIS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

A análise da composição natural do território – centrada na disponibilidade e qualidade da água, no potencial de energia renovável e nas restrições ambientais – demonstrou que o Porto de Itaqui dispõe de base físico-ambiental favorável à produção de hidrogênio verde, ainda que sob forte regulação e com limitações que exigem planejamento cuidadoso.

No que se refere à água, os estudos apontaram a existência de potencial de água subterrânea e de recarga direta, bem como a possibilidade de combinação com alternativas como dessalinização de água do mar em cenários específicos. Essa disponibilidade, contudo, é condicionada por outorgas de uso, conflitos potenciais com outros usuários e requisitos de qualidade para eletrólise, o que reforça a necessidade de planejamento integrado de recursos hídricos.

Quanto à energia, os mapas de irradiação solar e de velocidade dos ventos evidenciam que a região de Itaqui possui alto potencial para geração fotovoltaica e eólica, tanto *onshore* quanto *offshore*. Esse potencial torna tecnicamente viável o suprimento de eletricidade renovável para a produção de hidrogênio verde em escala, mas coloca desafios em termos de disponibilidade de áreas, competição com outros usos do solo e custos de implantação de parques renováveis, especialmente em contextos de elevada sensibilidade ambiental.

A análise das restrições ambientais mostrou um quadro complexo, marcado pela presença de unidades de conservação, áreas de preservação permanente, manguezais e zonas costeiras frágeis. A sobreposição entre essas áreas e a poligonal portuária indica que a implantação do cluster deve seguir uma lógica de “encaixe fino” no território, com seleção de áreas menos sensíveis, adoção de tecnologias de menor impacto e desenho de medidas compensatórias robustas. Assim, os resultados reforçam a pertinência da abordagem territorial adotada, que não toma o H₂V como projeto apenas tecnológico, mas como processo de reconfiguração do território sob fortes condicionantes ambientais.

9.4. INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA, CONECTIVIDADE LOGÍSTICA E ENQUADRAMENTO NORMATIVO

No plano infraestrutural, a caracterização da composição não natural evidenciou que o Porto de Itaqui se encontra em posição relativamente avançada para receber um cluster de hidrogênio verde. Os dados de capacidade instalada, tipos de carga movimentada e especialização em graneis líquidos mostraram que o porto já dispõe de berços, dutos internos, sistemas de bombeamento e áreas de tanques que dialogam diretamente com as exigências da cadeia de hidrogênio e derivados.

A análise da rede logística e de transporte destacou ainda a presença de malha ferroviária integrada, rodovias com ligações estratégicas à *hinterlândia* e hidrovias que ampliam o

raio de influência do porto para além do estado do Maranhão, conectando Itaqui às principais regiões produtoras de commodities agrícolas e minerais do país. Essa configuração reforça o papel do porto como nó de redistribuição de fluxos em escala nacional e internacional, o que potencializa o cluster como plataforma de exportação de H₂V e derivados.

Em paralelo, o levantamento do arcabouço normativo – especialmente o Plano Diretor de São Luís e o PDZ do Porto – indicou que o território possui instrumentos de planejamento capazes de oferecer suporte jurídico à implantação do cluster, ainda que com necessidade de ajustes e atualizações. As análises de macrozoneamento, zoneamento portuário, áreas arrendadas e arrendáveis mostraram que existe espaço legal e físico para acomodar novas plantas industriais e logísticas, desde que o cluster seja enquadrado como projeto estruturante em alinhamento com as diretrizes de desenvolvimento urbano e portuário.

Esse conjunto de resultados evidencia que Itaqui já dispõe de uma base infraestrutural e normativa relevante, mas que a efetivação do CP-H₂V exigirá: (i) investimentos coordenados em ampliação e modernização da infraestrutura; (ii) ajustes regulatórios para priorizar o cluster nas agendas setoriais; e (iii) fortalecimento da articulação interinstitucional entre município, estado, União, autoridade portuária e setor privado.

9.5. ESTRUTURAÇÃO DA CADEIA DE NEGÓCIOS E POTENCIAL DE ADENSAMENTO PRODUTIVO

A segunda etapa do método, voltada à agregação de valor, evidenciou que o hidrogênio verde pode funcionar como atividade âncora de uma cadeia de negócios capaz de reorganizar e adensar a estrutura produtiva associada ao Porto de Itaqui. A identificação dos elos a montante (fornecedores de equipamentos, serviços técnicos, geração renovável), da atividade âncora (planta de H₂V), dos segmentos a jusante (indústrias consumidoras, logística, exportação) e dos elos de apoio (finanças, P&D, certificação, qualificação) permitiu visualizar o cluster como um sistema relacional e não como empreendimento isolado.

Os resultados mostraram que, embora Itaqui apresente base significativa em atividades logísticas e em cadeias de graneis, há ainda uma lacuna importante em termos de indústrias transformadoras de maior valor agregado e de serviços intensivos em conhecimento relacionados ao hidrogênio verde. Essa incompletude indica que a simples instalação da planta âncora não garante, por si só, o adensamento produtivo e a permanência de valor no território; são necessárias políticas explícitas de atração de indústrias complementares, apoio à inovação, formação de mão de obra e fortalecimento de serviços de apoio especializados.

Ao mesmo tempo, a análise da demanda territorial e da *hinterlândia* apontou um conjunto de setores com potencial imediato ou mediato de consumo de hidrogênio e derivados – como logística pesada, transporte marítimo, indústrias eletrointensivas e cadeias agroindustriais – o que sugere margem concreta para construção de uma demanda off-take

diversificada. Essa evidência reforça o argumento central da dissertação de que a viabilidade do cluster depende da estruturação de uma cadeia de negócios completa, na qual o H₂V atua como eixo de reorganização territorial e produtiva.

9.6. IMPACTOS URBANOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS DO CLUSTER PROPOSTO

A terceira etapa do método, dedicada à análise de impactos, permitiu discutir de forma mais ampla os efeitos potenciais da implantação do CP-H₂V em Itaqui sobre o território urbano, a sociedade e o meio ambiente. A partir de indicadores como pegada de carbono, participação de energia renovável, possibilidade de certificação ambiental, geração de empregos qualificados, diversificação produtiva e impactos sobre infraestruturas urbanas, foi possível delinear um quadro de oportunidades e riscos associados ao cluster.

Do ponto de vista ambiental, os resultados indicam potencial significativo de redução de emissões, especialmente quando o hidrogênio verde é utilizado para descarbonizar operações portuárias, transporte marítimo e cadeias industriais intensivas em energia. A possibilidade de certificação e de geração de créditos de carbono posiciona o cluster como ativo relevante em mercados verdes, reforçando sua atratividade para financiadores e investidores.

No plano urbano e social, o cluster tende a funcionar como vetor de reconfiguração do uso do solo, de intensificação de fluxos e de reestruturação das relações porto-cidade, com efeitos positivos em termos de emprego, renda e arrecadação, mas também com riscos de conflitos socioambientais, pressão sobre serviços urbanos e acentuação de desigualdades se não houver mecanismos de governança inclusivos. A literatura mobilizada e os dados analisados indicam que esses riscos só podem ser adequadamente geridos por meio de arranjos institucionais robustos, que articulem planejamento urbano, regulação ambiental, política industrial e participação social.

Assim, a análise de impactos reforça o caráter ambivalente do cluster: ele é, ao mesmo tempo, oportunidade de transição energética e de desenvolvimento urbano-regional e fonte potencial de novas pressões e conflitos, caso não seja acompanhado por instrumentos adequados de gestão territorial, ambiental e social.

9.7. TÓPICOS CONCLUSIVOS

A discussão e análise dos resultados do estudo de caso do Porto de Itaqui permitem afirmar que: (i) o modelo conceitual do CP-H₂V mostrou-se aderente à realidade empírica; (ii) o método em três etapas foi capaz de organizar, de forma coerente, o processo de leitura territorial, estruturação da cadeia de negócios e avaliação de impactos; e (iii) Itaqui reúne condições concretas para se constituir em cluster portuário de hidrogênio verde, desde que sejam enfrentados os desafios identificados.

Os resultados confirmam que a concepção de um cluster portuário de hidrogênio verde não pode ser tratada como mera decisão tecnológica ou de engenharia, mas como um projeto de reestruturação territorial que envolve recursos naturais, infraestruturas complexas, marcos regulatórios, cadeias produtivas e arranjos de governança. A tese central que emerge é que a competitividade e a sustentabilidade de um CP-H₂V dependem da capacidade de articular esses elementos em uma lógica sistêmica, territorializada e orientada à descarbonização e ao desenvolvimento urbano e regional.

CAPÍTULO 10. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FINAIS

10.1. SÍNTESE DA TRAJETÓRIA DA PESQUISA

A dissertação partiu do desafio de conceber um cluster portuário de hidrogênio verde como instrumento de articulação entre transição energética, planejamento territorial e desenvolvimento urbano-regional. Ao longo do trabalho, foram discutidos os fundamentos teóricos de clusters e cadeias de negócio, o papel dos portos na economia contemporânea, as especificidades tecnológicas e regulatórias do hidrogênio verde e, por fim, foi proposto um modelo conceitual para o Cluster Portuário de Hidrogênio Verde (CP-H₂V), acompanhado de um método para sua aplicação em contextos territoriais concretos. Esse percurso culminou no estudo de caso do Porto de Itaquí, que serviu como campo empírico para testar a coerência e a aplicabilidade da proposta.

A estrutura da pesquisa articulou três eixos centrais: (i) a construção de um referencial teórico capaz de integrar clusters, portos, hidrogênio verde e cadeia de negócios; (ii) o desenvolvimento de um modelo conceitual multiescalar do CP-H₂V, organizado em camadas territoriais, produtivas e institucionais; e (iii) a formulação de um método em etapas para o desenho de clusters portuários de hidrogênio verde, aplicado ao caso de Itaquí. Com isso, a dissertação buscou não apenas descrever um fenômeno emergente, mas oferecer instrumentos analíticos e operacionais para orientar políticas públicas, planejamento portuário e decisões de investimento.

10.2. ALCANCE DOS OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO

O objetivo geral – conceber um cluster portuário de hidrogênio verde e analisar seus impactos urbanos, sociais e ambientais, a partir de um modelo conceitual e de um método aplicados a um estudo de caso – foi alcançado. A pesquisa conseguiu: estruturar um modelo conceitual de CP-H₂V que articula território, base natural, infraestrutura portuária, núcleo produtivo energético, cadeia de consumo e governança; desenvolver um método em três etapas (identificação de oportunidades, agregação de valor e análise de impactos) para orientar o desenho de clusters; e aplicar esse aparato ao Porto de Itaquí, produzindo um diagnóstico detalhado e uma proposta de arranjo clusterizado. Como contribuições principais, destacam-se:

- A tradução da literatura de clusters, cadeias de negócio e engenharia territorial em um modelo específico para clusters portuários de hidrogênio verde, que considera simultaneamente condicionantes naturais, logísticos, institucionais e produtivos.
- A elaboração de um método estruturado, capaz de organizar o processo de concepção de clusters desde a leitura territorial e normativa até a modelagem produtiva e a avaliação de impactos.
- A demonstração, no estudo de caso, de que a transição energética baseada em hidrogênio verde não é apenas uma questão tecnológica, mas um processo de

reconfiguração territorial que envolve escolhas de uso do solo, desenho de infraestruturas, arranjos de governança e políticas de desenvolvimento.

10.3. VALIDADE E POTENCIAL DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A análise dos resultados do estudo de caso do Porto de Itaqui permite afirmar que a metodologia proposta é válida enquanto instrumento de leitura, concepção e avaliação de clusters portuários de hidrogênio verde. A divisão em etapas e fases mostrou-se adequada para: reduzir incertezas; identificar condicionantes naturais, infraestruturais e normativas; mapear demanda e estrutura produtiva; e, por fim, organizar um arranjo clusterizado coerente com o território analisado.

O método demonstrou capacidade de:

- Integrar diagnósticos ambientais (água, energia renovável, restrições ecológicas) com análises de infraestrutura portuária, conectividade logística e arcabouço normativo.
- Estruturar a cadeia de negócios do hidrogênio verde em torno de uma atividade âncora, de atividades secundárias e de apoio, explicitando lacunas e oportunidades de adensamento produtivo.
- Projetar e discutir impactos urbanos, sociais e ambientais de forma alinhada a métricas de descarbonização, certificações verdes e políticas de transição energética.

Quanto à possibilidade de aplicação em outros portos, a metodologia foi concebida desde o início como um instrumento generalizável. Por estar ancorada em relações estruturais – e não em parâmetros rígidos de um único caso – ela pode ser adaptada a portos de diferentes portes, vocações e contextos regulatórios, sejam eles especializados ou generalistas, em cenários *greenfield* ou de reconversão de áreas já consolidadas. A condição para sua replicação é a recalibração de cada etapa com dados locais, marcos normativos específicos e particularidades da matriz produtiva e energética de cada território portuário.

10.4. SÍNTESE CRÍTICA DO ESTUDO DE CASO DO PORTO DE ITAQUI

O estudo de caso consolidou o Porto de Itaqui como território produtivo estratégico para a implantação de um CP-H₂V. A análise mostrou:

- Condições naturais favoráveis (disponibilidade hídrica, bom potencial solar e eólico), ainda que atravessadas por restrições ambientais que demandam forte controle territorial.

- Uma base infraestrutural avançada, com terminais de granéis líquidos, áreas de tanques e rede dutoviária, articulada a sistemas ferroviários, rodoviários e hidroviários que ampliam o alcance da *hinterlândia*.
- Um enquadramento jurídico-territorial capaz de suportar a implantação de um cluster, desde que haja ajustes para reconhecer o H₂V como projeto estruturante em planos diretores e PDZs.
- Uma demanda potencial significativa, tanto no próprio porto (operações, transporte marítimo) quanto em cadeias produtivas regionais e nas exportações de derivados, reforçando a pertinência do hidrogênio verde como atividade âncora.
- Um conjunto importante de riscos e desafios, relacionados a lacunas na cadeia de negócios (especialmente em atividades de maior valor agregado e serviços intensivos em conhecimento), pressões sobre o uso do solo e necessidade de arranjos de governança robustos e inclusivos.
- Em termos críticos, o estudo evidencia que a implantação de um CP-H₂V em Itaquí não é um processo automático ou linear. Ela pressupõe a construção de condições complementares – institucionais, produtivas, sociais – que extrapolam a esfera do planejamento portuário estrito sensu. Clusters portuários de hidrogênio verde, tal como configurados nesta dissertação, só se consolidam quando políticas industriais, urbanas, ambientais, de inovação e de trabalho convergem em um projeto territorial de longo prazo.

10.5. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como toda pesquisa aplicada a um contexto específico, o estudo apresenta limitações que precisam ser reconhecidas. Entre elas:

- A análise concentrou-se em um único porto, o que, embora permita profundidade, limita a comparação sistemática com outros contextos nacionais e internacionais.
- Alguns aspectos técnicos do hidrogênio verde – especialmente os ligados ao detalhamento de engenharia de processos, modelagem financeira avançada e avaliação quantitativa de risco industrial – foram tratados em nível conceitual, mas não exaustivo.
- A discussão de governança, ainda que presente, foi mais descritiva do que prescritiva, deixando espaço para aprofundamentos futuros sobre modelos de gestão, contratos e arranjos de parceria.
- Essas limitações não invalidam os resultados, mas indicam que a dissertação deve ser entendida como base metodológica e conceitual a ser aprofundada por estudos posteriores.

10.6. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir das evidências e limites identificados, algumas diretrizes se colocam para investigações futuras:

- Riscos e segurança da indústria de produção de hidrogênio verde: É fundamental avançar em análises específicas sobre segurança de processos, cenários de acidente, requisitos de engenharia de segurança, planos de emergência e interação com áreas urbanas próximas. Estudos dedicados à avaliação de risco tecnológico, em diálogo com a legislação de produtos perigosos e diretrizes internacionais de segurança de hidrogênio, são essenciais para complementar a abordagem territorial e ambiental adotada nesta dissertação.
- Modelos de gestão e governança de clusters portuário-energéticos: A competitividade e a sustentabilidade de um CP-H₂V dependem, em grande medida, da qualidade dos arranjos institucionais e dos modelos de gestão adotados. Recomenda-se aprofundar a investigação sobre: formatos de parceria público-privada; papel das autoridades portuárias; mecanismos de coordenação entre diferentes níveis de governo; instrumentos de financiamento e partilha de riscos; e formas de participação social. Esse aprofundamento pode resultar em propostas de modelos de governança específicos para clusters de hidrogênio verde em portos.
- Avaliação dos impactos econômico-financeiros do cluster portuário de hidrogênio verde: Recomenda-se o aprofundamento de estudos voltados à modelagem econômica detalhada do CP-H₂V, contemplando estimativas de CAPEX (investimentos iniciais em infraestrutura portuária, plantas industriais e sistemas energéticos), OPEX (custos operacionais associados à produção, armazenamento e logística do hidrogênio e seus derivados), bem como projeções de receitas, estrutura de financiamento e retorno sobre investimento. Além disso, investigações futuras podem incorporar análises de impactos fiscais e tributários nos níveis municipal, estadual e federal, incluindo geração de arrecadação, efeitos multiplicadores sobre a economia regional e contribuição para o desenvolvimento local. Essa abordagem permitirá consolidar a viabilidade econômica do modelo proposto, complementando as dimensões urbana, social e ambiental exploradas nesta dissertação.
- Comparação entre portos e diferentes contextos territoriais: Estudos comparativos, aplicando o método proposto a outros portos brasileiros e internacionais, podem contribuir para testar os limites e a robustez da metodologia, bem como para identificar tipologias de clusters portuários de hidrogênio verde associadas a diferentes combinações de recursos naturais, infraestrutura e marcos regulatórios. Tais pesquisas podem também incorporar modelagens quantitativas de cenários de demanda, custos, receitas, empregos e impactos fiscais, ampliando a dimensão preditiva da abordagem.
- Integração entre planejamento portuário, urbano e energético: Finalmente, recomenda-se aprofundar o diálogo entre campos disciplinares – arquitetura e urbanismo, engenharia portuária, economia da energia, direito regulatório – visando construir instrumentos integrados de planejamento. Clusters portuários de hidrogênio verde, como argumentado ao longo da dissertação, só se tornam

efetivamente transformadores quando entendidos como parte de uma estratégia mais ampla de cidade, região e sistema energético.

10.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um cenário global marcado pela urgência da descarbonização e pela reconfiguração das cadeias produtivas, portos tendem a desempenhar um papel cada vez mais central, seja como emissores de alto impacto, seja como plataformas de transição energética. Ao propor um modelo conceitual e um método para a concepção de clusters portuários de hidrogênio verde, testados no contexto do Porto de Itaqui, esta dissertação procura contribuir para que essa transição não seja apenas tecnológica, mas também territorialmente consciente, socialmente responsável e institucionalmente sólida.

O trabalho não encerra o debate; ao contrário, pretende abrir um campo de investigação e de prática em que portos, cidades e territórios possam ser pensados como laboratórios vivos da transição energética, em que o hidrogênio verde é um vetor, mas a finalidade última continua sendo a construção de espaços mais sustentáveis, inclusivos e competitivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. A. Poluição ambiental em áreas portuárias: desafios e estratégias de gestão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 5, n. 1, p. 101–118, 2012.

ABREU, M. A.; et al. **Impactos Ambientais da Expansão Portuária nas Cidades Costeiras**. São Paulo: Editora FGV, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2025**. Brasília: ANA, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de informações de geração (SIGA)**. Brasília: ANEEL, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). *Anuário estatístico aquaviário 2018*. Brasília: ANTAQ, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). *Anuário estatístico aquaviário 2024*. Brasília: ANTAQ, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). **Anuário Estatístico Aquaviário 2023: Desempenho dos Portos Brasileiros**. Brasília: ANTAQ, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Síntese semanal de preços dos combustíveis: edição 08/2025**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/arq-sintese-semanal/2025/fevereiro/sintese-precos-n08.pdf>. Acesso em: fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Síntese semanal de preços dos combustíveis: edição 07/2025**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/arq-sintese-semanal/2025/fevereiro/sintese-precos-n07.pdf>. Acesso em: fev. 2025.

ARAGÃO, Joaquim José Guilherme de; YAMASHITA, Yaeko. **Projetos urbanos e impactos econômicos: estratégias para clusters produtivos**. Brasília: Editora UnB, 2019.

ARCOS, J. M. M.; SANTOS, D. M. **The hydrogen color spectrum: techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production**. *Gases*, v. 3, n. 1, p. 25–46, 3 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/gases3010002>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. Boletim Anual de Geração Eólica 2024. São Paulo: ABEEólica, 2025. Acesso em: 9 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes: 2022–2024. São Paulo: ANDA, 2024. Acesso em: 23 nov. 2025.

AUDRETSCH, D. B.; FELDMAN, M. P. **Knowledge Spillovers and the Geography of Innovation.** The Handbook of Regional and Urban Economics, v. 4, p. 2713-2739, 2004.

BELFORT, R. S.; MENDES, L. M. Avaliação da qualidade da água subterrânea em área urbana da Ilha de São Luís (MA). *Revista Aracê*, v. 7, n. 2, p. 1–15, 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024–2025: relatório pleno. Brasília: ANA, 2025. Acesso em: 2 out. 2025.

BRASIL. Decreto nº 8.027, de 1881. Estabelece normas para a administração e exploração dos portos nacionais.

BRASIL. Lei nº 12.815, de 2013. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários.

BRASIL. Lei nº 8.630, de 1993. Dispõe sobre o regime jurídico da exploração dos portos organizados e das instalações portuárias.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050). Brasília: MAPA, 2022. Acesso em: 16 out. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima – PNA: estratégia de implementação e monitoramento. Brasília: MCTI, 2023. Acesso em: 19 set. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Programa Nacional do Hidrogênio: diretrizes, governança e plano de trabalho trienal 2023–2025. Brasília: MME/CNPE, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-e-biocombustiveis/hidrogenio/pnh2>. Acesso em: 18 jan. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. *Plano Nacional de Logística Portuária – PNLP.* Brasília: MTPA, 2017.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. *Plano Mestre do Complexo Portuário do Itaquí.* Brasília: MTPA, 2018.

BRITO, Marcelo; SILVA, Giovanna. **Protagonismo tecnológico nos portos do século XXI: integração sistêmica e competitividade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

REGIÕES PORTUÁRIAS, 5., 2019, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABTP, 2019. p. 112–124. Acesso em: 8 jun. 2025.

CÉLERIER, P. **Portos e Terminais Marítimos**. Rio de Janeiro: Interciência, 1962.

COSTA, Ana Paula. Infraestrutura portuária: características, desafios e oportunidades. **Revista de Administração Portuária**, v. 18, n. 2, p. 45-62, 2020.

COSTA, M. Gestão Portuária e Infraestrutura de Fundeadouros. **Revista Brasileira de Logística**, v. 18, n. 2, p. 55-74, 2020.

COSTA, M.; ALMEIDA, T. **Capacitação Profissional e a Eficiência Operacional dos Portos Brasileiros**. Engenharia de Transportes, v. 19, n. 4, p. 88-110, 2021.

COSTA, M.; ALMEIDA, T. **Infraestrutura Portuária e Estratégias de Expansão**. Engenharia de Transportes, v. 18, n. 2, p. 75-98, 2019.

COSTA, M.; FERREIRA, L. Expansão Portuária e os Desafios da Infraestrutura de Acessos no Brasil. **Revista de Transporte e Logística**, v. 20, n. 2, p. 75-96, 2020.

COSTA, M.; FERREIRA, L. Tecnologias Disruptivas e a Transformação Digital no Setor Portuário. **Revista de Transporte e Logística**, v. 21, n. 2, p. 88-112, 2022.

COSTA, M.; OLIVEIRA, T. Modelos de Governança Portuária: Impactos na Eficiência Logística. **Revista Brasileira de Infraestrutura**, v. 18, n. 2, p. 112-135, 2022.

CRUZ, L.; LEAL, R.; PINHO, T. *Sustentabilidade e Eficiência Energética em Clusters Portuários*. **Revista Brasileira de Logística**, v. 12, n. 3, p. 67-92, 2016.

CUMMINS. Combustíveis alternativos, com emissões de carbono baixas ou zero. Disponível em: <https://www.cummins.com/pt/generators/alternative-fuels>. Acesso em: 28 jun. 2025.

CUTRIM, Sérgio Sampaio. **Planejamento e governança portuária: uma análise do sistema brasileiro**. 2017. 280 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Acesso em: 20 maio 2025.

DANTAS, E. Gestão portuária e desenvolvimento urbano: desafios e perspectivas. **Revista de Logística**, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2016.

DE LANGEN, P. *Port Clusters and Economic Development*. **Maritime Economics & Logistics**, v. 5, n. 2, p. 141-155, 2003.

DE LANGEN, P. W. Clusters in Maritime Transport and Logistics: An Analysis of the Cluster Formation Process. **International Journal of Transport Economics**, v. 30, n. 1, p. 99–116, 2003.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS EUA (DOE). **Estudos do Departamento de Energia dos EUA (DOE) sobre combustíveis renováveis**. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel>. Acesso em: 1 ago. 2024.

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. **Planning future power systems**. *Energy Research & Social Science*, v. 35, p. 22–34, 2018. Acesso em: 17 jul. 2025.

DUCRUET, C. *The Port-City Interface: Social and Economic Impacts*. *Journal of Transport Geography*, v. 19, n. 4, p. 567-577, 2011.

ELIMELECH, M.; PHILLIP, W. A. **The future of seawater desalination**. *Science*, Washington, v. 333, n. 6043, p. 712–717, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas eólico brasileiro**. Brasília: EPE, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano decenal de expansão de energia 2032**. Brasília: EPE, 2023.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA (EMAP). **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa – Ciclo 2024**. São Luís: EMAP, 2025.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA (EMAP). *Movimentação de Cargas – 2025*. São Luís: EMAP, 2025.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA (EMAP). **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto do Itaqui**. São Luís: EMAP, 2021.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA (EMAP). **Plano de descarbonização do Porto do Itaqui**. São Luís: EMAP, 2025.

ENDRESS+HAUSER PORTUGAL. *Produção segura de amônia verde*. Disponível em: <https://www.pt.endress.com/pt/industrias/industria-quimica/amonia-verde>.

EUROPEAN COMMISSION. EU taxonomy for sustainable activities: technical screening criteria for climate change mitigation. Brussels: European Commission, 2021. Acesso em: 13 set. 2025.

FERREIRA, J. A. Clusters portuários: desafios e perspectivas no Brasil. *Revista de Logística e Transporte*, v. 8, n. 2, p. 34–51, 2021.

FERREIRA, J. Portos e Desenvolvimento Logístico: Uma Abordagem Integrada. *Revista Brasileira de Infraestrutura*, v. 16, n. 3, p. 55-79, 2020.

FERREIRA, J.; OLIVEIRA, R. **Planejamento e Expansão de Retroportos: Desafios e Oportunidades**. Engenharia de Transportes, v. 14, n. 3, p. 85-112, 2019.

FERREIRA, L.; LIMA, R. Planejamento Portuário e sua Influência na Cadeia Logística Global. **Estudos Marítimos**, v. 20, n. 1, p. 88-110, 2021.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

FIGUEIREDO, B. B.; CÉSAR, F. I. G. Hidrogênio como fonte alternativa de combustível automotivo: uma pesquisa bibliográfica exploratória. **ACERTTE**, v. 1, n. 6, p. e1649–e1649, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/acertte.v1i6.49>. Acesso em: 27 ago. 2025.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. *Tamanho do mercado de amônia verde, participação da indústria*. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/pt/green-ammonia-market-105642>. Acesso em: 20 mar. 2025.

GLAESER, E. **Triumph of the City: How Our Greatest Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier**. Penguin Press, 2011.

GROENEVELD, M. E. **Introduction to Electrochemistry**. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 143, p. 182–186, 1996. Disponível em: <https://iopscience.iop.org>. Acesso em: 5 maio 2025.

HAEZENDONCK, E. **Essays on Port Economics and Policy**. Routledge, 2001.

HAEZENDONCK, E. **Essays on Strategy Analysis for Seaports**. Leuven: Garant, 2001.

HIRATA, Ricardo C. A.; ZOBBI, Juliana; SUHOGUSOFF, Alexandre; FERNANDES, André J. **Águas subterrâneas no Brasil: fundamentos hidrogeológicos, uso e proteção**. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 2019. Acesso em: 11 nov. 2025.

HOLST, M.; ASCHBRENNER, S.; SMOLINKA, T.; VOGLSTÄTTER, C.; GRIMM, G. **Cost forecast for low-temperature electrolysis – technology-driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems: a cost analysis on behalf of Clean Air Task Force**. 2021. Disponível em: <https://www.cleanairtaskforce.org>. Acesso em: 18 nov. 2025.

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY. Hydrogen insights 2023: an update on the state of the global hydrogen economy, with a deep dive into North America. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.hydrogencouncil.com>. Acesso em: 21 out. 2025.

IAPTEL. Hidrogênio verde como fonte de energia sustentável. Disponível em: <https://www.iaptel.com/hidrogenio-verde>. Acesso em: 3 abr. 2025.

IEMA – INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE; INSTITUTO E+. Desafios e oportunidades para o Brasil com o hidrogênio verde. São Paulo: Instituto E+, 2021. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/publicacoes/desafios-e-oportunidades-para-o-brasil-com-o-hidrogenio-verde>. Acesso em: mar. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global hydrogen review 2022**. Paris: IEA, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global hydrogen review 2023**. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Hydrogen Technology Roadmap: Progress and Prospects. 2021**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-technology-roadmap>.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal**. Abu Dhabi: IRENA, 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable power generation costs in 2022**. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

I-REC FOUNDATION. I-REC Standard: The International Attribute Tracking Standard for Renewable Electricity. Version 3.0. Amsterdam: I-REC Foundation, 2022. Acesso em: 7 ago. 2025.

KUMAR, S. S.; LIM, H. **An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production**. Energy Reports, v. 8, p. 13793–13813, 2022. Acesso em: 9 abr. 2025.

LI, D. et al. **Emerging polymer electrolyte membranes for electrochemical energy applications**. Energy & Environmental Science, v. 14, p. 3374–3401, 2021. Disponível em: <https://pubs.rsc.org>. Acesso em: 22 set. 2025.

LIMA, G.; SANTOS, M. **Infraestrutura Portuária e Impactos na Logística Global**. Engenharia de Transportes, v. 23, n. 3, p. 98-115, 2021.

LIMA, L. M. et al. **Energy: reducing greenhouse emissions and reaching goals**. Energy Policy, v. 112, p. 181–192, 2020. Acesso em: 14 out. 2025.

MADUREIRA, Edward Brasil; MEDINA, Gabriel; GUIMARÃES RIBEIRO, Gessyane. Participação do capital brasileiro na cadeia produtiva da soja: lições para o futuro do

agronegócio nacional. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v. 13, n. 1–2–3, p. 1–36, 2015. Acesso em: 4 jun. 2025.

MARQUES, A. C.; LOURENÇO, P. M.; GASI, C. **Main sources of electricity generation in Brazil**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 105, p. 223–234, 2019. Acesso em: 2 set. 2025.

MARSHALL, A. **Principles of Economics**. Macmillan, 1890.

MARTINS, A. **Clusters Portuários e Competitividade Regional**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MARTINS, P. **Desenvolvimento Portuário e Exclusão Social: O Caso dos Portos Brasileiros**. São Paulo: Annablume, 2013.

MILLER, H. A. et al. **A comprehensive techno-economic review and analysis of PEM water electrolysis**. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 4, p. 2114–2133, 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org>. Acesso em: 3 out. 2025.

MONIÉ, Frédéric; VIDAL, Soraia Maria do Socorro Carvalho. Cidades, portos e cidades portuárias na era da integração produtiva. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 6, p. 975–995, nov./dez. 2006. DOI: 10.1590/S0034-76122006000600004.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rap/a/sJ58WbxPncB9H8dQhsgmtNS/?lang=pt>

MONIOS, J.; WILMSMEIER, G. **Maritime Clusters and the Role of Ports in Sustainable Development**. *Maritime Economics & Logistics*, v. 23, n. 1, p. 75-93, 2021.

MONTEIRO, C. A. **Dinâmicas urbanas e expansão portuária: impactos e estratégias de planejamento**. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, v. 17, n. 33, p. 141–160, 2015.

MONTEIRO, C. F. **Os Portos e o Desenvolvimento Urbano: Um Estudo Comparativo de Impactos**. São Paulo: EDUSP, 2015.

NONATO, Marcos Paulo de Assis Teixeira. **Identificação de oportunidades territoriais de negócios voltadas para promoção do desenvolvimento local e regional**. 2025. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2025.

NOTTEBOOM, T.; RODRIGUE, J. P. **Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development**. *Maritime Policy & Management*, v. 32, n. 3, p. 297-313, 2005.

NOTTEBOOM, T.; RODRIGUE, J. P. **Sustainable Port Development and the Role of Emerging Technologies**. *Maritime Economics & Logistics*, v. 24, n. 1, p. 58-83, 2021.

OECD. **The competitiveness of global port cities**. Paris: OECD Publishing, 2014. Disponível em: <https://www.oecd.org/daf/industryandservices/competitiveness-of-global-port-cities.htm>. Acesso em: 16 maio 2025.

OLIVEIRA, João Paulo. **Estruturas portuárias: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Atlas, 2020.

OLIVEIRA, T.; ALMEIDA, F. **Inovação e Infraestrutura Portuária: O Impacto das Novas Tecnologias na Logística Global**. Engenharia de Transportes, v. 19, n. 3, p. 78-101, 2023.

OLIVEIRA, T.; MENDES, R. **A Integração dos Acessos Terrestres e Hidroviários na Eficiência Portuária**. Estudos Portuários, v. 19, n. 3, p. 103-127, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (UNIDO). **Global hydrogen in ports and industrial clusters**. Vienna: UNIDO, 2023.

OSMAN, M. B.; TIERNEY, J. E.; ZHU, J.; TARDIF, R.; HAKIM, G. J.; KING, J.; POULSEN, C. J. **Globally resolved surface temperatures since the last glacial maximum**. Nature, v. 599, p. 239–244, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31223/X5S31Z>. Acesso em: 4 dez. 2025.

PORTER, M. **Clusters and the New Economics of Competition**. Harvard Business Review, v. 76, n. 6, p. 77-90, 1998.

PORTER, M. **The Competitive Advantage of Nations**. New York: Free Press, 1998.

PORTER, Michael; KRAMER, Mark. **Creating shared value**. Harvard Business Review, v. 89, n. 1, p. 62-77, 2011.

RIPPEL, Ricardo. Os encadeamentos produtivos de um complexo agroindustrial: um estudo de caso da Frigobrás Sadia de Toledo e das empresas comunitárias. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995. Acesso em: 11 fev. 2025.

RODRIGUE, J-P. **The Geography of Transport Systems**. 5. ed. Routledge, 2020.

RODRIGUE, J-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. **The Geography of Transport Systems**. 3. ed. New York: Routledge, 2013.

SANTOS, P.; OLIVEIRA, R. Desafios e Oportunidades na Modernização dos Portos Brasileiros. **Revista de Logística Portuária**, v. 19, n. 4, p. 102-127, 2020.

SANTOS, R.; LIMA, F. Eficiência Operacional e Sustentabilidade na Construção de Píeres Portuários. **Revista Brasileira de Infraestrutura**, v. 19, n. 3, p. 103-129, 2020.

SCHROPP, M.; THOMAS, A.; KIM, J. **Green hydrogen from anion exchange membrane electrolysis**. *Applied Energy*, p. 122247, 2024. Acesso em: 12 dez. 2025.

SHANNON, M. A. et al. **Science and technology for water purification in the coming decades**. *Nature*, London, v. 452, p. 301–310, 2008.

SILVA, João Batista; ALMEIDA, Maria Clara. Operações portuárias e segurança na navegação. **Revista de Engenharia Naval**, v. 15, n. 3, p. 101-120, 2021.

SILVA, João Batista; COSTA, Ana Paula. Elementos constitutivos da infraestrutura portuária: estudo de caso do Complexo Portuário da Baía de Todos os Santos. **Revista Brasileira de Logística**, v. 10, n. 1, p. 77-95, 2021.

SILVA, P.; COSTA, R. **Impacto da Containerização na Infraestrutura Retroportuária Brasileira**. *Logística e Desenvolvimento*, v. 17, n. 4, p. 112-135, 2020.

SILVA, P.; MARTINS, R. Green Ports e Sustentabilidade na Infraestrutura Portuária Brasileira: Desafios e Perspectivas. **Revista Internacional de Engenharia Costeira**, v. 20, n. 2, p. 112-138, 2022.

SILVA, R. N. M. et al. **Recarga de água subterrânea na Ilha do Maranhão e a demanda necessária – 2010 a 2040**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luís. **Anais...** São Luís: ABAS, 2010.

SILVA, R.; LIMA, F. Sustentabilidade e Otimização dos Portos Brasileiros: Um Estudo Sobre Retroportos. **Revista Brasileira de Infraestrutura**, v. 21, n. 3, p. 98-120, 2021.

SMITH, J.; DOE, A.; JOHNSON, M. Green Hydrogen Production: Current Technologies and Future Perspectives. **Renewable Energy Journal**, v. 45, n. 3, p. 567–589, 2021.

SOUSA, M.; FICHE, A.; SATO, R. Inovação e Digitalização nos Portos Brasileiros: Tendências e Desafios. **Revista de Infraestrutura Portuária**, v. 19, n. 4, p. 78-103, 2023.

SOUZA, H. **Sustentabilidade na Infraestrutura Portuária: O Caso dos Portos Brasileiros**. *Estudos em Transporte e Logística*, v. 22, n. 2, p. 55-78, 2017.

SOUZA, M. A. **A modernização dos clusters portuários no Brasil: uma análise crítica**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SPRINGER-HEINZE, Andreas. **Manual de gestão de cadeias de valor para o desenvolvimento sustentável de setores econômicos**. Eschborn: GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2018.

STORPER, M. **The Regional World: Territorial Development in a Global Economy**. Guilford Press, 1997.

TALLEY, W. K. **Port Economics**. Routledge, 2009.

UNIÃO EUROPEIA. *The EU hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Bruxelas: Comissão Europeia, 2020.

VASCONCELLOS, M.; DUARTE, F. (2010). Impactos Sociais e Ambientais da Expansão Portuária no Brasil. **Revista de Estudos Urbanos e Regionais**, 7(3), 145-160.

WORLD BANK; SOLARGIS. **Global Solar Atlas 2.0**. Washington, DC: World Bank Group, 2024. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info>. Acesso em: 2024.

YAMASHITA, Y; ARAGÃO, J; JESUS, P; PEREIRA, E. **Estruturação de Cadeias de Negócio para a dinamização econômica de municípios de agronegócio: esboço de uma metodologia**. 2025. DOI:10.13140. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377529877_Estruturação_de_Cadeias_de_Negócio_para_a_dinamização_econômica_de_municípios_de_agronegócio_esboço_de_uma_metodologia. Acesso em: 5 de fevereiro de 2025.

ANEXOS

ANEXO A – Cálculo de demanda de Hidrogênio para Amônia Verde

Cálculo da Demanda de Hidrogênio e Nitrogênio

Quantidade desejada de Amônia Verde (kg)

245670,00

- +

Eficiência do processo produtivo de Amônia Verde (%)

63

- +

Calcular

Resultados

Hidrogênio

69.072,27kg

Quantidade de Hidrogênio necessária (kg)

Nitrogênio

320,73 ton

Quantidade de Nitrogênio necessária (ton)

Usando o método Haber-Bosch

Fonte: Plataforma de Simulação *MIPSYSTEM* (Nectere, 2026)

ANEXO B – Cálculo de demanda de Hidrogênio para HVO

Cálculo da Demanda de Hidrogênio e Ácido Oleico

Quantidade desejada de HVO (litros)

291796,00

- +

Densidade HVO (g/mL)

0,780

- +

Eficiência do processo produtivo de HVO (%)

80

- +

Calcular

Resultados

Hidrogênio

6.776,82 kg

Quantidade de Hidrogênio necessária (kg)

Ácido Oleico

315.796,22 kg

Quantidade de Ácido Oleico necessária (kg)

Fonte: Plataforma de Simulação *MIPSYSTEM* (Nectere, 2026)

ANEXO C – Cálculo de insumo para produção de Hidrogênio Verde

Inserir dados:

Quantidade desejada de Hidrogênio Verde (kg/h)

76660,00 - +

Calcular

Área **Consumo** Sub produtos Resíduos Planta

Insumos

Quantidade de água necessária (L/h)

689940.0

Quantidade de energia necessária (MW)

3833.0

Fonte: Plataforma de Simulação *MIPSYSTEM* (Nectere, 2026)

ANEXO D – Área dos eletrolisadores requerida

Inserir dados:

Quantidade desejada de Hidrogênio Verde (kg/h)

 - +

Calcular

Área Consumo Sub produtos Resíduos Planta

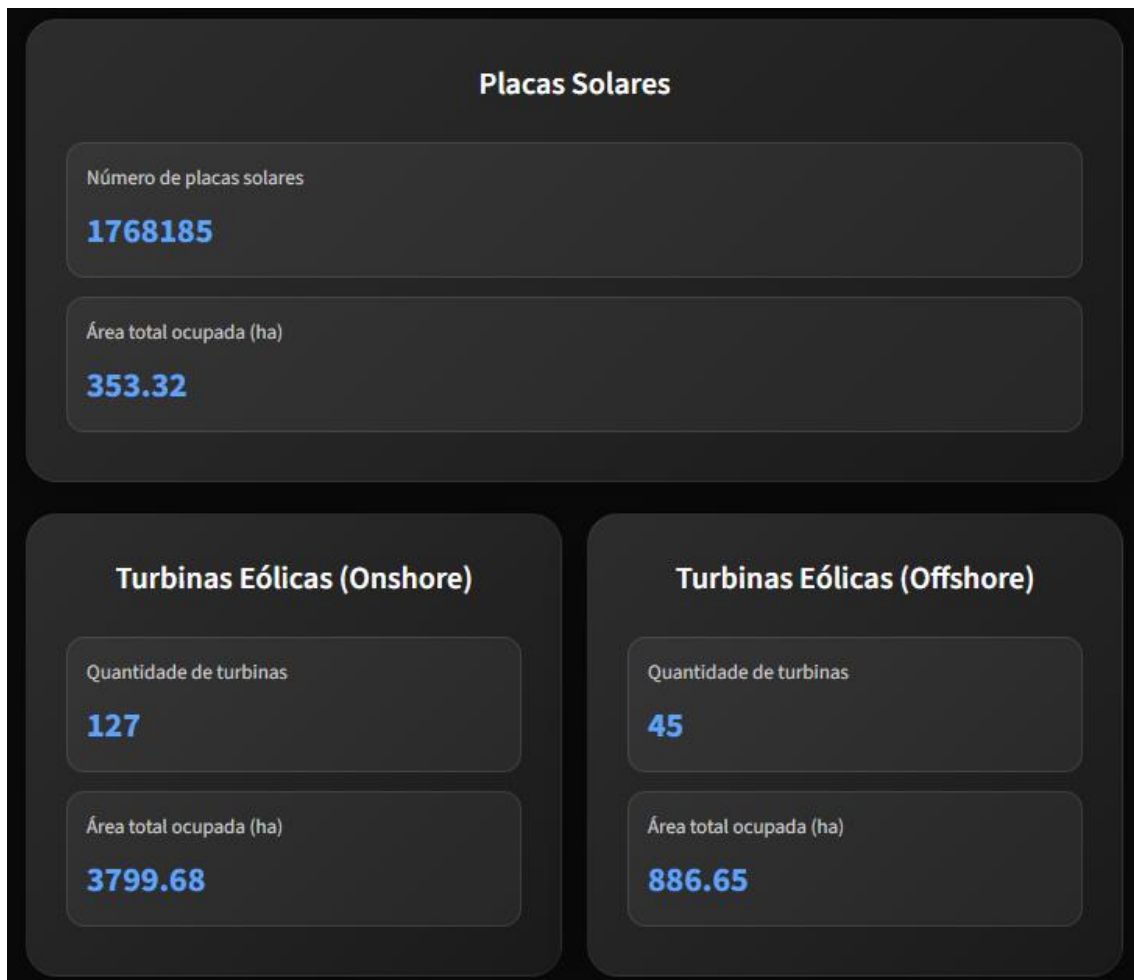
Eletrolisadores

Área dos eletrolisadores requerida (m²)

2553.34

Fonte: Plataforma de Simulação *MIPSYSTEM* (Nectere, 2026)

ANEXO E – Infraestrutura energética necessária



Fonte: Plataforma de Simulação *MIPSYSTEM* (Nectere, 2026)

ANEXO F – Cálculo da redução de CO₂ do HVO em relação ao Diesel fóssil

Defina o volume do tanque para Volume personalizado (L)

291796,00

- +

Dados dos veículos e volumes:

Volume personalizado: 1 unidades, Volume total: 291796.0 L

Redução nas emissões de CO₂ do HVO em relação ao Diesel fóssil (%)

85

- +

CO₂ emitido por kg/Diesel (kg)

3,20

- +

Eficiência do processo produtivo de HVO (%)

85

- +

Fonte: Plataforma de Simulação *MIPSYSTEM* (Nectere, 2026)