



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS  
MECÂNICAS

RAÍZA CELEGHIN BENEDECTI

**REDUÇÃO DE CONGESTIONAMENTO EM RETROÁREAS  
PORTUÁRIAS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE OS IMPACTOS DOS  
BOLSÕES DE ESTACIONAMENTO PARA CAMINHÕES USANDO  
MODELAGEM BASEADA EM AGENTES**

JOINVILLE

2026

Raíza Celeghin Benedecti

**REDUÇÃO DE CONGESTIONAMENTO EM RETROÁREAS PORTUÁRIAS:  
UM ESTUDO DE CASO SOBRE OS IMPACTOS DOS BOLSÕES DE  
ESTACIONAMENTO PARA CAMINHÕES USANDO MODELAGEM BASEADA EM  
AGENTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dra. Eng. Vanina Macowski Durski Silva

Coorientador: Dr. Eng. Gustavo Adolfo Alves da Costa

Joinville

2026

Ficha de identificação da obra

Celeghin Benedecti, Raíza

Redução de congestionamento em retroáreas portuárias : um estudo de caso sobre os impactos dos bolsões de estacionamento para caminhões usando modelagem baseada em agentes / Raíza Celeghin Benedecti ; orientadora, Vanina Macowski Durski Silva , coorientador, Gustavo Adolfo Alves da Costa, 2026.

87 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Simulação baseada em agentes. 3. Cadeia logística portuária. 4. Gerenciamento de congestionamento. 5. Eficiência operacional. I. Macowski Durski Silva , Vanina. II. Adolfo Alves da Costa, Gustavo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Raíza Celeghin Benedecti

**Redução de congestionamento em retroáreas portuárias:** um estudo de caso sobre os impactos dos bolsões de estacionamento para caminhões usando modelagem baseada em agentes

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Pedro Paulo Andrade Jr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Camila Avosani Zago.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

---

Prof. Dr. Roberto Simoni  
Coordenador(a) do Programa

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Eng. Vanina Macowski Durski Silva  
Orientadora

Joinville, 4 de março de 2026.

## AGRADECIMENTOS

A conclusão desse trabalho é fruto de um esforço em conjunto e do apoio de muitas mãos e mentes que cruzaram meu caminho durante este mestrado.

Gostaria de agradecer primeiramente a UFSC Joinville e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) por permitir meu desenvolvimento desde a graduação e pela oportunidade de aprofundar ainda mais meu conhecimento. Aos meus orientadores Prof.<sup>a</sup> Dra. Eng. Vanina Macowski Durski Silva e Dr. Eng. Gustavo Adolfo Alves da Costa por todo apoio desde a minha graduação, incentivo ao estudo, ensinamentos e conhecimento compartilhado. Obrigada por toda contribuição, disponibilidade e por serem tão presentes na minha trajetória. Aos professores Dr. Pedro Paulo Andrade Jr. e Dra. Camila Avosani Zago, obrigada pelas discussões e contribuições e por aceitarem fazer parte da minha qualificação e banca.

Obrigada também ao Porto Itapoá (Suzane, Mário, Luiz, Jeferson, John, Allesta, Alana, André, João, Patrícia, Felipe) por toda abertura e sempre aceitarem participar das discussões e por contribuírem ativamente no desenvolvimento deste estudo, auxiliando com dados, direcionamento e validação do modelo, fazendo com que este estudo seja de impacto e esteja mais próximo possível da realidade.

Aos meus familiares, pelo amor incondicional, por entenderem minha ausência e me apoiarem em minhas decisões. Aos meus pais, Ilka e Douglas por todo incentivo e por serem minha rede de apoio nos momentos que mais precisei. Ao meu namorado, Fernando, por toda compreensão, suporte e acreditar em mim. Aos meus irmãos, cunhadas e cunhados, sobrinhos, sogra, sogro, tia Vânia e amigos por deixarem essa trajetória sempre mais leve e alegre. À minha companheira fiel, Kiki, que esteve ao meu lado dias e noites adentro enquanto enfrentava o desafio do desenvolvimento de cada cenário de simulação.

À UACS e meus colegas de trabalho por incentivarem o aprofundamento do conhecimento e me apoiarem nessa jornada (Nick, Mia e Murilo).

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Esta dissertação é o reflexo de um ciclo de intenso aprendizado, paciência e resiliência.

## RESUMO

O comércio internacional é fundamental para a economia brasileira, representando 23,5% do PIB em 2024. Nesse cenário, o Porto de Itapoá emerge como um fator-chave, movimentando cerca de 8,75% dos contêineres no Brasil no mesmo período. Com a previsão de dobrar sua capacidade anual de movimentação até 2033, surge uma pressão crescente sobre a infraestrutura da retroárea do porto, exigindo soluções de gerenciamento de congestionamento e melhoria da fluidez das operações. Esta dissertação tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um modelo de simulação baseada em agentes para avaliar a fluidez do tráfego de caminhões em retroáreas portuárias. Implementado no AnyLogic®, o modelo é aplicado como estudo de caso ao Porto de Itapoá, em Santa Catarina, Brasil, com o intuito de analisar a eficiência operacional da infraestrutura existente e propor uma intervenção física que otimize o fluxo de veículos: um bolsão de estacionamento. A partir da comparação de desempenho de cenários simulados, buscou-se identificar os impactos da implantação do bolsão utilizando indicadores de Tempo Total de Ciclo, Emissão de CO<sub>2</sub>, Velocidade de Operação na Retroárea, entre outros. Os resultados revelam que a infraestrutura pode ser capaz de reduzir em 49,7% o Tempo Total de Ciclo enquanto evita a emissão de 563,3 tons de CO<sub>2</sub> por ano e aumenta a velocidade média dos caminhões de 10km/h para 50km/h para a movimentação prevista no cenário pós-expansão do Terminal. O modelo desenvolvido visa fornecer subsídios para o planejamento estratégico da retroárea portuária, contribuindo para decisões mais eficazes, sustentáveis e alinhadas às demandas crescentes do setor logístico.

**Palavras-chave:** Simulação Baseada em Agentes. Infraestrutura Portuária. Retroárea. Congestionamento. Bolsão de Estacionamento.

## ABSTRACT

International trade is fundamental to the Brazilian economy, representing 23,5% of 2024 national Gross Domestic Product. In this scenario, Port Itapoá emerges as a key player, handling about 8,7% of containers in Brazil in the same period. Given the projected doubling of its annual handling capacity, there is increasing pressure on the infrastructure of the port's hinterland, requiring congestion management solutions to improve fluidity of operations. This master dissertation project aims to present the development of an agent-based simulation model to evaluate the fluidity of truck traffic in port hinterlands. The model is applied to the study case of Port Itapoá, located in Santa Catarina, Brazil, with the purpose of analyzing the operational efficiency of the existing infrastructure and proposing an intervention to optimize vehicle flow: a truck parking facility by assessing the Total Cycle Time, CO<sub>2</sub> Emission, Operating Speed in the Hinterland, among others. The results reveal that the infrastructure is able to reduce Total Cycle Time by 49.7% while avoiding the emission of 563.3 tons of CO<sub>2</sub> per year and increases the average speed of trucks from 10km/h to 50km/h for the post-expansion scenario. The proposed model aims to provide subsidies for the strategic planning of the port hinterland, contributing to more effective, sustainable decisions aligned with the growing demands of the logistics sector.

**Keywords:** Agent-Based Simulation. Port Infrastructure. Hinterland. Congestion. Truck Parking Facility.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Proporção da movimentação dos portos de SC em relação aos outros portos no Brasil em TEUs (2024). .....	17
Figura 2 – Top 10 terminais portuários em movimentação de contêineres em 2024 em milhões de TEUs. ....	17
Figura 3 – Crescimento da movimentação anual de contêineres no Porto Itapoá em milhões TEUs (2020-2024). ....	18
Figura 4 – Fluxo da carga através das infraestruturas e agentes da cadeia logística portuária. ....	27
Figura 5 – Ciclo logístico do contêiner .....	33
Figura 6 – Bolsão de estacionamento do terminal portuário de Paranaguá-PR. ....	15
Figura 7 – Bolsão de estacionamento de Rotterdam-Holanda. ....	15
Figura 8 – Métodos de modelagem e seus níveis de abstração. ....	35
Figura 9 – Fluxograma da metodologia.....	40
Figura 10 – Resultado de cada etapa da revisão bibliográfica realizada baseada no método PRISMA. ....	41
Figura 11 – Zona portuária atual, área de expansão e retroárea do Porto Itapoá. ....	43
Figura 12 – Rodovias federal, estaduais e local de acesso ao Porto Itapoá.....	44
Figura 13 – Caminhões estacionados ao longo do meio-fio da Estrada José Alves na retroárea do Porto Itapoá. ....	45
Figura 14 - Modelo conceitual – Exportação – Modelo base.....	47
Figura 15 - Modelo conceitual – Importação – Modelo base.....	48
Figura 16 - Modelo conceitual – Exportação – Modelo intervenção .....	50
Figura 17 - Modelo conceitual – Importação – Modelo Intervenção. ....	51
Figura 18 – Mapa térmico de concentração das infraestruturas que compõem a retroárea do Porto Itapoá e apoiam suas operações. ....	54

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Artigos sobre simulação aplicada à logística portuária com foco no congestionamento da retroárea portuária.....	37
Quadro 2 – Cenários e modelos conceituais.....	46
Quadro 3 – Premissas adotadas no modelo. ....	56
Quadro 4 – Cenários implementados no AnyLogic®. ....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Movimentação de contêiner diária futura do Porto Itapoá pós-expansão.....	60
Tabela 2 – Comparação de resultados: Tempo Total de Ciclo (Modelos 1a e 2a).....	62
Tabela 3 – Comparação de resultados: Horas Inativas (Modelos 1a e 2a).....	63
Tabela 4 – Comparação de resultados: tamanho médio das filas (Modelos 1a e 2a).....	63
Tabela 5 - Comparação de resultados: Caminhões simultaneamente na retroárea (Modelos 1a e 2a). .....	64
Tabela 6 – Comparação de resultados: Velocidade de Operação na Retroárea (Modelos 1a e 2a). .....	64
Tabela 7 – Comparação de resultados: Viagens Concluídas (Modelos 1a e 2a).....	64
Tabela 8 – Comparação de resultados: Tempo Total de Ciclo (Modelos 1f e 2f).....	65
Tabela 9 – Comparação de resultados: Horas Inativas (Modelos 1f e 2f).....	65
Tabela 10 – Comparação de resultados: tamanho médio das filas (Modelos 1f e 2f).....	65
Tabela 11 – Comparação de resultados: Caminhões Simultaneamente na Retroárea (Modelos 1f e 2f). .....	66
Tabela 12 – Comparação de resultados: Velocidade de Operação na Retroárea (Modelos 1f e 2f). .....	66
Tabela 13 – Comparação de resultados: Viagens Concluídas (Modelos 1f e 2f).....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CNI	Confederação Nacional da Indústria
FCL	Full Container Load)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICT	Inland Contair Terminal
LCL	Less Than Container Load
NTBS	Painel de Segurança Nacional de Transporte dos Estados Unidos
NVOCC	Non Vessel Operating Common Carrier
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PIB	Produto Interno Bruto
RFID	Radio Frequency Identification
RTG	Rubber Tyred Gantry Crane
SC	Santa Catarina
TEU	<i>Twenty-Foot Equivalent Unit</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS.....	20
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>20</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>21</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	21
1.2.1	<b>Justificativas Operacional e Econômica.....</b>	<b>22</b>
1.2.2	<b>Justificativas Ambiental e Social.....</b>	<b>22</b>
1.2.3	<b>Justificativa Acadêmica .....</b>	<b>23</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	23
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
2.1	CADEIA LOGÍSTICA PORTUÁRIA.....	25
2.2	INFRAESTRUTURA DA RETROÁREA PORTUÁRIA.....	29
2.2.1	<b>Terminal portuário.....</b>	<b>30</b>
2.2.2	<b>Depot.....</b>	<b>31</b>
2.2.3	<b>Armazém e centro de distribuição .....</b>	<b>34</b>
2.2.3	<b>Bolsão de estacionamento .....</b>	<b>36</b>
2.2.4	<i>Inland Terminal.....</i>	<i>15</i>
2.3	SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES .....	34
2.3.1	<b>Simulação aplicada à modelagem de cadeias logísticas portuárias .....</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>40</b>
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
3.2	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO .....	42
3.2.1	<b>Caracterização do problema .....</b>	<b>42</b>
3.2.2	<b>Modelo conceitual.....</b>	<b>45</b>
3.2.3	<b>Coleta e processamento de dados.....</b>	<b>52</b>
3.2.4	<b>Mapa térmico.....</b>	<b>52</b>

<b>3.2.5</b>	<b>Definição da abordagem e ferramenta .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Implementação no AnyLogic®.....</b>	<b>56</b>
3.2.6.1	Representação agregada do terminal portuário .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>62</b>
4.1	MODELOS 1A E 2A (DADOS ATUAIS, 2025) .....	62
4.2	MODELOS 1F E 2F (DADOS FUTUROS, 2033).....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>71</b>
<b>ANEXO A – Macrozoneamento de Itapoá (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPOÁ, 2016b).....</b>		<b>78</b>
<b>ANEXO B – Sistema viário urbano de Itapoá (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPOÁ, 2016c) .....</b>		<b>79</b>

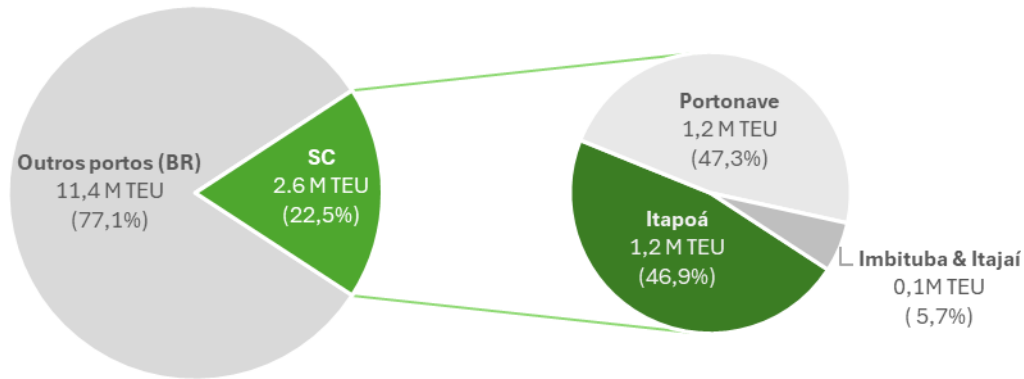
## 1 INTRODUÇÃO

O comércio internacional está diretamente relacionado com o desenvolvimento dos países, já que oferece a possibilidade de integração econômica, cultural e social. A atividade é reconhecida por contribuir para o desenvolvimento socioeconômico devido ao potencial gerador de emprego e renda, além de proporcionar acesso a recursos externos para empresas se tornarem mais competitivas no mercado global (TAVARES, 2013; MUNIM, SCHRAMM 2018).

A relevância do comércio internacional na economia brasileira pode ser notada por sua participação no Produto Interno Bruto. Em 2024 o PIB do Brasil foi de R\$11,7 tri (IBGE, 2025) (ou US\$ 2,1 trilhões), sendo o comércio internacional responsável por movimentar 13,5% e 10,5% do PIB em exportações e importações respectivamente (ou US\$337,0 bilhões e US \$262,9 bilhões) já descontado taxas e fretes (MDIC, 2025). Da exportação e importação total em 2024, o modal marítimo foi responsável por movimentar 88,5% e 74,1% (ou US\$298,1 bilhões e US\$194,8 bilhões) já excluindo taxas e fretes (MDIC, 2025).

Neste contexto, os portos assumem um importante papel na economia local e global, orquestrando vários tipos de carga com operações complexas (DAYA; AUDY, 2024). Em 2024, 13,9 milhões TEU (*Twenty-Foot Equivalent Unit*) foram movimentados por portos públicos e privados no Brasil, sendo o estado de Santa Catarina (SC) responsável por 2,6 milhões TEU (18,0%) (ANTAQ, 2025). SC conta com 4 portos movimentadores de contêineres: Porto Itapoá em Itapoá, Portonave em Navegantes, Porto de Imbituba em Imbituba e o Complexo Portuário de Itajaí em Itajaí. A Figura 1 ilustra os volumes e proporções da movimentação de contêineres em 2024 por cada um dos portos de SC, tendo Porto Itapoá responsável por 46,9% dos contêineres movimentados pelo estado (ou 1,2 milhões de TEUs) (ANTAQ, 2025).

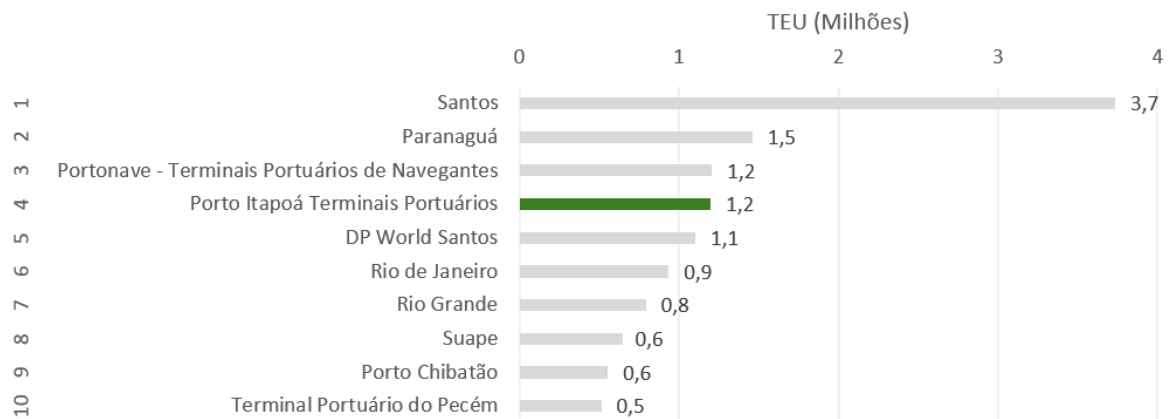
Figura 1 – Proporção da movimentação dos portos de SC em relação aos outros portos no Brasil em TEUs (2024).



Fonte: Adaptado de ANTAQ (2025).

Com substancial representatividade em SC, o Porto Itapoá é também relevante no cenário nacional. A Figura 2 mostra que no mesmo ano o porto foi o quarto maior movimentador de carga containerizada, ficando atrás apenas do Complexo Portuário de Santos, Portonave e Porto de Paranaguá.

Figura 2 – Top 10 terminais portuários em movimentação de contêineres em 2024 em milhões de TEUs.

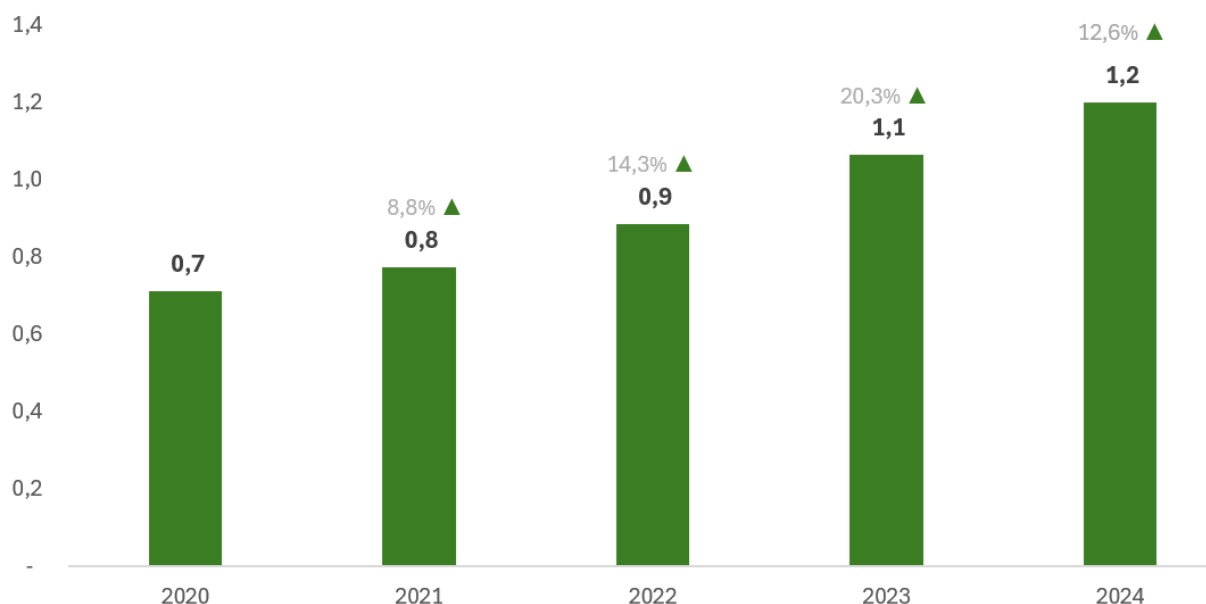


Fonte: Adaptado de ANTAQ (2025).

No período de 2020 a 2024 o Porto Itapoá apresentou consistente crescimento nas suas movimentações (Figura 3), tendo em 2022 e 2023 aumentos significativos em relação aos anos anteriores. Ainda, em 2023 o Porto Itapoá foi o terminal de contêineres de uso privado com maior crescimento de movimentações no Brasil em relação ao ano anterior, com este valor

chegando a 20,3% (PORTO ITAPOÁ, 2024). Este aumento se dá principalmente devido ao projeto de expansão do porto. Tal projeto é composto por 3 fases e teve início em 2016, com a terceira fase iniciada no primeiro semestre de 2024 e com o investimento de R\$ 750 milhões somente nesta última etapa (ISTOÉ, 2024). Ao final de sua ampliação prevista para 2033, o porto irá contar com um dos maiores pátios de contêineres do Brasil, com 455.000m<sup>2</sup> e capacidade de movimentar o dobro de contêineres que movimenta atualmente. O projeto conta não somente com a ampliação do pátio, mas também com a construção de um armazém de 8.000m<sup>2</sup>, ampliação do píer e berços de atracação, além da aquisição de grandes equipamentos, como *rubber tyred gantry crane* (RTG) (PORTO ITAPOÁ, 2024; ISTOÉ, 2024).

Figura 3 – Crescimento da movimentação anual de contêineres no Porto Itapoá em milhões TEUs (2020-2024).



Fonte: Adaptado de ANTAQ (2025).

Ainda, Dantas (2023) e Pacheco (2023) revelam que, em 2023, a empresa APM Terminals, pertencente ao grupo MAERSK – um dos maiores armadores do mundo –, não renovou a concessão com o Porto de Itajaí devido à restrição de área física para expansão. Adicionalmente, o terminal está situado em uma região que abriga uma das rodovias mais congestionadas do Brasil, o que constitui um significativo limitador operacional. Dantas (2023) aponta que importadores e exportadores já estão redirecionando suas cargas para o porto vizinho, Portonave, em Navegantes – SC. No entanto, o Porto Itapoá tende a ser o principal terminal a absorver essas movimentações, tornando-se um destino natural para novos investimentos em logística e armazéns.

Em 2022, Silva *et al.* (2022a) identificaram a infraestrutura da retroárea do Porto Itapoá como um potencial limitador operacional, devido à escassez de empresas estabelecidas na região. Adicionalmente, a retroárea não dispõe de áreas de espera e/ou estacionamento para caminhões, resultando no acúmulo de veículos pesados parados ao longo das vias. Desta forma, a combinação do aumento no fluxo de contêineres, da dependência exclusiva do modal rodoviário, das vias de acesso simples ao terminal e da falta de infraestrutura na retroárea intensifica a pressão sobre a infraestrutura existente e das vias de acesso ao porto. Esse cenário levanta preocupações relevantes em relação ao congestionamento, eficiência de operação e às emissões de gases do efeito estufa.

De acordo com Yildirim (2022), a expansão de um terminal não deve abranger apenas o planejamento de redimensionamento das áreas de armazenagem e de atracação, mas também a análise de capacidade de transporte da rede de infraestrutura presente em sua retroárea e o acesso aos portões do terminal. Silva *et al.* (2022a) explicam que a falta ou escassez de infraestrutura na retroárea portuária impacta diretamente na fluidez de operação do terminal portuário, já que inviabiliza a movimentação de cargas, implicando em maiores custos logísticos aos clientes.

Embora o projeto de expansão seja essencial para as operações do Porto Itapoá atenderem à novas e futuras demandas, como a atracação de navios maiores e aumento previsto do volume de contêineres, ressalta-se a importância do planejamento da infraestrutura de sua retroárea e de suas vias de acesso para atender o fluxo intensificado de contêineres. Os aumentos registrados no volume de contêineres de 14,3% em 2022, 20,3% em 2023 e 12,3% em 2024 já refletem diretamente no fluxo de caminhões na retroárea do Porto Itapoá, intensificando o congestionamento. De acordo com funcionário de empresa de armazenagem e transporte atuante na retroárea, em dias de operação com maior demanda, a fila de caminhões pode se estender até o acesso ao município de Garuva, resultando em uma extensão que alcança aproximadamente 10 km.

A falta de fluidez na retroárea dos terminais portuários representa uma ameaça para a eficiência operacional e para o desenvolvimento desses terminais (XU *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2019). Dantas (2023) e Gracia *et al.* (2017) afirmam que o consequente congestionamento além de implicar em custos adicionais significativos para a logística, pode acabar por direcionar o tráfego para rotas e portos alternativos, agravando os desafios logísticos e econômicos. Além disso, dos efeitos negativos causados pelo congestionamento em portos, pode significar mais retenção de contêineres, atrasos, desordem nas operações, gestão complicada da cadeia de

suprimentos e contribui substancialmente para problemas sérios de poluição do ar (ZHOU; GE, 2018; XU *et al.*, 2019; XU *et al.* 2021). Daya e Audy (2024) afirmam que a capacidade dos portos é determinada por diversos fatores, tais como a disponibilidade de berços de atracação, habilidade de gerenciar o fluxo de caminhões, a eficiência do acesso aos portões e o desempenho geral do transporte de cargas, sendo o congestionamento no acesso aos portões um dos principais desafios operacionais. Os autores destacam ainda que a eficiência operacional da cadeia logística portuária é frequentemente limitada pelo elo menos eficiente, seja pela insuficiência de capacidade necessária em função do aumento do fluxo de caminhões e volume de carga, ou por ineficiências operacionais.

Dada a importância estratégica do Porto Itapoá no cenário estadual e nacional, o crescente nível de congestionamento em sua retroárea — intensificado pelo aumento projetado nas movimentações de contêineres — evidencia a urgência de um planejamento mais eficaz da infraestrutura de acesso e circulação de caminhões e que a ausência de intervenções estruturais pode comprometer a eficiência operacional do terminal e sua competitividade logística. Neste contexto, esta dissertação tem como objetivo investigar e propor um bolsão de estacionamento para caminhões como uma alternativa de infraestrutura física que dê suporte às operações na retroárea com foco na fluidez do tráfego. Portanto, esta pesquisa busca responder à seguinte questão: *Qual a atual infraestrutura na retroárea do Porto Itapoá e qual o impacto da implantação de um bolsão de estacionamento no gerenciamento de tráfego de caminhões e na eficiência operacional de movimentação de contêineres?*

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de simulação baseada em agentes para avaliar a fluidez operacional da infraestrutura rodoviária na retroárea do Porto Itapoá. O modelo permitirá mensurar indicadores relacionados ao nível de congestionamento, eficiência operacional e emissões de gases de efeito estufa. A partir da simulação de diferentes cenários, busca-se criar uma ferramenta de apoio ao planejamento da retroárea e das vias de acesso ao terminal, possibilitando a análise dos impactos de intervenções estruturais na retroárea do Porto Itapoá — como a implantação de um bolsão de estacionamento — sobre a eficiência e sustentabilidade de suas operações.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais *stakeholders* da cadeia logística do Porto Itapoá e mapear a infraestrutura atualmente disponível em sua retroárea;
- Realizar coleta de dados *in loco* sobre os serviços existentes na retroárea e conduzir reuniões com *stakeholders* para compreender as operações e identificar gargalos logísticos;
- Avaliar geograficamente e estrategicamente a retroárea, visando a identificação de locais adequados para implantação de áreas de apoio aos caminhões e oportunidades de melhorias na infraestrutura atual;
- Desenvolver um modelo de simulação baseada em agentes que represente o cenário atual da infraestrutura rodoviária da retroárea do Porto Itapoá, incluindo empresas de apoio logístico, como armazéns e *depots*.
- Desenvolver um modelo de simulação baseada em agentes que represente a intervenção na infraestrutura com a inclusão de um bolsão de estacionamento para caminhões para avaliar seus impactos sobre a fluidez operacional do terminal.
- Utilizar a aplicação de ambos os modelos em dois cenários: com dados atuais de movimentação anual de contêiner (2025) e com dados futuros, prevendo movimentação pós projeto de expansão (2033).
- Comparar os resultados dos cenários simulados com base em indicadores de congestionamento, nível de serviço do terminal portuário e emissão de gases do efeito estufa; a fim de identificar as estratégias mais eficazes para tornar as operações do Porto de Itapoá mais eficientes e sustentáveis

### 1.2 JUSTIFICATIVA

Esta dissertação propõe-se a enfrentar desafios práticos e operacionais vivenciados no contexto do Porto Itapoá, ao mesmo tempo em que busca contribuir para o avanço do conhecimento científico na área de logística portuária. O estudo apresenta potencial para gerar impactos positivos tanto na gestão estratégica do terminal quanto no desenvolvimento sustentável da região em que está inserido. A abordagem combina aplicação prática e rigor

acadêmico, oferecendo subsídios para decisões que buscam eficiência logística. Os fundamentos operacionais, econômicos, sociais, ambientais e científicos são detalhados nas subseções a seguir.

### **1.2.1 Justificativas Operacional e Econômica**

Zhou e Ge (2018) afirmam que uma retroárea com falta de fluidez de operação acaba por limitar a capacidade do terminal em movimentar contêineres. Dado o crescimento do volume das movimentações de contêineres do Porto Itapoá somado à expectativa de crescimento para os próximos anos, à falta de planejamento de sua retroárea e à atual pressão sobre a infraestrutura existente, constata-se a necessidade de estudar intervenções na infraestrutura e vias de acesso, prevenindo a disrupção das operações e auxiliando no desenvolvimento econômico sustentável do terminal nos próximos anos.

Dado ao fato que terminais portuários se tornam menos competitivos quando não são capazes de proporcionar o nível de serviço esperado (FLEMING *et al.*, 2013), estudos de intervenção na infraestrutura na retroárea de Itapoá podem proporcionar vantagem competitiva ao terminal ao propor um uso mais eficiente de recursos limitados, fazendo com que o aumento já esperado na demanda seja absorvido sem disrupções na operação. A vantagem competitiva advém da redução de custos e dos tempos de espera e respostas, que são garantidos quando se estabelece melhor fluidez das atividades desempenhadas através da infraestrutura da retroárea e minimização das ineficiências (SOUSA JR *et al.*, 2013).

Tais aspectos garantem não somente uma vantagem competitiva ao terminal portuário, mas permitem também maior movimentação de carga, potencializando assim sua capacidade operacional e crescimento econômico sustentável. Dada a relevância nacional do Porto Itapoá, seu crescimento econômico sustentável propicia crescimento de atividades econômicas e atração de novos investimentos para o município, estado e país.

### **1.2.2 Justificativas Ambiental e Social**

A carência de infraestrutura adequada na retroárea portuária compromete a fluidez operacional e intensifica o congestionamento de caminhões. Esse cenário não apenas aumenta o volume de tráfego em áreas urbanas próximas aos portos, como também está relacionado a maiores índices de acidentes e a sérios impactos ambientais, como a poluição do ar e sonora

(GAO *et al.*, 2019). Nesse contexto, retroáreas bem estruturadas, com capacidade para absorver filas e organizar o fluxo de caminhões, contribuem diretamente para a segurança da comunidade local e para a mitigação dos efeitos negativos associados ao transporte de carga. A presente dissertação propõe medidas de intervenção na infraestrutura da retroárea do Porto Itapoá com o objetivo de melhorar a fluidez das operações e direcionar o tráfego de veículos pesados para áreas apropriadas. Essa abordagem reduz a circulação de caminhões no perímetro urbano, representando uma alternativa concreta para mitigar os impactos ambientais e sociais nas regiões adjacentes ao porto.

### **1.2.3 Justificativa Acadêmica**

Esta dissertação contribui para o avanço do conhecimento na área de logística portuária ao destacar a importância de avaliar a fluidez operacional nas retroáreas, considerando as especificidades e demandas de cada terminal. Ao identificar desafios estruturais e operacionais e, propor soluções que conciliam eficiência logística com mitigação de impactos ambientais e sociais, o estudo oferece uma base sólida para pesquisas futuras e decisões práticas no âmbito da gestão portuária.

O tema abordado insere-se em um campo ainda pouco explorado, especialmente no que se refere ao uso de simulação baseada em agentes na avaliação de bolsões de estacionamento para o gerenciamento do congestionamento de caminhões em retroáreas. A pesquisa busca preencher essa lacuna, apresentando estratégias que otimizem o fluxo logístico nas operações portuárias e na cadeia logística como um todo, promovendo um sistema mais eficiente, coordenado e resiliente.

## **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta o tema de estudo, seus objetivos e justificativas, contextualizando a relevância do estudo. O Capítulo 2 aborda o referencial teórico, incluindo a conceituação da cadeia logística portuária, os elementos da infraestrutura retroportuária e revisão bibliográfica sobre o uso de simulação baseada em agentes para avaliação de medidas de redução de congestionamento no contexto logístico portuário.

O Capítulo 3 detalha a metodologia adotada, contemplando a abordagem do problema, os procedimentos da revisão bibliográfica, a ferramenta de simulação utilizada e as etapas de desenvolvimento do modelo. Os resultados são apresentados no Capítulo 4 e a conclusão no Capítulo 5, seguidos das referências utilizadas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são abordados os conceitos relevantes para um amplo entendimento do estudo realizado. Para isso, é apresentado o conceito de cadeia logística portuária, bem como das infraestruturas presentes em retroáreas portuárias e, de simulação, focando para o método da simulação baseada em agentes.

### 2.1 CADEIA LOGÍSTICA PORTUÁRIA

De acordo com Xu *et al.* (2023) e Silva e Novaes (2017), a cadeia logística portuária é considerada parte indispensável do comércio internacional, podendo ser definida como uma cadeia de suprimentos orientada a serviços, tendo a logística de cargas como sua atividade central. Contando com a integração de diversas infraestruturas e agentes envolvidos em atividades de produção, logística e transporte, seu arranjo pode apresentar diversas formas, tornando-se significativamente mais complexa do que uma cadeia de suprimentos da indústria manufatureira, por exemplo (XU *et al.*, 2023, DÉMARE, 2017; HERZ *et al.*, 2014; BAALEN; ZUIDWIJK; NUNEN, 2008).

Entre os agentes envolvidos na cadeia logística portuária, podem ser citados: exportador, agente de carga, *Non Vessel Operating Common Carrier* (NVOCC), *trade company*, empresas de transporte (ferroviário, rodoviário e aquaviário), autoridades portuárias, prestadores de serviços logísticos, autoridades reguladoras, armador e importadores. A infraestrutura, no entanto, depende da existente na região, mas podem ser citados: armazém, centro de distribuição, terminal multimodal, centros logísticos, *depot*, terminal portuário e a infraestrutura de transporte existente (DÉMARE, 2017, BENEDECTI *et al.*, 2024; XU *et al.*, 2023; BAALEN *et al.*, 2008; BEZERRA *et al.*, 2022).

É notável a grande quantidade e heterogeneidade dos agentes e infraestruturas presentes na cadeia logística portuária, e até o desempenho das mesmas atividades de formas diferentes por dois ou mais agentes (DÉMARE, 2017). De forma generalista, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) decompõe a cadeia logística portuária em 5 categorias além dos importadores e exportadores nas extremidades do processo: transporte terrestre, armazenagem, trâmites legais (anuências e aduana), operação portuária e transporte marítimo (CNI, 2016). A Figura 4 ilustra de forma condensada como cada agente coordena o fluxo de carga entre as infraestruturas da cadeia logística portuária presentes na retroárea dos portos. Os números

presentes na Figura 4 representam os agentes: companhias de navegação (1), operadores de terminais (2), companhias prestadoras de serviços logísticos (3), *depot* (4), *inland container terminal* (ICT) (5), importadores (6) e exportadores (7) (BENEDECTI, 2022).

Figura 4 – Fluxo da carga através das infraestruturas e agentes da cadeia logística portuária.



Fonte: Benedecti (2022).

O processo inicia nos trâmites legais com um contrato internacional entre o importador (6) e o exportador (7) (negociação), podendo este ocorrer diretamente entre as duas partes ou com intermediários (NVOCC, agentes de carga ou por uma *trade company*) (BENEDECTI *et al.*, 2024). Responsável pela carga durante o transporte e pelos deveres aduaneiros, o agente intermediário também escolhe um armador. Juntos, estabelecem a rota e custos baseados no volume e peso da carga (DÉMARE, 2017).

Depois dos trâmites legais, a operação em terra se inicia pela coleta do contêiner vazio em um *depot* (4) ou ICT (5), para que este seja estufado (3) com a mercadoria. A estufagem pode ocorrer na planta do próprio exportador ou em um armazém. Assim que estufado, o contêiner é transportado pela malha de transporte presente na região, podendo ser realizada também pelo transporte multimodal. Uma vez no terminal portuário de embarque, o contêiner pode ser transportado até o seu destino pela companhia de navegação (1 a 3). Em seu destino, o contêiner é encaminhado pelo modal disponível para o armazém contratado ou diretamente ao importador, passando por processos de manuseio de carga. Após o descarregamento da mercadoria (3), o contêiner vazio é então devolvido para o *depot* (4) ou ICT (5) para inspeção e reposicionamento (BENEDECTI, 2024).

Os prestadores de serviços logísticos (3) podem atuar em diferentes processos da cadeia logística portuária, fornecendo soluções logísticas como transporte, gerenciamento da carga (consolidação e desconsolidação), estufagem de contêineres através de uma rede de empresas que compõem a infraestrutura retroportuária, cada uma desempenhando atividades específicas. Os prestadores de serviços logísticos são responsáveis pelo gerenciamento desta rede a depender de restrições de eficiência ou da carga, como é o caso de alimentos resfriados (DÉMARE, 2017). Essa rede é o suporte físico da cadeia logística portuária na retroárea dos portos e inclui armazéns, centros de distribuição, *depots*, e centros logísticos (DÉMARE, 2017; BENEDECTI *et al.*, 2024). Esta etapa do processo pode ser inserida nas categorias de transporte terrestre e armazenagem definidas por CNI (2016).

Os terminais portuários possuem um importante papel no comércio internacional ao promover a conexão entre o transporte do lado terrestre e marítimo (XU *et al.*, 2021). O transporte do lado da terra conecta o porto à sua retroárea, integrando atividades logísticas garantindo os sete R's (*rights*) da logística: *right place, right quantity, right condition, right quality, right price, right time and right customer*, ou em português, no lugar certo, na quantidade certa, na condição certa, na qualidade certa, no preço certo, no tempo certo para o cliente certo (DÉMARE, 2017). O transporte do lado da terra pode ocorrer por diferentes

modais a depender da infraestrutura presente na região, podendo contar ainda com intermodalidade (JANOTTI *et al.*, 2012).

As autoridades regulatórias de transporte estão presentes em todas as etapas de transporte da carga, sendo uma específica para cada modal. Ainda, autoridades portuárias e governamentais atuam na fiscalização das atividades desempenhadas nos terminais portuários (SILVA, 2021).

O fluxo de carga através dos elementos de infraestrutura da cadeia logística portuária depende de regras organizacionais, características da carga e ainda limitações operacionais da região. A ausência de uma autoridade central responsável pelo controle total do processo resulta em uma organização descentralizada, exigindo, que os agentes envolvidos colaborem e estejam fortemente conectados para construir um fluxo consistente para atender demanda dos clientes (DÉMARE, 2017). Devido à essa necessidade de sincronicidade e sinergia, Herz e Flämig (2014) destacam que a competição não ocorre entre portos isoladamente, mas entre as cadeias logísticas as quais esses portos pertencem e com base em suas capacidades de atender aos requisitos dos clientes importadores e exportadores.

Nadi *et al.* (2022) destacam que ineficiências operacionais que comprometem as operações dos terminais portuários podem se originar da ausência de planejamento e alinhamento das atividades desempenhadas na retroárea, bem como da falta conectividade desta com o porto. Entre os fatores limitantes, podem ser mencionados o congestionamento, o aumento de custos e os tempos elevados de espera de resposta (NADI *et al.*, 2022; SOUSA JR *et al.*, 2013). Além disso, Nadi *et al.* (2022) afirmam que o estabelecimento de uma conexão eficiente entre a retroárea e o terminal portuário pode ser abordado sob duas perspectivas: a expansão da infraestrutura física e/ou a implementação de uma conexão digital para o compartilhamento de informações.

## 2.2 INFRAESTRUTURA DA RETROÁREA PORTUÁRIA

Exceto as atividades de carregamento e descarregamento de navios, as demais atividades da cadeia logística portuária não necessitam ser desempenhadas dentro dos terminais portuários (SILVA, 2022). Para o autor, desta forma, empresas de diferentes ramos de atuação se estabelecem nas proximidades dos terminais a fim de complementarem a operação, formando a retroárea. Abourraja *et al.* (2018) explicam que a atratividade de um terminal portuário não depende somente de suas qualidades náuticas, mas principalmente da conectividade e volume

que sua retroárea é capaz de movimentar. Considerada por Démare (2017) como o coração dos processos e fluxos, a retroárea atua como interface entre o terminal portuário e o meio urbano, oferecendo estoques locais terceirizados e possibilitando entrega rápida das cargas aos importadores, evitando escassez de estoque. No entanto, para que sua função de *buffer* funcione adequadamente, a retroárea precisa ser bem estruturada e organizada (DÉMARE, 2017).

Definida por Notteboom *et al.* (2022) como o local em terra onde o terminal portuário mantém suas relações comerciais, a infraestrutura da retroárea varia de acordo com o tipo de carga movimentada, sua sazonalidade, ciclos econômicos, inovações tecnológicas, políticas regionais e modais disponíveis. É comum, por exemplo, que certas cargas líquidas e a granel dependam diretamente de um porto específico para suas operações de comércio e transporte. Isso ocorre porque as condições econômicas, geográficas ou logísticas fazem com que a movimentação de cargas seja restrita a esse porto ou região, sem viabilidade econômica de utilizar outros terminais. Assim, para os autores supracitados a competitividade de um terminal portuário deriva diretamente das oportunidades que sua retroárea oferece e de acessibilidade.

Nesta seção são definidos elementos de infraestrutura encontrados em retroáreas portuárias. Estes elementos incluem empresas, que se diferem pelo tipo de serviço prestado, e infraestruturas de transporte. Assim, as definições de terminal portuário, *depot*, armazém e centro de distribuição, bolsão de estacionamento e *inland terminal* serão apresentadas nas subseções. As infraestruturas mencionadas impactam diretamente na fluidez de operação na retroárea, refletindo na eficiência operacional do terminal.

### **2.2.1 Terminal portuário**

Notteboom *et al.* (2022) definem terminais portuários como uma área de trânsito por onde mercadorias e pessoas se movem de e para o mar, sendo um local de convergência entre o transporte marítimo de longo curso e outros modais. Capaz de conectar o interior ao transporte marítimo, os terminais portuários proporcionam a interação entre cadeias logísticas globais e mercados regionais de produção e mercado.

Terminais portuários são definidos por Abourraja *et al.* (2018) como sistemas dinâmicos e distribuídos, onde cargas podem ser recebidas por diferentes modais (ferrovia, rodovia, aéreo e aquático) e passam por um conjunto de operações de manuseio (transferência, transporte e empilhamento) executado por diferentes tipos de equipamentos internos (guindastes, empilhadeiras, *reach stackers*, *portainers*) e com o objetivo de serem entregues

pontualmente ao seu destino. Segundo Da Silva *et al.* (2023) e Sousa Jr (2013), os terminais portuários são atores centrais na cadeia logística com a responsabilidade de não só monitorar e coordenar fluxo de cargas, mas também de gerenciá-la, incluindo atividades aduaneiras, alfandegárias, tributárias e sanitárias. Herz e Flämig (2014) consideram os terminais portuários pontos críticos na cadeia logística devido à diversidade de serviços logísticos oferecidos e à sua função comercial relevante para a região. Ao mesmo tempo que são considerados um grande acelerador econômico regional, podem apresentar riscos significativos em casos de disrupções, dado seu papel relevante na eficiência da cadeia logística em que está inserido (GONZÁLEZ-RAMÍREZ *et al.*, 2013; HERZ, FLÄMIG, 2014; RAJAMANICKAM, RAMADURAI, 2015).

De acordo com Notteboom *et al.* (2022), os terminais portuários desempenham um papel fundamental no comércio desde as primeiras civilizações, preservando suas funções essenciais apesar das inovações tecnológicas. Os terminais portuários podem ser seccionados em três principais áreas: marítima, de pátio e terrestre (FLEMING *et al.*, 2013). Suas atividades, no entanto, podem ser categorizadas em: operações de entrada e saída de embarcações no canal de acesso, atracação e desatracação, operações de transferência no cais ao longo do berço (carregamento e/ou descarregamento), armazenamento, e operações de transferência da carga do pátio para o destino final (BRASIL, 2015; RAJAMANICKAM, RAMADURAI, 2015). Estas são desempenhadas independentemente da classificação dos terminais portuários — que pode ser baseada no volume anual de carga movimentada, gestão (pública ou privada), localização geográfica ou tipo de carga (contêiner, carga geral, líquida, seca, granel ou *roll-on-roll-off*).

Essas atividades podem ser consideradas ainda subsistemas interdependentes que devem ser otimizados de forma decomposta a fim de se obter uma operação eficiente: alocação de berços, empilhamento de contêiner, planejamento do pátio, operação do portão de entrada, entre outros (KULKARNI *et al.*, 2018). Neste sentido, as operações portuárias podem ser consideradas uma das tarefas mais complexas na indústria de transporte e sua eficiência afeta a cadeia logística portuária como um todo (FLEMING *et al.*, 2013; RAJAMANICKAM, RAMADURAI, 2015). Terminais portuários não só atuam como um elemento fundamental do sistema de transporte, mas também representam um subsistema do sistema maior de produção e logística (HERZ, FLÄMIG, 2014; NOTTEBOOM *et al.*, 2022)

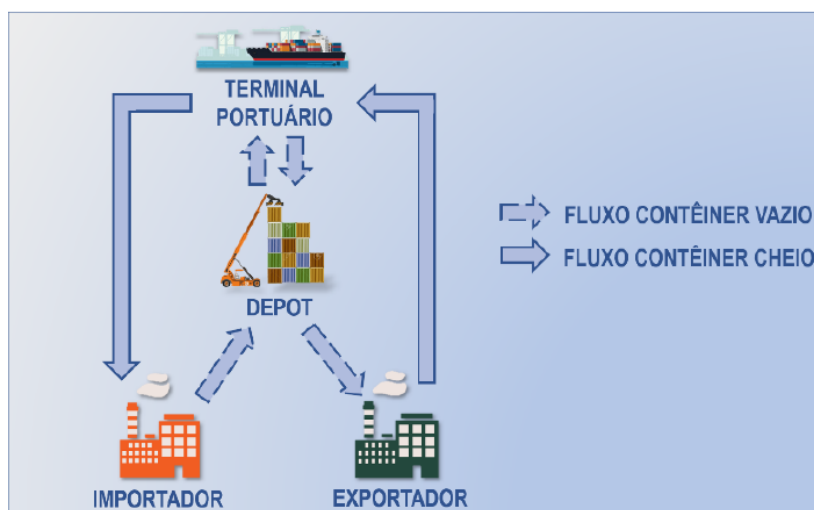
### 2.2.2 Depot

*Depots* são normalmente grandes instalações encontradas na retroárea portuária estruturadas para receber contêineres vazios e performar diferentes atividades, incluindo inspeção, reparos, manutenção, limpeza e armazenamento. Estas atividades são realizadas entre os fluxos de importação e exportação e permitem que o contêiner seja reutilizado pela cadeia logística portuária (PALACIO *et al.*, 2013; KARAKAYA *et al.*, 2021). Para isso, o contêiner (vazio) é direcionado ao *depot* depois que o contêiner cheio (importação) é levado ao consignatário ou diretamente ao cliente importador e a carga é retirada de seu interior. Uma vez no *depot*, o contêiner vazio é armazenado até que seja requisitado pelo próximo cliente para exportar cargas (PALACIO *et al.*, 2013;).

No mundo todo é comum que o volume de importação seja diferente do volume de exportação e vice-versa, causando *imbalance* no sistema e fazendo com que os contêineres vazios precisem ser remanejados em até três níveis: globalmente, regionalmente ou inter-regionalmente (PALACIO *et al.*, 2013; MITTAL *et al.*, 2013). Independentemente do nível do remanejamento, os contêineres vazios são realocados de áreas com maiores volumes de importação (excesso de contêineres vazios) para aquelas com maiores volumes de exportação e, conseqüentemente, com maior demanda por contêineres vazios. À nível global, a transferência dos contêineres vazios é realizada pelo transporte marítimo entre dois terminais portuários estrangeiros. À nível inter-regional eles são reposicionados em diferentes regiões dentro de um país ou entre regiões vizinhas e transportados por terra, seja por caminhão ou ferrovia. Já o reposicionamento regional envolve movimentações menores dentro de uma mesma região, como entre depósitos, terminais e empresas locais (MITTAL *et al.*, 2013).

A Figura 5 ilustra o ciclo logístico do contêiner vazio, mostrando os fluxos de reposicionamento entre importadores e exportadores (níveis regional e inter-regional) e através de terminais portuários (nível global), mas sempre passando por um *depot*.

Figura 5 – Ciclo logístico do contêiner



Fonte: Benedecti (2022)

Tangkham *et al.* (2019) explicam que os *depots* podem acabar sendo um grande gargalo nas operações de movimentação de contêineres devido à altas demandas, espaço insuficiente, falta de planejamento e operações ineficientes. Neste sentido, Palacio *et al.* (2013) defendem que a capacidade é a característica mais importante de um *depot*, sendo que esta não depende somente da área disponível, mas também das tecnologias empregadas para manipulação dos contêineres, altura de empilhamento e planejamento. Um *depot* bem planejado, com áreas determinadas para atividades específicas e com uma boa coordenação com *stakeholders*, acaba por proporcionar maior performance logística, melhor utilização do espaço e maior volume de contêineres vazios movimentados (TANGKHAM *et al.*, 2019).

O transporte marítimo de contêiner apresentou crescimento significativo ao redor do mundo nas últimas décadas e por conta de intensa competitividade, operações eficientes em terra são essenciais (PALACIO *et al.*, 2016). Por esse motivo, estudos relacionados ao *design* e operação de *depots* vêm recebendo maior importância à medida que as áreas portuárias ficam congestionadas. Além do mais, a capacidade limitada de armazenamento dos terminais portuários e os altos valores das terras em suas proximidades fazem com que seja necessário ter outros lugares disponíveis para armazenamento dos contêineres vazios (KARAKAYA *et al.*, 2021; PALACIO *et al.*, 2016).

A localização do *depot* é uma decisão importante às operações da cadeia logística onde está inserido, já que a infraestrutura tem impacto nos custos logísticos. Diferentemente dos terminais portuários, aonde os contêineres chegam em grandes quantidades de uma só vez, nos *depots* os contêineres vazios são entregues continuamente ao decorrer dos dias, envolvendo a

movimentação de grandes volumes de caminhão diariamente, gerando congestionamento em suas redondezas (PALACIO *et al.*, 2016; KARAKAYA *et al.*, 2021). Mittal *et al.* (2013) defendem que um *depot* mais ao interior (*inland depot*) e próximo de um conglomerado de clientes pode ser eficiente na redução de viagens vazias, no custo do reposicionamento dos contêineres vazios e aumento da capacidade de armazenamento destes. Benedecti (2022) propôs a inclusão de um terminal multimodal com serviços de *depot* para atender o Porto Itapoá e as cargas provenientes e/ou com destino à Joinville, demonstrando benefícios operacionais e ambientais para a região, além de reduzir a quantidade de veículos pesados trafegando na região portuária.

### 2.2.3 Armazém e centro de distribuição

Armazéns e centros de distribuição são elementos fundamentais da logística que atuam como pontos intermediários entre a produção e o consumo (MAHROOF, 2019; NOTTEBOOM *et al.*, 2022). No contexto da cadeia logística portuária, estes tipos de infraestrutura performam uma gama de atividades relacionadas ao armazenamento e distribuição de carga e produtos que apoiam as operações logísticas portuárias (NOTTEBOOM *et al.*, 2022).

O armazenamento de cargas pode assumir diferentes formas: líquidos são contidos em tanques, grãos e produtos químicos são mantidos em silos, minerais e contêineres são comumente empilhados em espaços abertos e cargas soltas são dispostas em áreas cobertas (NOTTEBOOM *et al.*, 2022). Ainda, certos produtos precisam de cuidados particulares, que é o caso das cargas refrigeradas em contêineres *reefer* e cargas que não podem ser armazenadas no mesmo contêiner, como alimentos, resíduos, produtos químicos ou têxteis (DÉMARE *et al.*, 2017). Para os autores, a heterogeneidade das cargas exportadas e importadas e suas particularidades fazem com que empresas especializadas sejam inseridas na cadeia logística portuária para cumprirem requisitos necessários de armazenamento.

Devido à semelhança dos serviços oferecidos, os termos ‘armazém’ e ‘centro de distribuição’ são comumente confundidos. Armazéns são projetados para fornecer armazenamento básico de produtos enquanto aguardam serem vendidos. O objetivo principal é terceirizar estoques para outros empreendimentos, como lojas ou fabricantes, fornecendo armazenamento estático que pode durar semanas ou meses. Armazéns podem também estar associados a uma única empresa, diferenciando-se dos centros de distribuição (NOTTEBOOM *et al.*, 2022; DÉMARE *et al.*, 2017). Armazéns oferecem poucos serviços de valor agregado ao

produto, com destaque para consolidação de carga (MAHROOF, 2019; NOTTEBOOM *et al.*, 2022). Notteboom *et al.* (2022) explicam que quanto mais perto o armazém está do cliente e quanto mais especializado o produto, mais complexa é a infraestrutura necessária e as atividades relacionadas.

Para estes autores, centros de distribuição fornecem serviços adicionais ao de armazenamento relacionados ao manuseio de carga, como consolidação, acondicionamento, fracionamento, montagem, rotulagem e outras. Normalmente, estes tipos de infraestruturas utilizam-se de técnicas logísticas mais sofisticadas e dinâmicas do que as encontradas em armazéns, como o *cross-docking*, permitindo que os produtos sejam processados e expedidos em dias ou semanas (DÉMARE *et al.*, 2017; NOTTEBOOM *et al.*, 2022). Geralmente, a mercadoria armazenada nos centros de distribuição já foi vendida e está em trânsito para seu destino. Ainda, este tipo de infraestrutura conta com tecnologias que auxiliam no controle e rastreabilidade do processo, como equipamento de escaneamento de códigos de barra e/ou QR code e/ou RFID (*radio frequency identification*) (NOTTEBOOM *et al.*, 2022, MAHROOF, 2019). Armazéns têm suas atividades orientadas à oferta, com o foco no estoque para o auxílio no equilíbrio das variações de demanda, produção e transporte, a citar a sazonalidade de produtos como exemplo. Centros de distribuição, por sua vez, se concentram na demanda dos clientes, apresentando rápido giro de estoque (GU *et al.*, 2007; NOTTEBOOM *et al.*, 2022).

Os diferentes tipos de serviços oferecidos por cada centro de distribuição e diversas infraestruturas de armazenamento compõem uma rede multinível de armazenamento e distribuição, que é o suporte físico da cadeia logística portuária de retroárea. Baseando-se nas restrições de cada produto (carga refrigerada, prazo de validade, produto químico etc.), os prestadores de serviços logísticos selecionam as empresas que desempenham as atividades exigidas pela mercadoria para organizar sua cadeia logística portuária (DÉMARE *et al.*, 2017).

Como principal componente de qualquer cadeia de suprimentos, o desempenho dos armazéns e centros de distribuição impacta consideravelmente a performance geral da cadeia de suprimentos, já que apresenta um papel intermediário entre os *stakeholders*. Ainda, estas infraestruturas influenciam os custos e serviços da cadeia de suprimentos, tornando-se cada vez mais crítico para o sucesso e fracasso geral das organizações (GU *et al.*, 2007; MAHROOF, 2019).

### 2.2.3 Bolsão de estacionamento

O gerenciamento eficaz do fluxo de caminhões é crucial para minimizar o congestionamento nas redes rodoviárias (RAJU *et al.*, 2022). Os autores argumentam que a proibição de atividades de estacionamento nas proximidades do porto aumenta os atrasos nas operações portuárias, enquanto permitir o estacionamento dentro das instalações portuárias intensifica o congestionamento interno. Em contrapartida, recomendam a criação de áreas centralizadas de estacionamento para caminhões, conhecidas como bolsões de estacionamento. Essas áreas funcionam como zonas de *buffer* entre o porto e a cidade, com o potencial de mitigar os impactos do tráfego de caminhões induzido pelos portos, uma vez que reduzem a quantidade de caminhões acumulados nos portões do terminal e a necessidade de viagens adicionais entre o porto e as instalações periféricas (YILDIRIM *et al.*, 2022). Além disso, essas áreas dedicadas ao estacionamento de caminhões podem diminuir o fluxo de veículos pesados nas cidades vizinhas ao terminal (YILDIRIM *et al.*, 2022).

Raju *et al.* (2022) explicam que estacionamentos atuam como pilar dos sistemas urbanos de transporte. No entanto, ressaltam que é imprescindível que os bolsões de estacionamento sejam planejados de maneira estratégica, contemplando análises tanto da demanda atual quanto futura, padrões de chegada dos caminhões, características dos veículos e tempo de permanência nas vagas. Esse planejamento visa garantir que o dimensionamento dessas áreas esteja alinhado com a eficiência operacional do terminal portuário.

Outro fator relevante é o impacto na segurança do transporte rodoviário que os bolsões de estacionamento podem proporcionar. O relatório especial de investigação de áreas de estacionamento de caminhões do Painel de Segurança Nacional de Transporte dos Estados Unidos – NTBS (2000) evidenciou que a fadiga dos motoristas está diretamente ligada à ocorrência de acidentes, reforçando a importância de infraestruturas que ofereçam áreas de repouso adequadas. Esses espaços, diferentemente de hotéis, devem atender às demandas específicas dos motoristas, oferecendo áreas apropriadas para veículos longos e garantindo a segurança das cargas. Além disso, devem operar com horários flexíveis, considerando as variações no tráfego e os frequentes atrasos nas operações logísticas (NTBS, 2000; UNIÃO EUROPÉIA, 2024).

Bolsões de estacionamento são comumente encontrados nos principais portos do mundo como estratégia de melhorar a eficiência operacional do transporte de cargas (YILDIRIM *et al.*, 2022). No Brasil, entre os 10 terminais portuários que mais movimentaram

contêineres em 2023 (Figura 2) os portos de Santos, Paranaguá, Rio Grande, Suape e Pecém contam com bolsões de estacionamento. Sendo que os bolsões de Santos-SP, Paranaguá-PR e Rio Grande-RS são os de maior capacidade (BRASIL, 2023; PORTO DE SANTOS, 2021; PORTOS DO PARANÁ, 2024).

O terminal portuário de Santos dispõe de sete bolsões (referidos como 'Pátios Reguladores' pelo próprio terminal), com um deles possuindo capacidade para até 1.680 caminhões e o mais distante localizado em Sumaré, a cerca de 220 km do terminal. Os bolsões oferecem infraestrutura completa aos motoristas, incluindo sanitários, vestiários, restaurantes, atendimento médico de emergência, áreas de descanso monitoradas, postos de serviços e funcionamento 24 horas (PORTO DE SANTOS, 2021). A infraestrutura de Paranaguá tem capacidade para receber até 1.000 caminhões simultaneamente em 330.000m<sup>2</sup>. Referido como 'Pátio de Triagem' pelo próprio terminal, conta ainda com academia, *lan house*, borracharia e mecânica (PORTOS DO PARANÁ, 2024). De acordo com seu plano mestre, a infraestrutura é fundamental para redução de filas ao longo da rodovia (BRASIL, 2013). O porto do Rio Grande, por sua vez, conta com quatro bolsões (referidos como 'Pátios Reguladores de Caminhões' pelo terminal) para auxiliar o controle de tráfego terrestre (BRASIL, 2023).

A nível internacional, podem ser citados os terminais portuários de Rotterdam (Holanda) e Hamburgo (Alemanha). O terminal portuário de Rotterdam conta com cinco bolsões disponíveis 24 horas por dia durante o ano todo com total de 723 vagas para caminhões (PORT OF ROTTERDAM, 2024). Assim como os bolsões no Brasil, sua infraestrutura dispõe de chuveiros, sanitários, segurança, internet e muito mais (PORT OF ROTTERDAM, 2024). De maneira similar, o Porto de Hamburgo provê bolsões de estacionamento para atender às necessidades de estacionamento dos caminhões (YILDIRIM *et al.*, 2022). De acordo com os autores, as vagas são disponibilizadas de forma otimizada para reduzir o tempo gasto na busca por uma vaga livre. As Figuras 6 e 7 ilustram os bolsões de Paranaguá e Rotterdam respectivamente.

Figura 6 – Bolsão de estacionamento do terminal portuário de Paranaguá-PR.



Fonte: Brasil (2013).

Figura 7 – Bolsão de estacionamento de Rotterdam-Holanda.



Fonte: Port of Rotterdam (2024).

#### 2.2.4 *Inland Terminal*

Assim como um terminal portuário é considerado um ponto de conexão entre dois sistemas de circulação (terrestre e marítimo), um *inland terminal* desempenha uma função semelhante, mas dentro de um sistema de circulação terrestre. No entanto, há uma diferença fundamental: enquanto o primeiro é um ponto obrigatório na interface entre mar e terra, o *inland terminal* é apenas uma opção para a distribuição terrestre de cargas, sendo viável apenas enquanto houver condições comerciais favoráveis (RODRIGUE *et al.*, 2010).

Jaržemskis e Vasiliauskas (2007) esclarecem que existem diferentes tipos de *inland terminal* a depender das atividades desempenhadas e mencionam que um mesmo termo pode ser utilizado para denotar diferentes tipos instalações e que ainda termos diferentes podem ser utilizados para uma mesma instalação. A falta de um senso comum para nomenclatura e definição correta de cada termo acaba causando confusões (RODRIGUE *et al.*, 2010). Os autores citam, por exemplo, que terminais portuários menores, apesar de estarem posicionados em regiões costeiras, podem ser considerados *inland terminals* quando suas operações auxiliam e estão conectados a terminais portuários maiores (*hubs*). Termos como *dry port*, *inland port*, *inland freight terminal* e *inland terminal* são utilizados para se referirem a instalações semelhantes onde diversas atividades de manuseio de carga e que agregam valor são performadas (JARŽEMSKIS, VASILIAUSKAS, 2007; RODRIGUE *et al.*, 2010; RODRIGUE, NOTTEBOOM, 2009; ROSO *et al.*, 2010). Rodrigue *et al.* (2010) e Roso *et al.* (2009) defendem, no entanto, que *dry ports*, ou Portos Secos, devem estar conectados a um terminal portuário por sistemas de transporte de alta capacidade, sendo ferrovia e barças as melhores opções.

Existe ainda o termo *inland multimodal terminal* (terminal multimodal). Assim como os *dry ports*, são considerados importantes pontos na rede de transporte, já que são instalações estabelecidas no interior como alternativas às vias rodoviárias congestionadas ou às ferrovias inadequadas presentes na região dos terminais portuários, que causam atrasos e aumento nos custos (JARŽEMSKIS, VASILIAUSKAS, 2007). Estes dois tipos de instalação proporcionam a conectividade intermodal, sendo que serviços logísticos adicionais são oferecidos pelos *dry ports* enquanto o *inland multimodal terminal* seria apenas um ponto de convergência de dois ou mais modais (JARŽEMSKIS, VASILIAUSKAS, 2007). No entanto, alguns *inland multimodal terminals* podem oferecer outros tipos de serviços também.

Rodrigue *et al.* (2010) explicam que um dos principais motivos para a multiplicidade de termos e falta de definição das atividades desempenhadas é que os *inland terminals* surgiram em diferentes contextos geográficos, desempenhando uma variedade de funções e envolvendo diversos atores. As atividades desempenhadas por esses terminais podem ou não incluir desembaraço aduaneiro, armazenamento temporário de carga, armazenamento de contêiner vazio e cheio, manutenção e reparo de contêiner, serviços logísticos, conectividade com outros modais, transbordo, além de consolidação/desconsolidação, transformações leves, distribuição e adiamento da carga (JARŽEMSKIS, VASILIAUSKAS, 2007; RODRIGUE *et al.*, 2010; RODRIGUE, NOTTEBOOM, 2009; ROSO *et al.*, 2009).

Rodrigue *et al.* (2010) explicam que existe ainda diferença na escala e complexidade da operação de terminal para terminal, alguns são de iniciativa privada enquanto outros são resultado de iniciativas públicas. Alguns possuem caráter comercial, financiando suas operações com a receita gerada, enquanto outros dependem de subsídios significativos, especialmente para a provisão de infraestrutura. Em determinados casos, os *inland terminals* podem ser altamente dedicados a uma área metropolitana específica ou até mesmo a um único cliente.

De forma geral, o termo *inland terminal* pode ser utilizado para se referir a instalações ao interior que permitem que diversas funções da cadeia logística portuária ocorram em regiões mais distantes da costa, oferecendo melhor acesso aos mercados interiores (RODRIGUE *et al.*, 2010). Estas instalações podem ser de diferentes tamanhos, funções, complexidade de operação, formas de propriedade e oferecerem ou não serviços de conexão multimodal.

Os *inland terminals*, atuam como uma extensão dos *gates* dos terminais portuários, melhorando seu acesso terrestre e ampliando sua área de influência, além de possibilitar o deslocamento mais eficiente de cargas em regiões mais remotas (ROSO *et al.*, 2009;

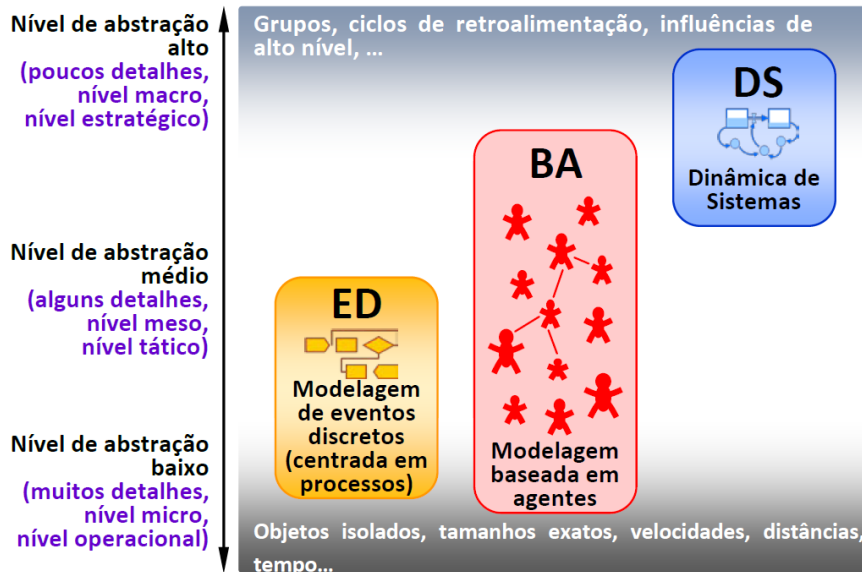
NOTTEBOOM *et al.*, 2022). Os *inland terminals* surgem como uma alternativa aos altos níveis de congestionamento nos terminais portuários, à limitação de espaço para expansão e das pressões ambientais impostas em regiões costeiras (RODRIGUE *et al.*, 2010). Quando bem localizados, possibilitam ainda a expansão da capacidade de operação dos terminais portuários, integração logística e redução dos custos de distribuição, além de aliviarem o tráfego e o congestionamento na entrada dos terminais portuários e em seus arredores, proporcionando mais qualidade de vida às comunidades locais (ROSO *et al.*, 2009; RODRIGUE, NOTTEBOOM, 2009; RODRIGUE *et al.*, 2010).

### 2.3 SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES

Simulação é uma maneira de avaliar e resolver problemas reais que são caros, inviáveis ou perigosos de se sujeitarem a experimentos com objetos reais. Neste contexto, a simulação é uma ferramenta computacional que auxilia na representação de sistemas reais através de abstrações e modelos (GRIGORYEV, 2015). No processo de modelagem, torna-se possível explorar e entender o comportamento do sistema em questão, testar diversos cenários e seus comportamentos sob diversas condições, fornecendo *insights* valiosos para tomada de decisões (GRIGORYEV, 2015).

Segundo Grigoryev (2015), os métodos modernos de simulação são classificados em eventos discretos, dinâmica de sistemas e simulação baseada em agentes. Essas classificações são fundamentadas na estrutura utilizada para a construção do modelo e em seu nível de abstração, como ilustrado pela Figura 8. A dinâmica de sistemas possui um alto nível de abstração, enquanto o método de eventos discretos pode representar sistemas com níveis médios ou baixos de abstração. Por sua vez, a simulação baseada em agentes é capaz de representar sistemas através de modelos altamente detalhados, significativamente abstratos, ou ainda incluir elementos com diferentes níveis de abstração em um único modelo. De acordo com Borshchev (2013), o processo de encontrar o nível certo de abstração e a linguagem de modelagem que melhor representa um problema ou sistema pode ser considerado mais como arte do que tecnologia.

Figura 8 – Métodos de modelagem e seus níveis de abstração.



Fonte: Borshchev (2013).

A simulação baseada em agentes é extensamente empregada na resolução de problemas complexos e de amplo escopo devido à flexibilidade, escalabilidade e dinamicidade que o método oferece (GARRO *et al.*, 2015; YILDIRIM *et al.*, 2022). Nesta abordagem, é possível decompor um sistema complexo em sistemas menores integrados e coordenados, compostos por múltiplos agentes, visando gerenciar sua complexidade (YILDIRIM *et al.*, 2022).

O método consiste em representar componentes de um sistema como entidades (agentes) independentes em um ambiente estabelecido e que sofrem influência deste (DÉMARE *et al.*, 2017; YILDIRIM *et al.*, 2022). Os agentes podem representar entidades físicas ou virtuais e ser ainda, por exemplo, desde um único ser humano até a população de um país inteiro (DÉMARE *et al.*, 2017). No entanto, são caracterizados por possuírem propriedades e comportamentos individuais, com a habilidade de interagir uns com os outros e com o ambiente onde está inserido. Daya e Audy (2024) ressaltam que a capacidade do método em refletir realisticamente o comportamento de um sistema e garantir resultados significativos depende da definição precisa dos parâmetros utilizados e do design cuidadoso dos cenários.

### 2.3.1 Simulação aplicada à modelagem de cadeias logísticas portuárias

A análise da cadeia logística da indústria portuária pode ser considerada um desafio significativo quando utilizados métodos convencionais estáticos. Isto se dá devido à

complexidade das atividades desempenhadas pelos seus agentes e suas interações (XU *et al.*, 2019). No entanto, a simulação computacional oferece uma visão aprimorada de sistemas complexos, sendo amplamente empregada na modelagem de fluxo de sistemas logísticos complexos, como a cadeia logística portuária (DAYA, AUDY, 2024; SILVA *et al.*, 2011; XU *et al.* 2019).

Resultante do levantamento bibliográfico sobre estudos de simulação aplicados à logística portuária com foco no gerenciamento de congestionamento na retroárea portuária, 19 artigos científicos foram identificados e agrupados de acordo com a estratégia adotada para sua análise, resultando em 4 principais subtemas: (1) o desenvolvimento de tecnologias para gerenciamento ou agendamento de horários de atendimento para os caminhões; (2) a proposição de novas políticas para operação em vias já existentes de acesso aos portões do terminal portuário ou remanejamento destas; (3) inclusão de nova infraestrutura na retroárea, como a instalação de portões adicionais, por exemplo; e (4) terminais multimodais.

O uso de um sistema de agendamento de caminhões é uma das maneiras mais comuns para gerenciamento de fluxo de tráfego nos portões de acesso aos portos (XU *et al.*, 2019). De acordo com os autores, este tipo de gerenciamento pode ser muito eficiente em balancear o fluxo de caminhões. Na revisão realizada, seis trabalhos se enquadram na categoria 1 (DA SILVA, 2023; NADI *et al.*, 2022; RAMÍREZ-NAFARRATE *et al.* 2017; RUSCA *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2022; XU *et al.*, 2022).

Quatro publicações foram categorizadas na categoria 2. Kulkarni *et al.* (2018) avaliaram a implementação de um modelo de gerenciamento da direção operacional das vias de saída do porto baseado em horários pré-determinados, enquanto Zhou e Ge (2018) desenvolveram um modelo que adapta a direção das vias de acordo com a demanda em tempo real. Por outro lado, Gracia *et al.* (2017) investigaram a implantação da segmentação das vias de acordo com o tipo de veículo. Já Fleming *et al.* (2013) propuseram que os caminhões em se reorganizassem em uma fila única. Os quatro estudos demonstraram que as políticas adotadas contribuíram para aliviar o congestionamento nos portões de acesso ao porto. Os autores destacaram a relevância de incluir nas análises de coordenação de tráfego as instalações envolvidas na cadeia logística portuária, como centros de reparo, de consolidação e desconsolidação e depósitos de contêineres vazios. Ainda, argumentam que tal inclusão é fundamental devido à necessidade de visitação frequente dessas instalações durante os ciclos de importação e exportação.

Seis estudos foram categorizados na terceira categoria. De acordo com o estudo de Xu *et al.* (2021), a ampliação da infraestrutura de transporte é a medida com efeito mais imediato na redução de congestionamento quando comparado a implantação do transporte multimodal, estratégia inteligentes e interconexão. Os autores destacam, no entanto, que tal medida tende a demorar mais para ser implantada e a ser mais cara, requerendo altos investimentos. Daya e Audy (2024) avaliaram a fluidez de caminhões através da simulação de cenários com diferentes números de portões. Raju *et al.* (2022), Yıldırım *et al.* (2022) e Xu *et al.* (2019) propõem modelos para determinação da capacidade ideal para o estacionamento de terminais portuários diferentes. Preston *et al.* (2020) propõem uma área de “*buffer*” para estacionamento de caminhões para melhor gerenciamento do espaço urbano e redução do congestionamento. Apesar de seu estudo ter sido realizado em um terminal de *ferry boat*, os resultados são relevantes para o trabalho e podem ser replicados no contexto de terminais portuários.

Xu *et al.* (2019) e Preston *et al.* (2020) concordam que áreas de estacionamento, atuando como áreas de “*buffer*”, onde caminhões podem aguardar em fila para serem verificados, podem aliviar significativamente a pressão do tráfego nos portões ao internalizar as filas. Os impactos desta medida refletem em redução na emissão de gases do efeito estufa e no impacto na comunidade local. Preston *et al.* (2020) defendem, no entanto, que espaços que podem ser utilizados de forma flexível são mais valiosos do que os espaços dedicados.

Três trabalhos foram classificados na quarta categoria. Parola (2009) defende que uma divisão multimodal equilibrada contribui para eficiência de operação dos terminais, auxiliando na redução de fluxo de cargas nas rodovias. No mesmo sentido, Alias *et al.* (2023) propuseram um serviço descentralizado de transporte de contêineres por hidrovía, operando no interior dos portos marítimos europeus. Adicionalmente, o estudo de Silva *et al.* (2022b) demonstrou os benefícios da implantação de um terminal multimodal interior para auxiliar no transporte dos contêineres de importação e exportação entre o Porto de Itapoá e Joinville, aliviando o fluxo de caminhões nas rodovias e reduzindo a emissão de gases do efeito estufa.

No Quadro 1 são sumarizados os artigos relacionados a respeito do tema de estudo:

Quadro 1 – Artigos sobre simulação aplicada à logística portuária com foco no congestionamento da retroárea portuária

Item	Referência	Descrição	Simulação	Categoria (1-4)
1	Daya, B., Audy, J.-F. (2024)	Comparação de cenários com diferentes números de portões para avaliar a configuração que melhora a fluidez de acesso de	Teoria das filas e eventos discretos com software Simio	3

		veículos no Port Trois-Rivieres (Canadá) durante reformas de expansão.		
2	Raju, N. <i>et al.</i> (2022)	Propõem método para estimar o número ótimo de vagas para estacionamento de caminhões de um terminal portuário.	Simulação microscópica de tráfego no PTV VISSIM	3
3	Yıldırım, M.S. <i>et al.</i> (2022)	Determinação da capacidade ótima do estacionamento para o porto de Izmir.	Eventos discretos e simulação baseada em agentes no AnyLogic.	3
4	Preston, G.C. <i>et al.</i> (2020)	Propõem um estacionamento para caminhões como um “buffer” para operação de um terminal ferry.	Eventos discretos	3
5	Xu, X. <i>et al.</i> (2019)	Propõem uma ferramenta que padroniza o tamanho da área de “buffer” e número de portões de acordo com o nível de desenvolvimento do porto.	Não mencionado	3
6	Wang, J. <i>et al.</i> (2022)	Propõem uma via exclusiva de acesso aos portões para caminhões atrasados para redução de filas.	Eventos discretos	1
7	da Silva, M.R.F. <i>et al.</i> (2023)	Desenvolvimento de uma ferramenta dinâmica de agendamento de caminhões.	Eventos discretos e machine learning	1
8	Nadi, A. <i>et al.</i> (2022)	Desenvolvimento de uma ferramenta de gerenciamento de agendamento para controle chegada de caminhões para reduzir tempos de espera dos caminhões.	Eventos discretos e heurística estocástica de alocação	1
9	Xu, B. <i>et al.</i> (2022)	Desenvolvimento de um sistema de agendamento de caminhões.	Algoritmo genético	1
10	Kulkarni, K. <i>et al.</i> (2018)	Implantação de um modelo de gerenciamento de direção operacional vias de saída do porto de acordo com horários pré-determinados.	Programação linear e eventos discretos	2
11	Zhou, Y., Ge, Y. (2018)	Implantação de um modelo dinâmico de gerenciamento de direção operacional vias de saída do porto de acordo com a demanda atual de tráfego.	Não mencionado	2
12	Gracia, M.D., <i>et al.</i> (2017)	Avaliação do impacto de implantação de segmentação do tipo de veículo por vias exclusivas no congestionamento nos portões do terminal portuário.	Análise de correlação Software ARENA	2
13	Rusca <i>et al.</i> (2024)	Propõem a implementação de tecnologias para monitoramento e controle de veículos na entrada e saída de terminais portuários	Eventos discretos Software: ARENA	1
14	Ramírez-Nafarrate <i>et al.</i> (2017)	Propõem a implementação de um sistema de agendamento de caminhões no Porto de Arica no Chile para redução de tempos de espera	Eventos discretos e heurística	1
15	Parola, F., Sciomachen A. (2009)	Exploram a reestruturação operacional ferroviária de um terminal multimodal para alcançar uma divisão multimodal equilibrada.	Eventos discretos	4
16	Alias <i>et al.</i> (2022)	Propõem um sistema de transporte hidroviário descentralizado de contêiner para atender diversos terminais portuários da Europa a fim de aliviar o fluxo nas rodovias e ferrovias	Eventos discretos	4
	Silva <i>et al.</i> (2022b)	Proposta de serviço hidroviário na cadeia logística do Porto Itapoá.	Simulação baseada em agentes	4
17	Fleming <i>et al.</i> (2013)	Proposição de uma única fila compartilhada de caminhões para reduzir o tempo de espera	Simulação baseada em agentes	2

18	Xu <i>et al.</i> (2021)	Comparam a efetividade de quatro intervenções (ampliação da infraestrutura de transporte, implantação do transporte multimodal, estratégia inteligentes e interconexão) na redução do congestionamento	System Dynamics	3
----	----------------------------	--	-----------------	---

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Estes estudos fazem uso de métodos de simulação para avaliar a fluidez do tráfego de caminhões em retroáreas, destacando o uso de eventos discretos, apesar de Yildirim *et al.* (2022) argumentarem que a simulação baseada em agentes tem maior capacidade de modelagem microscópica comparada. Xu *et al.* (2019) defendem que simulação é uma das tecnologias mais difundidas para avaliação de sistemas complexos, sendo significativamente explorado pela indústria portuária e, Preston *et al.* (2020) incentivam o uso de simulação para não só planejar processos/operações no porto, mas também para previsão de demanda, entre outros.

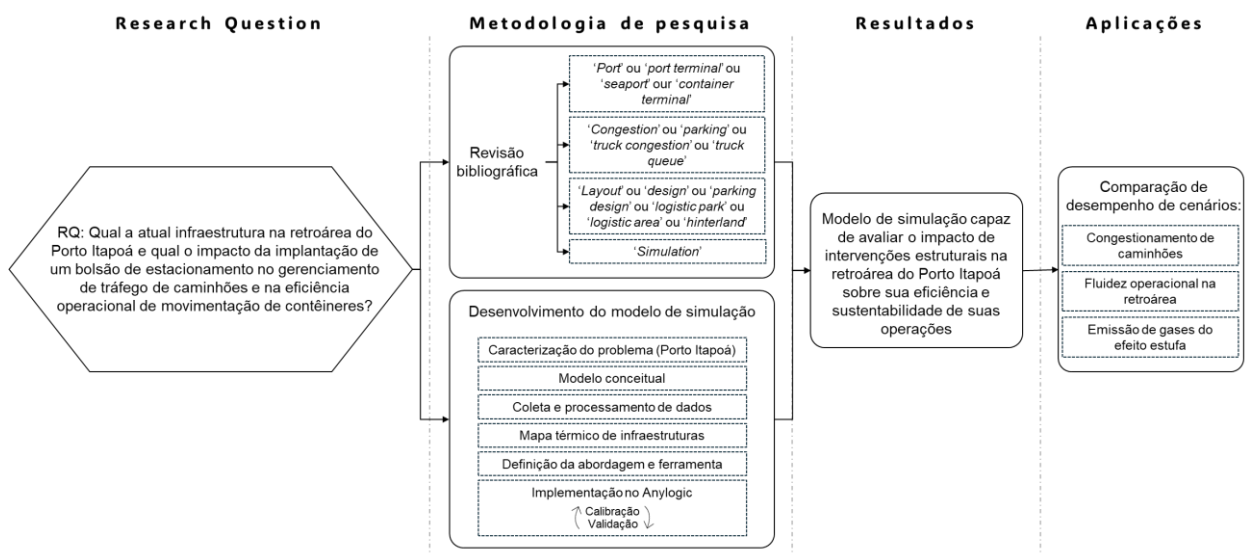
O presente estudo se destaca dos trabalhos encontrados na revisão bibliográfica por aplicar a simulação baseada em agentes para avaliar o impacto da inclusão de um bolsão de estacionamento na retroárea na fluidez de e circulação de caminhões de e para o Porto. O trabalho abrange não apenas os caminhões com destino ao Porto Itapoá, mas também os fluxos de caminhões nas instalações da retroárea, como a retirada/devolução de contêiner vazio e entrega de carga solta em armazéns.

Outro fator que se destaca é o contexto em que o Porto de Itapoá está inserido, de duplicação de sua capacidade operacional, mas sem a infraestrutura de retroárea e vias de acesso ao terminal portuário adequada para atender à crescente demanda. Além disso, destaca-se a avaliação do impacto ambiental, pois nenhum estudo quantificou as emissões de gases de efeito estufa. Neste trabalho, será realizada uma comparação das taxas de emissão de gases de efeito estufa para avaliar o impacto de cada cenário.

### 3 METODOLOGIA

Partindo da *Research Question*, a metodologia adotada inclui revisão bibliográfica e o desenvolvimento do modelo de simulação, que é composto por 6 etapas. Como resultado, um modelo de simulação capaz de avaliar o impacto de intervenções estruturais na retroárea do Porto Itapoá sobre sua eficiência e sustentabilidade de suas operações é obtido. Com os indicadores de congestionamento, nível de serviço do terminal portuário e emissão de gases do efeito estufa, o modelo permitirá identificar as estratégias mais eficazes no gerenciamento do fluxo de veículos pesados na retroárea através da comparação de desempenho de cenários reais e hipotéticos. A Figura 9 ilustra as etapas da metodologia.

Figura 9 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Em paralelo, desenvolveu-se o modelo conceitual e a revisão bibliográfica acerca do tema. Em seguida, definiu-se a melhor abordagem e ferramenta a serem utilizadas para o desenvolvimento do estudo de caso e implementação do modelo. Com o modelo pronto, os cenários comparativos são criados e então a comparação de desempenho dos cenários se inicia.

A revisão bibliográfica e as etapas do desenvolvimento do modelo de simulação são descritas na subseção a seguir, enquanto a comparação dos resultados é apresentada no capítulo 5.

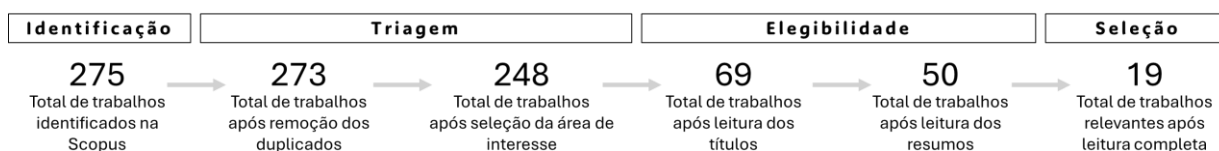
### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para compreender o estado da arte dos estudos relacionados ao uso de simulação para avaliação de medidas de mitigação de congestionamento a fim de melhorar a fluidez de operação da cadeia logística portuária, foi realizada uma revisão bibliográfica na base de dados Scopus. A pesquisa foi conduzida sem restrição de ano de publicação e utilizando a combinação de palavras-chave em inglês, que poderiam ser encontradas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos:

- “Port” ou “Seaport” ou “Container terminal”; e
- “Truck”; e
- “Congestion” ou “Parking layout” ou “Parking design” ou “Queue” ou “Queuing” ou “Traffic” ou “Waiting” ou “Logistic park” ou “Logistic area” ou “Hinterland”; e
- “Simulation”.

Para a revisão dos documentos encontrados, foi aplicada a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), ilustrada pela Figura 10, que apresenta a quantidade de documentos selecionados após a conclusão de cada etapa.

Figura 10 – Resultado de cada etapa da revisão bibliográfica realizada baseada no método PRISMA.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Inicialmente, foram identificados 275 documentos. Após a exclusão de trabalhos duplicados e relacionados a áreas de estudo como Física e Astronomia, Agricultura e Ciências Biológicas, Artes e Humanas, Ciência dos Materiais, Química, Bioquímica, Medicina, a etapa de triagem resultou na seleção de 248 documentos para a leitura dos títulos. Na etapa de elegibilidade, 69 documentos foram considerados relevantes após a leitura dos títulos. Muitos estudos relacionados à análise de tráfego em áreas urbanas e ciência de dados, mas sem aplicação ao contexto da retroárea portuária, foram excluídos nesta fase. Então, com a leitura dos resumos destes 69 trabalhos, 50 foram escolhidos para leitura completa, dos quais 19 foram

selecionados como relevantes para o tema e são apresentados no Quadro 1. Estes 19 estudos têm como objetivo aprimorar a fluidez do tráfego de caminhões em retroáreas, por meio de aplicação de diferentes estratégias de gerenciamento de congestionamento, corroborando com a investigação proposta nesta dissertação de mestrado.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O desenvolvimento do modelo de simulação é composto por quatro principais etapas, iniciando pela caracterização do problema, elaboração do modelo conceitual, coleta de dados e implementação do modelo. A quarta etapa é a tradução do modelo conceitual para a linguagem do AnyLogic® e requer constantes testes de calibração e validação para refinamento, até que a versão final do modelo de simulação seja alcançada. Cada uma das etapas é descrita nas subseções seguintes.

#### 3.2.1 Caracterização do problema

O Porto Itapoá é um terminal portuário privado, estabelecido em Itapoá-SC desde 2011. Atualmente, o terminal está passando por um projeto de expansão que visa duplicar sua capacidade operacional anual, prevista para atingir 2 milhões de TEUs e ser o maior terminal da América do Sul (MAFFI, 2026; TRANSPORTE MODERNO, 2024)

Ainda, com a não renovação do contrato da APM Terminals com o Porto de Itajaí, fez com que o Porto de Itapoá absorvesse as movimentações de Itajaí. Desta forma, a região de Itapoá tem se tornado um destino natural de novos investimentos em logística e armazéns (DANTAS, 2023; PACHECO, 2023).

Com a primeira e segunda fase do projeto de expansão já concluídas, somadas à saída da APM Terminals de Itajaí, já é notável o aumento no volume de contêineres movimentados pelo Porto Itapoá. Em 2023, o Porto Itapoá foi o terminal de uso privado com maior crescimento no Brasil em relação ao ano anterior, com aumento de 20,3% em suas movimentações (PORTO ITAPOÁ, 2024; ANTAQ, 2024).

Por sua operação depender exclusivamente do modal rodoviário, já é notável consequente aumento no fluxo de caminhões na retroárea portuária, gerando filas de até 10km e congestionamento na região, de acordo com funcionário de uma transportadora da retroárea. Teme-se ainda que a tendência do aumento do tamanho dos navios agrave o congestionamento

do transporte de contêineres, diminuindo a velocidade do fluxo de operações e afetando a eficiência operacional do terminal.

O mapa georreferenciado (Figura 11) foi elaborado com base na Lei de Mobilidade Urbana e no plano de Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo do município de Itapoá, ambos disponibilizados pela prefeitura (PREFEITURA DE ITAPOÁ, 2016a; PREFEITURA DE ITAPOÁ, 2016b; PREFEITURA DE ITAPOÁ, 2016c). Este mapa ilustra a área atual do Porto Itapoá, a área disponibilizada pela prefeitura para sua expansão e área estabelecida para retroárea. De acordo com o mapa georreferenciado, as áreas indicadas representam aproximadamente 460.000m<sup>2</sup>, 1.740.000m<sup>2</sup> e 11.400.000m<sup>2</sup> respectivamente. Os Anexos A e B contemplam os mapas de zoneamento e plano viário disponibilizados online pela prefeitura.

Figura 11 – Zona portuária atual, área de expansão e retroárea do Porto Itapoá.

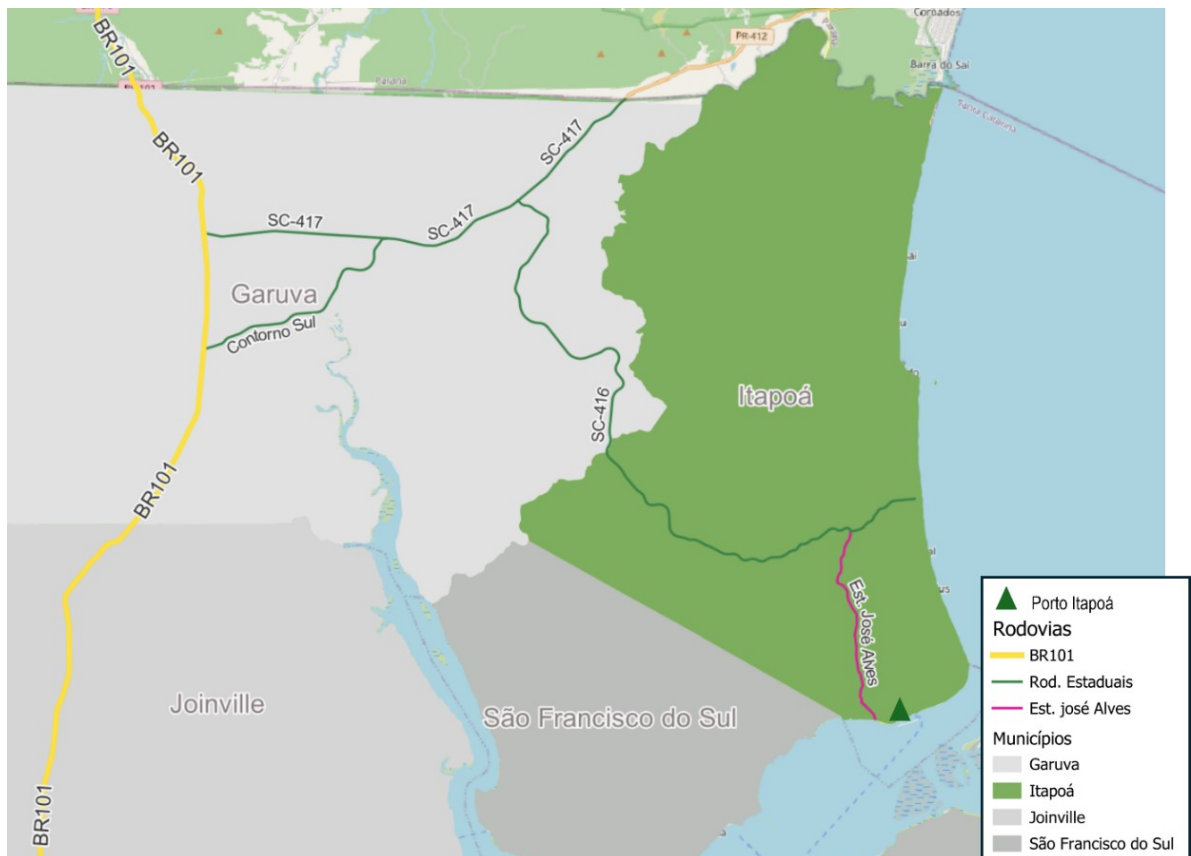


Fonte: Adaptado de Itapoá (2016a) e Itapoá (2016b).

O acesso ao terminal é estabelecido pelo Contorno Sul, que conecta a BR101 às rodovias estaduais SC-417 e 416, e depois à Estrada José Alves (Figura 12). A retroárea foi estabelecida ao longo da Estrada José Alves, onde diversas instalações que dão suporte à operação do Porto Itapoá estão localizadas, como *depots*, armazéns e empresas de transporte. A Estrada José Alves é caracterizada por ser uma via simples de mão dupla e por não dispor de estacionamentos ou áreas de apoio para caminhões, resultando no estacionamento destes ao

longo da via (Figura 13). Devido à falta de acostamento, os caminhões acumulados ao longo da via acabam por atrapalhar o fluxo de atividades na retroárea, fazendo com que a velocidade média de operação seja reduzida.

Figura 12 – Rodovias federal, estaduais e local de acesso ao Porto Itapoá.



Fonte: Adaptado de Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade (2011).

Figura 13 – Caminhões estacionados ao longo do meio-fio da Estrada José Alves na retroárea do Porto Itapoá.



Fonte: Google maps (2024).

Silva *et al.* (2022a) realizaram mapeamento dos estabelecimentos existentes nas retroáreas do Porto Itapoá e do complexo Itajaí-Navegantes por ramo de atuação e suas áreas de operação disponíveis, como armazenamento coberto e descoberto. Os autores revelaram necessidade de ampliação da área total de infraestrutura da retroárea do Porto Itapoá, indicando que a área disponibilizada em 2022 já seria um gargalo para a operação do terminal com aumento da movimentação de contêineres.

Dada a atual pressão na infraestrutura existente, é fundamental avaliar e aprimorar a infraestrutura da retroárea para suportar a futura demanda decorrente do aumento previsto na movimentação de contêineres sem causar disrupções nas operações do terminal. A falta de fluidez nessas áreas pode se transformar em um gargalo significativo para as operações do porto, comprometendo sua eficiência e competitividade a longo prazo, além de impactar o tráfego da região como um todo, prejudicando a comunidade local. Assim, investimentos em melhorias na infraestrutura da retroárea são essenciais para garantir que o Porto Itapoá continue a crescer de forma sustentável e eficiente.

### 3.2.2 Modelo conceitual

Com a ampla compreensão do problema em estudo, inicia-se o processo de desenvolvimento da simulação pela estruturação do modelo conceitual. Esta etapa acontece

paralelamente à coleta de dados, que será descrita na subseção seguinte, e é preliminar à implementação do modelo em software.

Para este estudo, são apresentados quatro modelos conceituais, sendo dois modelos principais a serem implementados (base e intervenção) e cada um composto por dois sentidos de fluxo de movimentação de contêiner (importação e exportação). O Quadro 2 detalha os modelos a serem implementados e modelos conceituais elaborados.

Quadro 2 – Cenários e modelos conceituais.

<b>Modelo</b>	<b>Modelo conceitual</b>
Base (sem bolsão)	Exportação / embarque da cabotagem
	Importação / desembarque da cabotagem
Intervenção (com bolsão)	Exportação / embarque da cabotagem
	Importação / desembarque da cabotagem

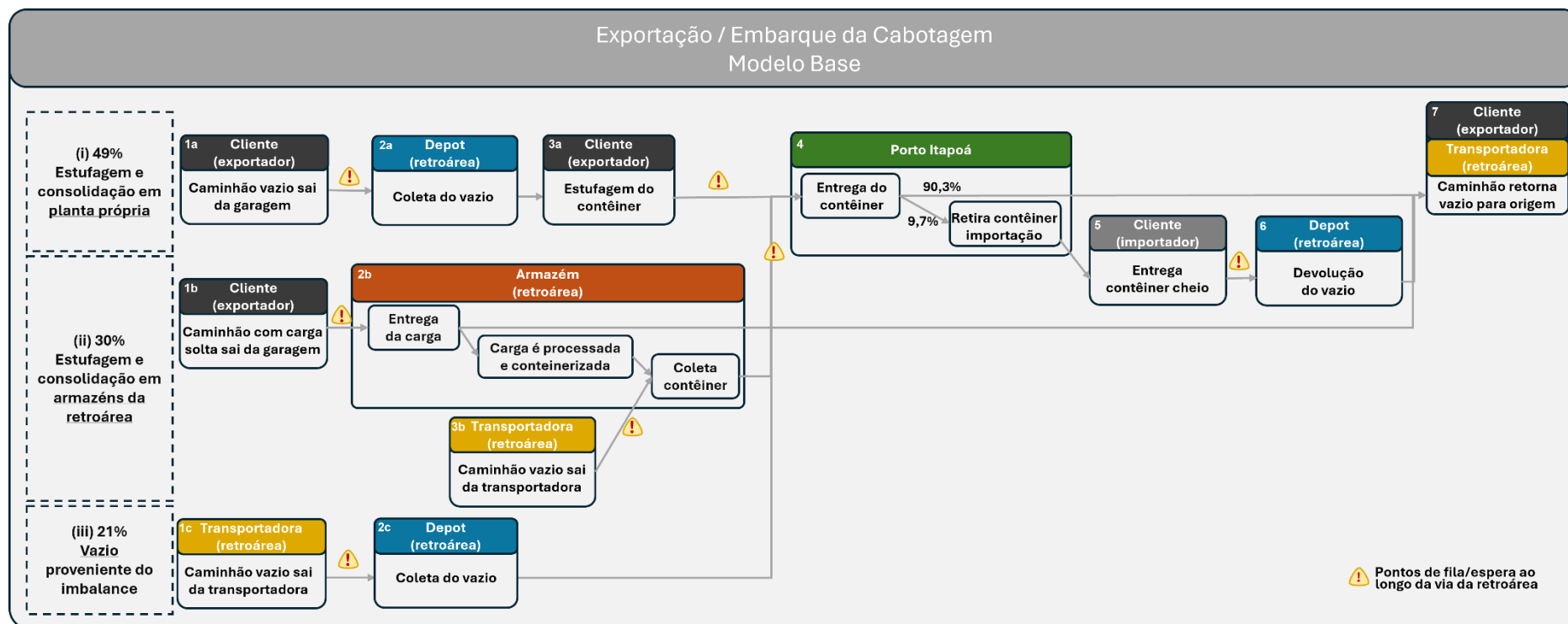
Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

A Figura 14 ilustra o modelo conceitual desenvolvido para o modelo base para o fluxo de operações da exportação e embarque da cabotagem. Na Figura 14, três principais fluxos de exportação são representados: (i) do contêiner cheio que é estufado na planta própria do exportador (49%); (ii) daqueles que são estufados na retroárea (30%); (iii) e os vazios provenientes do *imbalance* (21%). No primeiro fluxo (i), os caminhões saem vazios da garagem do exportador (1a), fazem a coleta do contêiner vazio em um *depot* na retroárea de Itapoá (2a), retornam para a planta do exportador para realizar a estufagem do contêiner (3a) e, então se direcionam para o porto para entregar o contêiner cheio (4). Neste ponto, 90,3% dos caminhões finalizam a operação e retornam para a garagem (direto para 7). O restante reaproveita a rota para retirar um contêiner proveniente da importação, transportando este até seu destino (importador) para desova (5), depois retorna o contêiner vazio no *depot* na retroárea (6) para então finalizar a operação na garagem (7).

No segundo fluxo (ii), o caminhão sai da planta do exportador com a carga solta (1b) e a entrega no armazém da retroárea, onde é unitizada e containerizada (2b). Quando pronta, um caminhão da transportadora da retroárea faz a coleta do contêiner cheio no armazém e o transporta para o porto (3b). Assim como no fluxo anterior, 48% da rota é reaproveitada, mas ao final o caminhão retorna para a transportadora (4,5,6 e 7; ou 4 e 7).

Já no terceiro fluxo (iii), os caminhões saem da transportadora da retroárea (1c), coletam o contêiner vazio no *depot* (2c) e o transporta até o porto a fim de realizar a exportação (4). Ao final, o caminhão retorna para sua origem (transportadora) (5, 6 e 7; ou direto para 7).

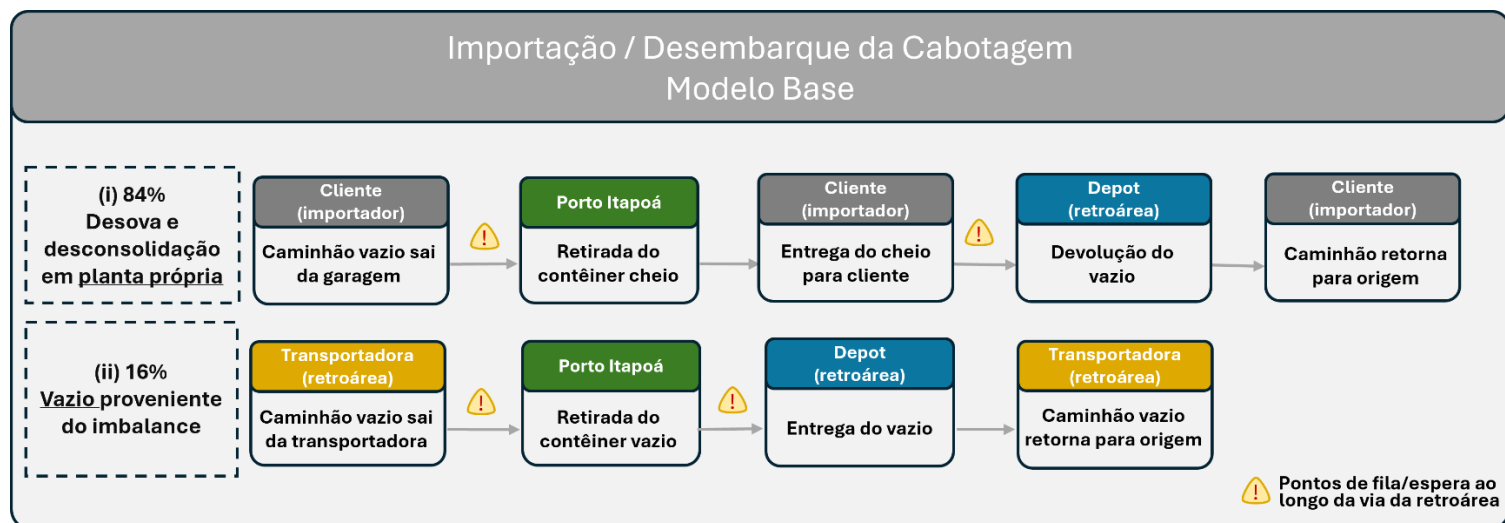
Figura 14 - Modelo conceitual – Exportação – Modelo base.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

A Figura 15 ilustra o fluxo de operações da importação e desembarque da cabotagem.

Figura 15 - Modelo conceitual – Importação – Modelo base

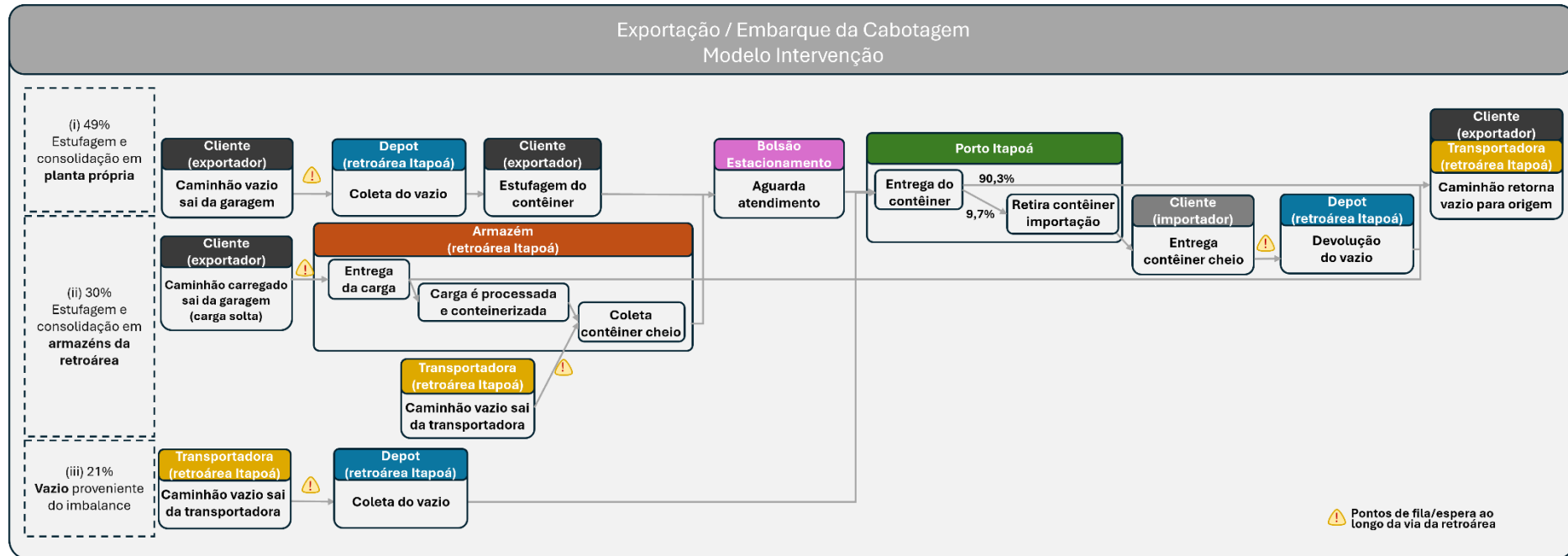


Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

No sentido oposto, a Figura 15 ilustra o fluxo de contêineres movimentados provenientes da importação dividido em dois: desova dos contêineres em planta própria (84%) e movimentação de contêineres vazios do *imbalance* (16%). Ainda, nos modelos conceituais apresentados, os símbolos amarelos com exclamação indicam os pontos possíveis de formação de fila e parada dos caminhões ao longo da retroárea, seja para espera de atendimento no porto, armazém ou *depot*.

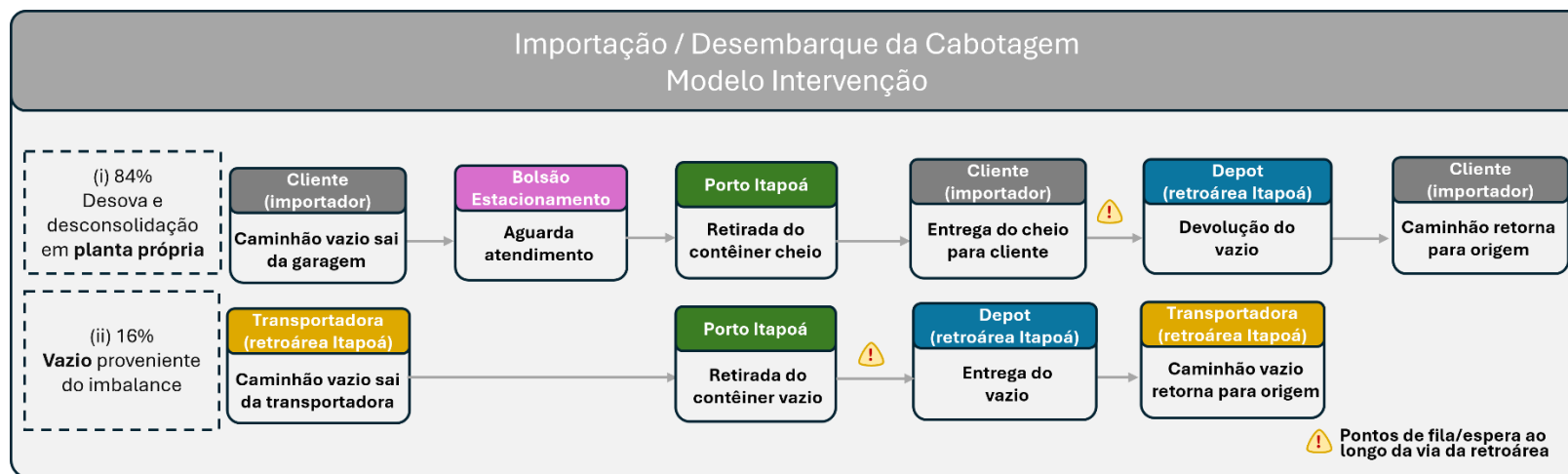
Os modelos intervenção consideram os mesmos fluxos de operação de importação e exportação ilustrados na Figura 14 e Figura 15, no entanto incluem um bolsão de estacionamento posicionado a 10 km do terminal portuário, assim como definido pela equipe de operações do Porto Itapoá. A ideia é que os caminhões devem se direcionar para o bolsão para aguardar pelo atendimento do porto e evitar formação de filas no *gate*. Vale ressaltar que caminhões transportando contêineres vazios para reposicionamento do *imbalance* não têm a obrigatoriedade de passar pelo bolsão de estacionamento devido ao fluxo operação simplificados. As Figura 16 e Figura 17 ilustram os modelos intervenção para a exportação e importação respectivamente.

Figura 16 - Modelo conceitual – Exportação – Modelo intervenção



Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Figura 17 - Modelo conceitual – Importação – Modelo Intervenção.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

### 3.2.3 Coleta e processamento de dados

A coleta de dados foi realizada de três diferentes maneiras, incluindo coleta *in loco*, recebimento de banco de dados do Porto Itapoá e reuniões com *stakeholders* e especialistas da área.

A visita *in loco* proporcionou um melhor entendimento da dinâmica da operação da retroárea, como identificação da via onde os caminhões tendem estacionar para esperar por atendimento, verificação da velocidade média de operação dos caminhões, além terem sido mapeados 16 *depots*, 19 armazéns.

Do banco de dados do Porto Itapoá, obteve-se uma estimativa diária média do fluxo de contêineres cheios movimentados pelo modal rodoviário na importação e exportação, volume de contêineres vazios provenientes do *imbalance* por direção de fluxo (importação/exportação), taxa de reaproveitamento de rotas, quantidade de veículos bitrem por dia e direção de fluxo, além dos tempos de atendimento por direção de fluxo.

Das conversas com *stakeholders* e especialistas, informações como quantidade média de navios atracados por dia no porto e janelas de atendimento, quantidade de RTGs e *reach stackers* disponíveis e detalhes da operação de atendimento a caminhões externos foram coletados. Tempos de atendimento em *depots* e armazéns e tempo médio de permanência das cargas no armazém foram também obtidos em conversas. As informações coletadas foram utilizadas como parâmetros ou como direcionamento para a modelagem se aproximar ao máximo da realidade.

Os dados coletados e utilizados como *input* para o modelo são apresentados resumidamente na subseção 3.2.6.

### 3.2.4 Mapa térmico

A Figura 18 ilustra o mapa de calor da localização das empresas que compõem a retroárea de Porto Itapoá, apoiando suas operações. Ao total, 42 empresas foram mapeadas, identificando que a composição da retroárea do Porto Itapoá se estende até o município de Garuva, onde concentram-se 8 empresas que atuam principalmente como armazéns e/ou transportadoras. As empresas foram classificadas em *depot*, armazém ou transportadora a fim de utilizar tais métricas de capacidade operacional da retroárea como *input* para o modelo de simulação com intervenção. Desta classificação, notou-se que os tipos de serviços oferecidos

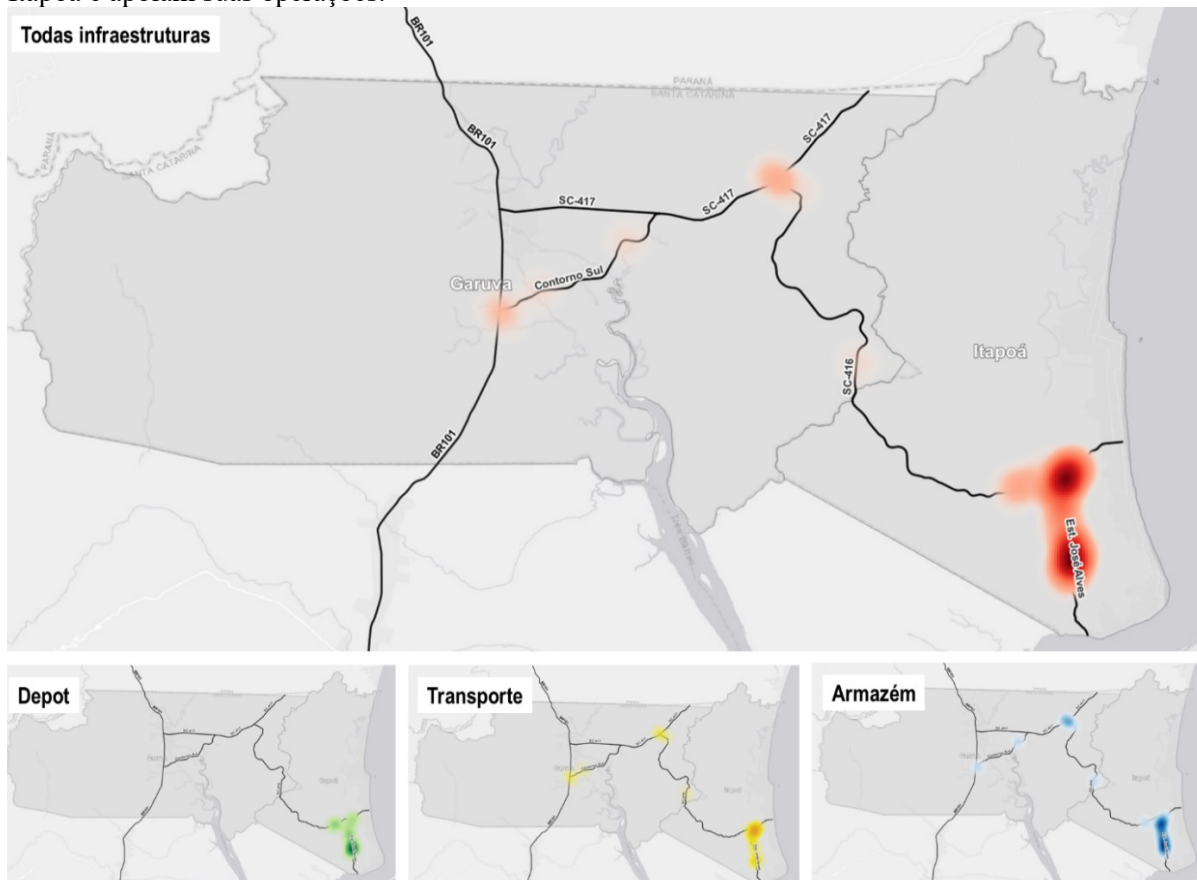
se mesclam em uma mesma infraestrutura, fazendo com que uma mesma empresa forneça serviços de armazenamento e transporte rodoviário, por exemplo.

Das 42 empresas, 16 fornecem serviços de *depot* e estão localizadas na Estrada José Alvez (mapa de calor em verde da Figura 18). Dessas 16, 5 contam somente com armazenamento de contêineres vazios, sem oferecer serviços de manutenção, higiene e vistoria. No entanto, tais infraestruturas foram abstraídas como *depots* para o modelo, já que os cenários implementados incluem principalmente em seus fluxos a coleta e devolução dos vazios, abstraindo as etapas de higienização, manutenção e vistoria.

Do montante, 19 fornecem serviços de armazém (mapa de calor azul), sendo cada empresa especializada em uma certa área de atuação, como armazenamento de cargas refrigeradas, produtos químicos e medicamentos. Além do mais, o tipo de serviço oferecido também varia, sendo que alguns armazéns oferecem os serviços de *cross-docking*, *packaging*, transporte rodoviário e outros atuam até como centros de distribuição.

Ainda, o mapa de calor amarelo ilustra as 24 empresas que oferecem o serviço de transporte rodoviário, podendo oferecer espaços dedicados ao armazenamento coberto para cargas soltas ou não.

Figura 18 – Mapa térmico de concentração das infraestruturas que compõem a retroárea do Porto Itapoá e apoiam suas operações.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

### 3.2.5 Definição da abordagem e ferramenta

As visitas *in loco*, bem como as reuniões com *stakeholders* e especialistas da área e a revisão bibliográfica foram os principais pilares para definição da abordagem e ferramenta que, em conjunto, melhor representariam a dinamicidade da retroárea do Porto Itapoá. Combinadas, abordagem e ferramenta precisam garantir flexibilidade de modelagem ao mesmo tempo que permitem a abstração dos detalhes no grau correto.

Tais visitas e reuniões garantiram um aprofundamento valioso nos detalhes do sistema da cadeia logística portuária em que o Porto Itapoá está inserido e como seus agentes interagem. Dados relevantes utilizados como *inputs* para o modelo foram coletados nesta etapa durante visitas e entrevistas. Já a revisão bibliográfica, forneceu perspectivas sobre abordagens e vantagens de cada método de simulação que poderia ser aplicado ao estudo.

Com a compreensão da dinâmica das operações da retroárea e da revisão bibliográfica e, optou-se pelo uso de simulação baseada em agentes devido a flexibilidade e capacidade de modelar componentes heterogêneos de um sistema maior e complexo, além de proporcionar escalabilidade (GARRO *et al.*, 2015; YILDIRIM *et al.*, 2022). Nesta abordagem, é possível decompor um sistema complexo em sistemas menores integrados e coordenados, compostos por múltiplos agentes, visando gerenciar sua complexidade (YILDIRIM *et al.*, 2022).

Para esta dissertação, os agentes representam a infraestrutura e as instalações da retroárea do Porto Itapoá, bem como os caminhões e contêineres movimentados. Com o uso do AnyLogic®, a metodologia possibilita a simulação dos modelos base e intervenção com alterações no arranjo da infraestrutura, permitindo a comparação de seus desempenhos através de indicadores de congestionamento, como velocidade média, tamanho das filas e tempo de espera.

O AnyLogic® é um software profissional de simulação que integra os três métodos de modelagem (baseada em agentes, eventos discretos e dinâmica de sistemas), garantindo flexibilidade e capacidade de representar virtualmente componentes heterogêneos reais. Sua interface permite o uso de diagrama de estados, programação orientada a objetos em Java, bem como dinâmica de sistemas e processos em fluxogramas para modelar o comportamento de agentes (BORSHCHEV, 2013). Para o presente estudo, o AnyLogic® foi escolhido dada capacidade de processamento, consolidação no mercado e experiência prévia da autora e devido à disponibilidade da versão profissional.

### 3.2.6 Implementação no AnyLogic®

A implementação do modelo de simulação foi conduzida com base nos dados e informações coletados nas etapas anteriores do estudo. O desenvolvimento seguiu um processo iterativo de testes de calibração, validação e verificação da lógica, incluindo ainda reuniões de apresentação de resultado para o time de operações do Porto Itapoá a fim de assegurar que o modelo represente fielmente a dinâmica real do sistema estudado.

A escolha pela plataforma AnyLogic® se deu por sua flexibilidade e ampla gama de bibliotecas disponíveis, especialmente aquelas voltadas à modelagem orientada a processos e à representação georreferenciada. A modelagem incluiu componentes da *Process Modeling Library* e ferramentas de geolocalização, permitindo incorporar a posição real do terminal, da Estrada José Alves, além de utilizar as distâncias e percursos reais.

O escopo do modelo concentra-se no fluxo rodoviário de contêineres, generalizando as operações internas de *depots*, armazéns e do próprio terminal portuário por meio de filas e tempos de atendimento médios. Além disso, o fluxo de cargas foi simplificado para dois tipos principais de contêineres: FCL (Full Container Load) e contêineres vazios, excluindo-se operações com carga fracionada (LCL). Essas abstrações foram adotadas para viabilizar a modelagem mantendo a aderência aos processos logísticos reais.

As premissas adotadas para a construção do modelo estão listadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Premissas adotadas no modelo.

Item	Premissa	Descrição	Valor	Fonte
1	Quantidade média diária de bitrem por direção de fluxo	N/A	Importação cheio: 175 Exportação cheio: 85	Banco de dados do Porto Itapoá
2	Quantidade média diária de contêineres por direção de fluxo e contêiner cheio ou vazio	N/A	Importação cheio: 683 Importação vazio: 175 Exportação cheio: 547 Exportação vazio: 313	Banco de dados do Porto Itapoá
3	Chegada agendada dos caminhões	Caminhões se direcionam ao porto com agendamento prévio	N/A	<i>Stakeholders</i> e especialistas
4	Taxa de reaproveitamento de rota	Percentagem dos caminhões de exportação que ao entregarem o cheio no porto, retiram outro contêiner de importação para entregar ao cliente.	9,7%	Banco de dados do Porto Itapoá
5	Número de <i>gates</i> para entrada	N/A	7	<i>Stakeholders</i> e especialistas

6	Tempo de atendimento médio no porto por direção de fluxo e contêiner cheio ou vazio	N/A	Importação cheio: 25min Importação vazio: 10min Exportação cheio: 25.5min Exportação vazio: 10min	Banco de dados do Porto Itapoá
7	Atendimento dos vazios no porto	N/A	6 empilhadeiras	<i>Stakeholders e especialistas</i>
8	Atendimento dos cheios no porto	Programação da operação dos RTGs alinhada com a atracação dos navios, disponibilizando 11, 15, ou 17 RTGs a depender da disponibilidade.	11, 15 ou 17 <i>reach stackers</i>	<i>Stakeholders e especialistas</i>
9	Percentagem carga processada na retroárea para exportação	Percentagem das cargas (como madeira e celulose) que requerem preparo, unitização, ou estufagem na retroárea antes de serem direcionadas para a exportação.	30%	<i>Stakeholders e especialistas</i>
10	Contêineres de importação são desovados em planta própria apenas	N/A	N/A	Abstração
11	Velocidade média caminhões	N/A	50km/h	Visita <i>in loco</i>
12	Redução de velocidade média dos caminhões	Taxa de redução aplicada à velocidade média dos caminhões. Proporcional ao tamanho da fila na Estrada José Alves e volume de caminhões transitando na via.	20-90%	Abstração
13	Velocidade média caminhões fora da retroárea	N/A	80 km/h	Visita <i>in loco</i>
14	Representação do <i>depot</i>	O modelo inclui apenas um elemento de <i>depot</i> , mas que atende com capacidade equivalente de 16 <i>depots</i> , representando assim a realidade com certo grau de abstração.	N/A	Abstração
15	Tempo de atendimento no <i>depot</i>	N/A	30 min	<i>Stakeholders e especialistas</i>
16	Representação do armazém	O modelo inclui apenas um elemento de armazém, mas com que atende com capacidade de 19 armazéns, representando assim a realidade com certo grau de abstração.	N/A	Abstração
17	Tempo de atendimento no armazém	N/A	Entrega de carga: 60 min Retirada contêiner cheio: 30min	<i>Stakeholders e especialistas</i>
18	Tempo de permanência da carga no armazém	Tempo necessário para o armazém processar e unitizar a carga solta.	2 dias	<i>Stakeholders e especialistas</i>
19	Tempo no cliente (exportador e importador)	Tempo de deslocamento do Contorno Sul somado ao tempo	6-8h	<i>Stakeholders e especialistas</i>

		de operação (estufagem ou desova) no cliente		
20	Localização do bolsão	Local de implantação do bolsão de estacionamento	Na Estrada José Alves, a 10km do Porto Itapoá	<i>Stakeholders</i> e especialistas

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Itens 1 e 2 do Quadro 3 foram essenciais para definir os volumes movimentados diariamente pelo Porto de Itapoá por direção do fluxo, sendo combinados com o item 3 e utilizados como parâmetros de entrada para o bloco '*Source*' do AnyLogic®. Os itens 4 a 8 foram utilizados pelo modelo para melhor representar a operação interna e a capacidade do porto, sendo aplicados aos parâmetros '*Delay Time*' e '*Resources*' do bloco '*Service*'. Os itens 9 e 10 podem ser classificados como parâmetros que representam a natureza da operação com base na demanda e nas capacidades produtivas da região, refletindo nas características das cargas movimentadas. Estes foram usados para modelar a sequência de atividades realizadas pelos blocos '*MoveTo*', '*Pickup*' e '*Dropoff*'. Os itens 11 ao 13 foram inseridos no parâmetro '*Speed*' dos blocos '*MoveTo*' a fim de representar a velocidade real de operação dos caminhões. Os itens 14 ao 18 foram utilizados parâmetros para '*Delay Time*' e '*Resources*' do bloco '*Service*', representando a realidade das operações e capacidades da retroárea. O item 19 foi utilizado como parâmetro para o bloco '*Delay*', representando de forma generalista o tempo de deslocamento dos caminhões até a planta do exportador ou importador somado ao tempo operação de estufagem ou desova dos contêineres, respectivamente. Por fim, o item 20 indica a localização do bolsão de estacionamento definida em reunião pela equipe de operações do Porto Itapoá.

Cada um dos modelos implementados (base, sem bolsão, e de intervenção, com bolsão) foram aplicados em dois diferentes cenários: com dados da movimentação anual atual referente ao ano de 2025 e com a estimativa de movimentação anual de 2033 após a finalização do projeto de expansão do terminal.

A geração de caminhões diária no modelo foi parametrizada com base nos volumes médios diários disponibilizados pelo banco de dados do Porto Itapoá, conforme apresentado no Quadro 3, itens 1 e 2. Esses dados contemplam a quantidade média diária de contêineres movimentados, segmentados por tipo de veículo (bitrem ou não), direção de fluxo (importação e exportação) e por tipo de contêiner (cheio e vazio). A partir desses valores, foram definidas as taxas de chegada dos caminhões no modelo de simulação, garantindo que o volume total diário de veículos gerados fosse consistente com a movimentação observada na operação real.

Como não havia disponibilidade de dados detalhados sobre a distribuição intradiária das chegadas (por faixa horária), o bloco ‘*Source*’ foi configurado para apresentar chegada exponencial, fazendo com que alguns caminhões demorem mais para chegar, mas que alguns cheguem logo após outros, garantindo ao mesmo tempo a média diária como referência principal. Essa abordagem permite representar adequadamente a pressão operacional exercida sobre a retroárea do porto, viabilizando a comparação de desempenho entre os cenários avaliados

Quanto ao bolsão de estacionamento, este foi modelado como uma intervenção estrutural fixa, representando apenas a reorganização do espaço viário e a internalização das filas. O modelo não contempla parâmetros explícitos de capacidade ou políticas de operação do bolsão, portanto não é possível avaliar sensibilidade quanto ao dimensionamento ótimo, sendo considerado uma limitação metodológica.

O Quadro 4 lista os cenários implementados no AnyLogic®. Os cenários foram rodados em um período de 2 semanas de simulação devido às limitações de quantidade de agentes permitidas na versão estudantil do *software*. No entanto, o horizonte de simulação reduzido não compromete a robustez ou validade do estudo. Isso ocorre porque a abordagem utiliza parâmetros derivados da mediana de dados de históricos, capturando padrões de longo prazo e comportamento operacional estável, abstraindo flutuações de curto prazo e variações sazonais.

Quadro 4 – Cenários implementados no AnyLogic®.

Siglas	Cenário	Dados
1a	Base (sem bolsão)	Atual (2025)
2a	Intervenção (com bolsão)	
1f	Base (sem bolsão)	Futuro (2033)
2f	Intervenção (com bolsão)	

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Para os Modelos 1f e 2f foram utilizadas as mesmas premissas adotadas pelos modelos base (1a e 2a), mas com os dados de movimentação atualizados de acordo com a Tabela 1. Ainda, o número de *reach stackers* operando no porto e *gates* de entrada e saída foram ajustados usando a proporção do aumento de movimentação. A capacidade dos *depots* e armazéns foram considerados infinitos a fim de não se tornarem um gargalo no sistema.

Tabela 1 – Movimentação de contêiner diária futura do Porto Itapoá pós-expansão.

	<b>Movimentação diária futura em contêineres (2033)</b>
Importação cheio	1.115
Importação vazio	286
Exportação cheio	893
Exportação vazio	511

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

A fim de viabilizar a análise comparativa de desempenho dos cenários, os indicadores de congestionamento, nível de serviço e emissão de gases do efeito estufa listados abaixo foram implementados nos modelos:

- Tempo Total de Ciclo,
- Horas Inativas,
- Emissão de CO<sub>2</sub>,
- Tamanho das Filas,
- Caminhões Simultaneamente na Retroárea,
- Velocidade de Operação na Retroárea, e
- Viagens Concluídas.

O indicador Tempo Total de Ciclo mede a duração do processo logístico em terra para exportações ou importações, excluindo operações portuárias. Para as exportações, estende-se desde a coleta do contêiner vazio na retroárea até a entrega do contêiner cheio no porto, incluindo o processo de estufagem. Para importações, a contagem do tempo inicia-se com a coleta do contêiner cheio no porto e termina com a devolução do contêiner vazio no *depot* após a desova da carga. Essa métrica é essencial para avaliar a eficiência logística e identificar gargalos na cadeia de suprimentos.

As Horas Inativas representam o tempo médio que os caminhões permanecem em fila do lado de fora do terminal aguardando o atendimento do Porto. A partir deste indicador, é possível calcular a Emissão de CO<sub>2</sub> evitada.

A estimativa de Emissão de CO<sub>2</sub> considera apenas as emissões associadas ao tempo de inatividade dos caminhões (marcha lenta e permanência em fila), pois esta é a parcela diretamente influenciada pelo congestionamento e pelo efeito do bolsão de estacionamento. As emissões relacionadas ao deslocamento em movimento não foram contabilizadas explicitamente, uma vez que o objetivo do indicador é comparar o impacto relativo entre

cenários e não produzir um inventário completo de emissões do sistema. Assim, o fator médio de emissão adotado de 2,5 kg de CO<sub>2</sub>/h (EUA EPA, 2014) deve ser interpretado como uma aproximação para fins comparativos, podendo ser refinado em estudos futuros com parâmetros específicos da frota brasileira.

Tamanho das Filas apresenta o tamanho das filas em número de caminhões, sendo estes localizados do lado de fora do terminal e aguardando por atendimento do porto. Já o indicador Caminhões Simultaneamente na Retroárea apresenta a quantidade mediana de caminhões estacionados e circulando na retroárea ao mesmo tempo, sendo que os cenários de intervenção (2a e 2f) não contém caminhões estacionados ao longo da Estrada José Alves, apenas circulando.

Por fim, a Velocidade de Operação na Retroárea apresenta a velocidade mediana de operação dos caminhões na retroárea e Viagens Concluídas apresenta o número de viagens concluídas para o período simulado (2 semanas).

### 3.2.6.1 Representação agregada do terminal portuário

O terminal portuário foi representado no modelo como um nó de atendimento agregado (servidor), responsável por absorver o fluxo de caminhões que ingressa no porto para realização das operações de carga e descarga. Dessa forma, as atividades internas do terminal (*gate*, pátio, movimentação e armazenagem de contêineres) não foram modeladas explicitamente em nível microscópico, sendo abstraídas por meio de filas e tempos médios de atendimento.

Essa abordagem foi adotada pois o objetivo central do estudo é avaliar a fluidez do tráfego rodoviário na retroárea e o impacto da implantação de um bolsão de estacionamento sobre a formação de filas externas, congestionamento e tempo total de ciclo. Assim, o terminal portuário é tratado como uma interface operacional do sistema, cuja capacidade de atendimento influencia diretamente o comportamento das filas na retroárea, mas cuja dinâmica interna não constitui o foco da análise.

A representação agregada permite reduzir a complexidade do modelo, garantir viabilidade computacional e manter aderência ao problema investigado, preservando os principais mecanismos causadores de congestionamento externo, isto é, a interação entre a taxa de chegada de caminhões e a capacidade de atendimento do terminal.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Esse Capítulo contempla os resultados dos sete indicadores, trazendo a comparação de desempenho entre os modelos que utilizam os dados atuais (1a e 2a) e entre aqueles que utilizam os dados futuros (1f e 2f), apresentando os efeitos da implantação de um bolsão de estacionamento para caminhões sobre a fluidez de operação da retroárea do Porto Itapoá.

Os indicadores são coletados a partir do 11º dia de simulação, garantindo assim um período de aquecimento dos modelos e assegurar maior estabilidade de sistema. Os resultados apresentados em forma de tabelas foram obtidos a partir da mediana de cinco simulações por cenário e utilizando sementes aleatórias a fim de reduzir o impacto de *outliers*.

### 4.1 MODELOS 1A E 2A (DADOS ATUAIS, 2025)

Os resultados indicam que a inclusão do bolsão na retroárea do Porto Itapoá tem o potencial de reduzir o tempo total de ciclo em 25,6% e 24,53% nos fluxos de importação e exportação de contêineres cheios respectivamente (Tabela 2). Isso equivale aproximadamente 676,3 mil horas e 844,4 mil horas economizadas anualmente, permitindo a realização de 56,9 mil e 70,7 mil viagens adicionais respectivamente. Para contêineres vazios, o tempo de ciclo foi reduzido em 50,7% e 49,5%, indicando que 65,7 mil e 70,7 mil viagens adicionais anualmente podem ser concluídas.

Tabela 2 – Comparação de resultados: Tempo Total de Ciclo (Modelos 1a e 2a).

Tempo total de ciclo (em horas)				
Direção de fluxo e tipo de contêiner		Modelo base (1a)	Modelo intervenção (2a)	Diferença percentual
Importação	Contêiner cheio	16,0	11,9	-25,6%
	Contêiner vazio	2,1	1,1	-50,7%
Exportação	Contêiner cheio	15,8	11,9	-24,5%
	Contêiner vazio	2,1	1,1	-49,5%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

A redução geral de Horas Inativas, Tamanho das Filas, Caminhões Simultaneamente na Retroárea, Velocidade de Operação na Retroárea e Viagens Concluídas também são significantes (Tabelas 3-7). As Horas Inativas (Tabela 3) foram reduzidas para ambas as direções de escoamento (importação: 45,0%; exportação: 47,8%), mas sem alteração para o *imbalance*.

Tabela 3 – Comparação de resultados: Horas Inativas (Modelos 1a e 2a).

Horas Inativas			
Direção de fluxo	Modelo base (1a)	Modelo intervenção (2a)	Diferença percentual
Importação	2,6	1,4	-45,0%
Exportação	2,6	1,3	-47,8%
<i>Imbalance</i>	0,1	0,1	0,0%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Com os valores de Horas Inativas economizadas por caminhão apresentados na Tabela 3, foi possível obter a redução da Emissão de  $CO_2$  anual que o cenário de intervenção proporciona. Assumindo uma emissão média de 2,5 kg/h de  $CO_2$  para caminhões a diesel inativos (EUA EPA, 2014), o cenário de intervenção (2a) é capaz de evitar a emissão de 343,6 tons de  $CO_2$  por ano.

O indicador Tamanho das Filas apresenta uma mediana da fila total de 152,3 caminhões estacionados ao longo da Estrada José Alves para o Modelo base (1a), enquanto o cenário de intervenção (2a) apresenta uma mediana de fila total de 76,0 caminhões, considerando os veículos estacionados no bolsão e em fila nos *gates*, sendo que aqueles estacionados no bolsão somam 58,1 caminhões (ou 76,4% da fila), reduzindo a fila nos *gates* para 17,8 (-88,3%) (Tabela 4). Arredondando para cima, os resultados indicam que para a movimentação atual (2025), o bolsão precisaria ter uma capacidade mínima de 59 caminhões.

Tabela 4 – Comparação de resultados: tamanho médio das filas (Modelos 1a e 2a).

Tamanho das Filas (em número de caminhões)					
Direção de fluxo	Modelo base (1a)	Modelo intervenção (2a)		Diferença percentual	
	Gate	Gate	Bolsão	Gate	Total
Importação e exportação	152,2	17,8	58,1	-88,3%	-50,1%
<i>Imbalance</i>	0,1	0,1	N/A	0,0%	N/A
Total	152,3	76,0		-50,1%	

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Como complemento, a Tabela 5 mostra que o cenário de intervenção (2a) reduz a mediana da quantidade de caminhões simultaneamente na retroárea em 67,9%, representando 220,8 caminhões a menos na retroárea, garantindo maior fluidez operacional na região enquanto os caminhões que aguardam serviços portuários ficam estacionados no bolsão. Vale ressaltar que dos 325,1 caminhões simultaneamente na retroárea no cenário 1a (Tabela 5) uma mediana de 152,2 se encontram em fila (Tabela 4) e atrapalhando o fluxo de operações, fazendo com que os caminhões em circulação tenham que reduzir suas velocidades de operação. A

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Tabela 6 mostra os impactos na velocidade média de operação na retroárea, revelando que o bolsão tem o potencial de aumentar a velocidade média de operação dos caminhões de 26,0 para 50,0 km/h.

Tabela 5 - Comparação de resultados: Caminhões simultaneamente na retroárea (Modelos 1a e 2a).

<b>Caminhões simultaneamente na retroárea</b>		
Modelo base (1a)	Modelo intervenção (2a)	Diferença percentual
325,1	104,3	-67,9%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Tabela 6 – Comparação de resultados: Velocidade de Operação na Retroárea (Modelos 1a e 2a).

<b>Velocidade de Operação na Retroárea (km/h)</b>		
Modelo base (1a)	Modelo intervenção (2a)	Diferença percentual
26,0	50,0	92,3%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Além disso, os resultados da

Tabela 7 demonstram que o cenário de intervenção tem o potencial de aumentar o número de viagens concluídas em 0,4 % para o período de 2 semanas.

Tabela 7 – Comparação de resultados: Viagens Concluídas (Modelos 1a e 2a).

<b>Viagens concluídas</b>		
Modelo base (1a)	Modelo intervenção (2a)	Diferença percentual
19,810.0	19,897.0	0.4%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

#### 4.2 MODELOS 1F E 2F (DADOS FUTUROS, 2033)

A comparação dos resultados dos cenários com dados futuros (1f e 2f) mostram que o bolsão atua como uma ferramenta eficiente no gerenciamento de congestionamento na retroárea do Porto Itapoá.

Da Tabela 8, nota-se uma redução de 22,7% e 22,6% no Tempo Total de Ciclo nos fluxos de importação e exportação dos contêineres cheios respectivamente. As Horas Inativas (Tabela 9) também apresentam uma redução significativa de 37,6% e 39,0%, evitando a emissão de 563,3 tons de  $CO_2$  por ano.

Tabela 8 – Comparação de resultados: Tempo Total de Ciclo (Modelos 1f e 2f).

Tempo Total de Ciclo (em horas)					
Direção de fluxo e tipo de contêiner		Modelo base (1f)	Modelo intervenção (2f)	Diferença percentual	
Importação	Contêiner cheio	16,03	12,4	-22,7%	
	Contêiner vazio	1,9	1,0	-49,6%	
Exportação	Contêiner cheio	16,0	12,4	-22,6%	
	Contêiner vazio	1,9	1,0	-49,7%	

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Tabela 9 – Comparação de resultados: Horas Inativas (Modelos 1f e 2f).

Horas Inativas			
Direção de fluxo	Modelo base (1f)	Modelo intervenção (2f)	Diferença percentual
Importação	3,1	2,0	-37,6%
Exportação	3,1	1,9	-39,0%
<i>Imbalance</i>	0,0	0,0	0,0%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Da Tabela 10, o bolsão proporciona a redução da fila no *gate* em 86,4%. No Modelo base (1f), uma mediana de 313,6 caminhões fica em fila na Estrada José Alves aguardando por atendimento do *gate*. Já no Modelo intervenção (2f), esta fila cai para 42,7 caminhões enquanto uma mediana de 121,1 caminhões são redirecionados para o bolsão e aguardam por atendimento estacionados. A redução de fila pode ser notada de forma geral e não só no *gate*, fazendo que a mediana do tamanho da fila total no cenário de intervenção seja 47,7% menor. Para complementar a análise, a Tabela 11 mostra a quantidade mediana de caminhões na retroárea para ambos os modelos, incluindo caminhões estacionados e circulando. A Tabela 11 revela que o bolsão é capaz de reduzir em 81,3% os caminhões da retroárea, melhorando a fluidez de operação na Estrada José Alves e fazendo com que a Velocidade de Operação na Retroárea seja 50 km/h, em vez de 10km/h (Tabela 12).

Tabela 10 – Comparação de resultados: tamanho médio das filas (Modelos 1f e 2f).

Tamanho das Filas (em número de caminhões)					
Direção de fluxo	Modelo base (1f)	Modelo intervenção (2f)		Diferença percentual	
	<i>Gate</i>	<i>Gate</i>	Bolsão	<i>Gate</i>	Total
Importação e exportação	313,6	42,7	121,1	-86,4%	-47,7%
<i>Imbalance</i>	0,0	0,0	N/A	0,0%	N/A
Total	313,6	163,8		-47,7%	

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

Tabela 11 – Comparação de resultados: Caminhões Simultaneamente na Retroárea (Modelos 1f e 2f).

<b>Caminhões simultaneamente na retroárea</b>		
Modelo base (1f)	Modelo intervenção (2f)	Diferença percentual
541,0	101,0	-81,3%

Tabela 12 – Comparação de resultados: Velocidade de Operação na Retroárea (Modelos 1f e 2f).

<b>Velocidade de Operação na Retroárea (km/h)</b>		
Modelo base (1f)	Modelo intervenção (2f)	Diferença percentual
11,0	50,0	356,0%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

A baixa Velocidade de Operação na Retroárea no Modelo base (1f) é explicada pelo espaço limitado para circulação dos caminhões. Assumindo que cada caminhão ocupe 20m estacionado, os 313,6 caminhões (Tabela 10) em fila em *vagas* irregulares na retroárea acumulam cerca de 6km de extensão. Sabendo que a Estrada José Alvez tem cerca de 8km, pode-se considerar que neste cenário apenas uma faixa fica disponível para circulação. Levando em consideração a extensão mediana da fila formada na retroárea no cenário 1f e o seu impacto na circulação de veículos, surge a preocupação com a interrupção de operações caso nenhuma intervenção seja feita na infraestrutura rodoviária e o Porto Itapoá ultrapasse a meta de movimentação de 2.000 TEUs anuais.

Em análise adicional, para o mesmo período de simulação, o cenário de intervenção (2f) foi capaz de concluir 7,2% viagens a mais (ou 3.133 viagens) que o Modelo base (1f), revelando maior eficiência operacional (Tabela 13). Esse aumento indica que o Modelo intervenção (2f) proporciona um aumento na eficiência do terminal, permitindo que mais caminhões sejam atendidos em um mesmo período, impactando economicamente a região e o Brasil. Quanto ao impacto ambiental, um estudo mais detalhado deve ser realizado, já que tal melhoria de desempenho é decorrente da redução das Horas Inativas, do Tempo Total de Ciclo, do Tempo Total de Ciclo e da Velocidade de Operação na Retroárea. Ou seja: ao passo que caminhões *inativos* emitindo CO<sub>2</sub> são reduzidos do sistema, mais caminhões *ativos* são incluídos.

Tabela 13 – Comparação de resultados: Viagens Concluídas (Modelos 1f e 2f).

<b>Viagens concluídas</b>		
Modelo base (1f)	Modelo intervenção (2f)	Diferença percentual
43.657,5	46.808,5	7,2%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2026).

A redução dos indicadores Tempo Total de Ciclo, Horas Inativas, Emissão de CO<sub>2</sub>, Tamanho das Filas e Viagens Concluídas do Modelo base (1f) para a intervenção (2f) se dá principalmente por conta do redirecionamento dos caminhões para o bolsão, que alivia o acúmulo destes ao longo da Estrada José Alves. Do Modelo base (1f), nota-se que a fila de 6km ao longo da Estrada José Alves atrapalha a fluidez de operação, causando congestionamento e reduzindo a Velocidade de Operação na Retroárea. Ao redirecionar estes veículos para o bolsão, a retroárea fica mais livre, permitindo um fluxo mais constante e eficiente, melhorando os indicadores de forma geral.

Assim, nota-se a importância de uma intervenção na infraestrutura rodoviária limitada existente que seja capaz de gerenciar o fluxo aumentado esperado para 2033 e proporcionar um crescimento sustentável ao terminal. Se nada for feito, o Modelo base (1f) revela que a velocidade média dos caminhões na retroárea pode chegar a 10km/h, sendo um indício de interrupção das operações na retroárea, impactando assim o desempenho do Porto Itapoá.

## 5 CONCLUSÕES

A presente dissertação propõe um modelo de simulação baseada em agentes que avalia a fluidez operacional da infraestrutura rodoviária existente na retroárea do Porto Itapoá e os efeitos da implantação de um bolsão de estacionamento no gerenciamento de tráfego de caminhões e na eficiência operacional de movimentação de contêineres. O estudo realiza análise comparativa de desempenho de dois modelos principais: base (sem bolsão de estacionamento) e intervenção (com o bolsão de estacionamento). Indicadores de nível de congestionamento, eficiência operacional e emissões de gases de efeito estufa são avaliados, como Tempo Total de Ciclo, Horas Inativas, Emissão de CO<sub>2</sub>, Tamanho das Filas, Caminhões Simultaneamente na Retroárea, Velocidade de Operação na Retroárea e Viagens Concluídas foram definidos para avaliar a eficácia da intervenção no cenário atual (dados de movimentação de 2025) e futuro (2033, pós-expansão do terminal).

Embora o problema do congestionamento nas retroáreas portuárias seja amplamente reconhecido na literatura, este estudo insere-se em um contexto específico: o Porto Itapoá passa por um processo de duplicação de sua capacidade operacional sem o devido planejamento de suporte em sua retroárea. Além do mais, não foi encontrado nenhum trabalho que avaliasse o impacto de um bolsão de estacionamento na fluidez de operações na retroárea levando em consideração indicadores de congestionamento e desempenho do terminal portuário. Os modelos de simulação contemplam, além dos fluxos diretos ao terminal, os deslocamentos relacionados a operações complementares de importação e exportação, ampliando a abrangência da análise.

Os resultados demonstram que a implantação de um bolsão de estacionamento para caminhões melhora significativamente a fluidez operacional e a sustentabilidade do porto, acomodando o crescimento previsto da demanda após o projeto de expansão. Além de acomodar maiores volumes anuais de contêineres com eficiência, o bolsão de estacionamento proporciona tempos de ciclo mais curtos, possibilitados por maior fluidez de operação na Estrada José Alves, acarretando um melhor desempenho econômico e fortalecendo sua competitividade de longo prazo.

Além dos ganhos operacionais, os impactos positivos também podem se estender ao desenvolvimento econômico regional e à redução de externalidades negativas sobre a comunidade local. Tempos de ciclos mais curtos permitem que frotas de caminhões e número de viagens por veículo sejam otimizadas, acelerando a atividade econômica local. Além disso,

a realocação de caminhões para o bolsão contribui para operações mais seguras na retroárea, mitigando impactos negativos nas comunidades locais.

Os resultados indicam que a infraestrutura rodoviária atual da retroárea consegue absorver a movimentação futura esperada pós-projeto de expansão, mas que devido às longas filas (313,6 caminhões), a velocidade operacional pode cair para 10km/h, causando lentidões e atrasos. O estudo indica que o Porto Itapoá pode passar por interrupção de operação caso nenhuma intervenção na infraestrutura rodoviária seja feita e a movimentação anual ultrapasse os 2.000 TEUs esperados.

Apesar dos benefícios identificados, a incorporação de um estacionamento de caminhões na retroárea é uma iniciativa de longo prazo e alto investimento. Recomenda-se que seja realizado um estudo aprofundado da área, considerando planos diretores urbanos e discussões com autoridades locais para garantir o alinhamento com as estruturas regulatórias e de infraestrutura. Quanto mais cedo for implementada, melhor apoiará as operações portuárias, promovendo a expansão sustentável e mitigando possíveis interrupções operacionais. Ainda, sugere-se estudos de planejamento do bolsão, bem como capacidade estática, para garantir que a instalação atenda às crescentes demandas do porto.

A simulação baseada em agentes se mostrou uma ferramenta eficiente para avaliação dos impactos da inclusão de um bolsão de estacionamento na retroárea do Porto Itapoá, sendo flexível e capaz de representar a complexidade de operações da cadeia logística portuária do terminal. Devido à natureza parametrizada dos modelos desenvolvidos, a metodologia pode ser replicada e adaptada à contextos específicos de cada cadeia logística portuária, servindo como uma ferramenta de estudo e de apoio à tomada de decisão, capaz de orientar investimentos estratégicos. No contexto em que o Porto Itapoá está inserido, os modelos auxiliam na avaliação da infraestrutura existente e a resiliência das operações portuárias frente à expansão do terminal.

O estudo ainda contribui para o estado da arte no que tange à trabalhos que abordam o uso de simulação baseada em agentes para investigação de métodos para gerenciamento de congestionamento em retroáreas portuárias.

Apesar de anunciado pelo CEO do Porto Itapoá a confirmação da duplicação da Estrada José Alves (ARTEN, 2026), esta intervenção não foi considerada como um cenário de estudo, pois pela abordagem da simulação, o aumento da capacidade da via acabaria sendo interpretado como um acréscimo de *vagas* irregulares de estacionamento ao longo da retroárea. Isso aconteceria, pois com considerações conservadoras de que 50% (ou 4km) da via representa entradas e portões, cerca de 200 caminhões conseguiriam estacionar irregularmente de cada

lado, representando uma capacidade total para 400 *vagas* irregulares para os dois sentidos de fluxo. Baseado na mediana da fila gerada pelo cenário base futuro (1f, sem bolsão), a duplicação da Estrada José Alves seria capaz de acomodar os caminhões estacionados em *vagas* irregulares, permitindo ainda um fluxo operacional nas duas faixas centrais.

Isso seria possível, pois os resultados do indicador de Caminhões Simultaneamente na Retroárea (circulando e estacionados) deste mesmo cenário (1f) apresentam mediana de 541 caminhões, fazendo com que aproximadamente 228 (541-313) caminhões estejam circulando enquanto os outros 313 estão em fila. De acordo com os parâmetros do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006), 228 caminhões são acomodados com folga nas em duas faixas. Além do mais, o AnyLogic®, por não ser um software de simulação de tráfego, não realiza avaliação de interação de veículos e congestionamento, impedindo uma análise mais profunda da interação dos veículos baseado em volume, trajeto e velocidade. Como sugestão de expansão de estudo, sugere-se o desenvolvimento de um modelo de micro simulação de tráfego para avaliação dos efeitos da duplicação da Estrada José Alves.

Ressalta-se como limitação do estudo o fato de que a geração de caminhões foi baseada em médias diárias de movimentação, não incorporando padrões intradiários detalhados de chegada (picos horários e variações associadas a janelas operacionais e turnos). Dessa forma, embora o modelo represente adequadamente a magnitude do fluxo diário de caminhões, análises futuras poderiam incorporar distribuições horárias empíricas a fim de avaliar o impacto de flutuações de demanda ao longo do dia sobre os níveis de congestionamento e formação de filas.

Também se sugere como complementação à presente dissertação, que seja realizado um estudo de dimensionamento ótimo do bolsão (capacidade mínima), contemplando análises de demanda anual, padrões de chegada dos caminhões, características dos veículos e tempo de permanência nas *vagas*.

## REFERÊNCIAS

- ABOURRAJA, M. N., OUDANI, M., SAMIRI, M. Y., BOUKACHOUR, J., ELFAZZIKI, A., BOUAIN, A., NAJIB, M. An improving agent-based engineering strategy for minimizing unproductive situations of cranes in a rail–rail transshipment yard. Simulation: **Transactions of the Society for Modeling and Simulation International**, v.94, 2018. 10.1177/0037549717733050
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. Brasília: ANTAQ, 2025. Estatístico Aquaviário. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt> . Acesso em: 20 set. 2025.
- ALIAS C., FELDE J. Z., SEVERIN S. Examining the logistics performance of a decentralized waterborne container transportation service in the west German Canal Network with the help of discrete-event simulation. *In Proceedings of: 10th PIANC Smart Rivers Conference, Smart Rivers 2022*.
- ARTEN, R. Duplicação da SC-416. LinkedIn, 2026. Disponível em: [https://www.linkedin.com/posts/ricardo-arten-91101624\\_buildingthefuture-activity-7427039462234345472-OZpX?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop&rcm=ACoAABoqm-oBc\\_buKN\\_B4-RYTMVL05tRWEEERN0](https://www.linkedin.com/posts/ricardo-arten-91101624_buildingthefuture-activity-7427039462234345472-OZpX?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAABoqm-oBc_buKN_B4-RYTMVL05tRWEEERN0). Acesso em: 14 fev. 2026.
- BAALEN, P. J. V.; V.; ZUIDWIJK, R.; NUNEN, J. V. Port inter-organizational information systems: capabilities to service global supply chains. **Technology, Information and Operations Management**, v. 2, n.2, 2008.
- BENEDECTI, R.C. Avaliação operacional e econômica de um serviço hidroviário na cadeia logística do Porto Itapoá. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes e Logística) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- BENEDECTI, R.C., SILVA, V.M.D., COSTA, G.A.A. Integrated simulation of an inland container terminal and waterway service for enhancing the maritime supply chain connectivity between Joinville and Itapoá Port. **Latin American Transport Studies**, v.2, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.latran.2024.100019>.
- BEZERRA, L.M., SILVA, V.M.D., da SILVA, D.L. Integrated thermal and routing analysis applied for cold supply chain. *Journal of Food Process and Preservation* v. 46, v.12, 2022.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual De Estudos De Tráfego**. Rio de Janeiro: IPR, 2006. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723\\_manual\\_estudos\\_trafego.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf). Acesso em: 30 jan. 2026.
- BRASIL. Ministério de Portos e Aeroportos, Governo no Estado do Rio Grande do Sul. Plano de desenvolvimento e zoneamento do porto do Rio Grande do Sul. Rio Grande, nov., 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Rio de Janeiro: MDIC, 2025. Exportações e importações geral. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Plano Nacional de Logística Portuária. 2015. Disponível em: <https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/920>. Acesso em: 11 ago. 2021.

BRASIL. Secretaria de portos da presidência da república. Plano mestre do Porto de Paranaguá. Florianópolis, 2013.

BORSHCHEV, A. **The big book of simulation modeling**: Multimethod Modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Brasília: CNI, 2016. As Barreiras da burocracia o setor portuário. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/9/barreiras-da-burocracia-setor-portuario/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

DA SILVA, M.R.F., AGOSTINO, I.R.S., FRAZZON, E.M. Integration of machine learning and simulation for dynamic rescheduling in truck appointment systems. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 2023.

DANTAS, R. Por que Itajaí cometeu um erro estratégico na licitação do porto, condenando a cidade ao desemprego e queda de arrecadação? Portos e Navios, Rio de Janeiro, 14 jul. 2023, artigo. Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/artigos/artigos-de-opinioao/artigo-por-que-itajai-cometeu-um-erro-estrategico-na-licitacao-do-porto-condenando-a-cidade-ao-desemprego-e-queda-de-arrecadacao>. Acesso em: 22 jun. 2024

DAYA, B., AUDY, J.F. Port Access Fluidity Management during a Major Extension Project: A Simulation-Based Case Study. **Sustainability Journal**, v. 6, pp. 2834, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16072834>.

DÉMARE, T., BERTELLE, C., DUTOT, A., LÉVÊQUE, L. Modeling logistic systems with an agent-based model and dynamic graphs. **Journal of Transport Geography**, v.62, p.51-65, 2017. 10.1016/j.jtrangeo.2017.04.007

DIAS U.G.M.D., THARAKA V.K., NANAYAKKARA J.N. A simulation model to analyse Sri Lankan Megacity logistics behaviour: Megapolis logistics of Sri Lanka. *In Proceedings of: IEEE International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering, SCSE*, 2019. 10.23919/SCSE.2019.8842677

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. National transportation safety board (NTBS). Highway Special Investigation: Truck parking areas (report NTSB/SIR-00/01). Washington, DC, 2000.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Environmental Protection Agency (EPA). Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES). 2014. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100K4EB.pdf>. Acesso em: 20 set 2025.

FLEMING M., HUYNH N., XIE Y. Agent-based simulation tool for evaluating pooled queue performance at marine container terminals. **Transportation Research Record**, v.2330, p.103-112, 2013. 10.3141/2330-14.

GAO, Y., CHANG, D., FANG, T., LUO, T. Design and optimization of parking lot in an underground container logistics system. **Computers & Industrial Engineering**, 130, p. 327-337. 10.1016/j.cie.2019.02.043.

GARRO, A., MONACO, M.F., RUSSO, W., SORRENTINO, G., SAMMARRA, M. Agent-based simulation for the evaluation of a new dispatching model for the straddle carrier pooling problem. **Simulation Journal**, v.91, p.181-202, 2015. 10.1177/0037549714566699

GONZÁLEZ-RAMÍREZ, R.G., MAR-ORTIZ, J., GRACIA M.D., GUZMÁN. M.A.S. A simulation-based approach for coordinating inland flows on a container terminal. *In Proceedings of: 22nd International Conference on Production Research*, 2013.

GRACIA, M. D., GONZÁLEZ-RAMÍREZ, R.G., MAR-ORTIZ, J. The impact of lanes segmentation and booking levels on a container terminal gate congestion. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v.29, 2017.

GRIGORYEV, I. **AnyLogic em três dias**: Um curso rápido de modelagem de simulação, 2015. Acesso exclusivo de inscritos no Curso de AnyLogic em 3 dias.

GU, J., GOETSCHALCKX, M., MCGINNIS, L.F. Research on warehouse operation: A comprehensive review. **European Journal of Operational Research**, v. 177, p. 1–21, 2007. doi:10.1016/j.ejor.2006.02.025

HERZ, N., FLÄMIG, H. Understanding supply chain management concepts in the context of port logistics: an explanatory framework. *Transport, Lituânia* v.29, n.4, p.376-385, dez. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Brasília: IBGE, 2025. Produto interno bruto. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 20 set2025.

ISTOÉ. Expansão I do Porto Itapoá. Disponível em: <https://revistaoe.com.br/expansao-i-do-porto-itapoa/>. Acesso em: 31 mai.2024.

JANOTTI, P.R.; RODRIGUES, I.C.; RODRIGUES, A.M.; REBELATO, M.G. A logística do açúcar e do etanol entre usinas paulistas e o porto de santos: um estudo comparativo entre agentes comerciais. **Revista de Administração da UNIMEP**, v.10, n.2, p.101-126, mai. 2012.

JARŽEMSKIS, A., VASILIAUSKAS, A.V. Research on dry port concept as intermodal node. **Transport**, v. 22, p. 207–213, 2007. 10.1080/16484142.2007.9638126

KARAKAYA, E.; VINEL, A.; SMITH, A. Relocations in container depots for different handling equipmenttypes: Markov models. **Computers & Industrial Engineering**, Auburn, v.157, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/computers-and-industrial-engineering/vol/157/suppl/C>. Acesso em: 30 mar. 2025.

KULKARNI, K., LAU, H.C., WANG, H., SIVABALASINGAM, S., TRAN, K.T. Design and implementation of decision support for traffic management at multipurpose port gates. *In Proceedings of: Winter Simulation Conference*, 2018.

MAFFI, Bruno. Porto em Santa Catarina mira liderança na América Latina com expansão bilionária. **Gazeta do Povo**, Santa Catarina, 9 set. 2025. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/santa-catarina/porto-itapoa-expansao-bilionaria/> Acesso em: 30 jan. 2026.

NADI, A., NUGTEREN, A., SNELDER, M., LINT, J.W.C.V., REZAEI, J. Advisory-Based Time Slot Management System to Mitigate Waiting Time at Container Terminal Gates. **Transportation Research Record**, v. 2676, 2022.

NOTTEBOOM, T., PALLIS, A., RODRIGUE, J.P. **Port Economics, Management and Policy**, New York: Routledge, 2022. ISBN 9780367331559. Disponível em: <https://porteconomicsmanagement.org/>. Acesso em: 11 ago. 2024.

MAHROOF, K. A human-centric perspective exploring the readiness towards smart warehousing: The case of a large retail distribution warehouse. **International Journal of Information Management**, v. 45, p. 176-1920, 2019. doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.11.008

MITTAL, N., BOILÉ, M., BAVEJA, A. Incorporating Maritime Stakeholder Perspectives for Implementing an ‘Inland- Depots-for-Empty-Containers’ System Using an Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Information Systems and Supply Chain Management**, v. 6, n. 1, p. 1-23, 2013. <https://doi.org/10.4018/jisscm.2013010101>

MUNIM, Z. H, SCHRAMM, H. J. The impacts of Port infrastructure and logistics performance on economic growth: the mediating role of seaborne trade. **Journal Shipping and Trade**, v. 3, n. 1, 2018. <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0027-0>.

PACHECO, A. APM Terminals, Pertencente À Maersk, Não Renovará Seu Contrato Para Operar No Porto De Itajai. A Empresa Prevê Investir R\$ 5,2 Bilhões Em Terminais No Brasil Até 2026. RN + Esportes, 31 mai. 2023, Porto. Disponível em: <https://rnmaisesportes.com.br/apm-terminals-pertencente-a-maersk-nao-renovara-seu-contrato-para-operar-no-porto-de-itajai-a-empresa-preve-investir-r-52-bilhoes-em-terminais-no-brasil-ate-2026/>. Acesso em: 22 jun. 2024.

PALACIO A., ADENSO-DÍAZ, B. LOZANO S., FURIÓ, S. Bicriteria Optimization Model for Locating Maritime Container Depots: Application to the Port of Valencia. **Network & Spatial Economics**, v. 16, p. 331-348. 10.1007/s11067-013-9205-7

PAROLA F., SCIOMACHEN A. Modal split evaluation of a maritime container terminal. **Maritime Economics and Logistics**. v. 11, n.1, p, 77-97, 2009. 10.1057/mel.2008.22

PORTO DE SANTOS. **Porto de Santos conta com mais um pátio regulador para caminhões**. Santos, 2021. Disponível em:

<https://www.portodesantos.com.br/2021/01/11/porto-de-santos-conta-com-mais-um-patio-regulador-para-caminhoes/>. Acesso em 22 set. 2024.

PORTO ITAPOÁ. **Obras de expansão do Porto Itapoá seguem cronograma planejado.** Disponível em: <https://www.portoitapoa.com/obras-de-expansao-do-porto-itapoa-seguem-cronograma-planejado/>. Acesso em: 31 mai.2024.

PORTO ITAPOÁ. **Porto Itapoá: O terminal.** Disponível em: <https://www.portoitapoa.com/porto-itapoa/>. Acesso em: 06 fev.2025.

PORTOS DO PARANÁ. **Pátio de triagem.** Disponível em: <https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Patio-de-Triagem>. Acesso em: 22 set. 2024.

PORT OF ROTTERDAM. **Truck parks.** Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/logistics/connections/intermodal-transportation/road-transport/truck-parks#:~:text=There%20are%20five%20Truck%20Parks,parking%20spaces%20for%20truck%20drivers>. Acesso em: 22 set. 2024

PREFEITURA MUNICIPAL DE GARUVA. **Lei Complementar Nº 122, De 16 De Dezembro De 2020.** Garuva: Prefeitura de Garuva, 2020. Disponível em: <http://leismunicipa.is/qyuae>. Acesso em: 08 set. 2025

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPOÁ. **Lei Municipal nº676/2016.** Itapoá: Prefeitura de Itapoá, 2016a. Disponível em: <https://itapoa.atende.net/cidadao/pagina/legislacao-plano-diretor>. Acesso em: 26 jun. 2024.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPOÁ. **Anexo 2 da Lei Municipal nº 676/2016.** Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo. Itapoá: Prefeitura de Itapoá, 2016b. Disponível em: <https://itapoa.atende.net/cidadao/pagina/legislacao-plano-diretor>. Acesso em: 29 jun. 2024

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPOÁ. **Anexo 7 da Lei Municipal nº 680/2016.** Lei da mobilidade urbana. Itapoá: Prefeitura de Itapoá, 2016c. Disponível em: <https://itapoa.atende.net/cidadao/pagina/legislacao-plano-diretor>. Acesso em: 31 jul. 2024

PRESTON, G.C., HORNE, P., SCAPARRA, M.P., O'HANLEY, J.R. Master planning at the Port of Dover: The use of discrete-event simulation in managing road traffic. **Sustainability**, Suíça. v.12, 2012. doi:10.3390/su12031067.

RAJAMANICKAM, G.D., RAMADURAI, G. Simulation of truck congestion in Chennai port. *In Proceedings of: Winter Simulation Conference*, 2015.

RAJU, N., ARKATKAR, S., EASA, S., JOSHI, G. Experimental Design for Measuring Operational Performance of Truck Parking Terminal Using Simulation Technique. **ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering**, v. 8, 2022. 10.1061/AJRUA6.0001275

RAMÍREZ-NAFARRATE A., GONZÁLEZ-RAMÍREZ R.G., SMITH N.R., GUERRA-OLIVARES R., VOß S. Impact on yard efficiency of a truck appointment system for a port

terminal. **Annals of Operations Research**. v. 258, n.2, p. 195-216, 2017. 10.1007/s10479-016-2384-0

RODRIGUE, J.P., DEBRIE, J., FREMONT, A., GOVERNAL, E. Functions and actors of inland ports: European and North American dynamics. **Journal of Transport Geography**, v. 18, p. 519–529, 2010. 10.1016/j.jtrangeo.2010.03.008

RODRIGUE, J.P., NOTTEBOOM, T. The terminalization of supply chains: reassessing the role of terminals in port/hinterland logistical relationships. **Maritime Policy & Management**, v. 36, p. 165-183, 2009. 10.1080/03088830902861086

ROSO, V., WOXENIUS, J., LUMSDEN, K. The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. **Journal of Transport Geography**, v.17, p. 338–345, 2009.

RUSCA A., DINU O., RUSCA F., ROSCA E., ROSCA M., ILIE A. Evaluating the impact of using smart equipment for preselecting cargo vehicles in the maritime port access area. **Advances in Maritime Technology and Engineering**. v.1, p. 81-86, 2024. 10.1201/9781003508762-11

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade. Mapoteca. Florianópolis: Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade, 2011. Disponível em: <https://www.sie.sc.gov.br/mapoteca>. Acesso em: 20 jun. 2024.

SILVA, G.L. Logística portuária: gestão dos portos brasileiros e a importância da marinha do Brasil. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v.9, 2021.

SILVA, V.M.D., COELHO, A.S., NOVAES, A.G., LIMA JR O.F. Remarks on Collaborative Maritime Transportation's Problem Using System Dynamics and Agent Based Modeling and Simulation Approaches. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**. Nova Iorque: Springer, 2011. 10.1007/978-3-642-23330-2\_27

SILVA, V.M.D.; NOVAES, A.G. Analysis and simulation of collaboration policies among manufacturing industries and its effects on the maritime transportation cost. **Marine Systems and Ocean Technology**, 2017. 10.1007/s40868-017-0024-4

SILVA, V.M.D., MICHALAK, L.E., VANCESLAU, G.A., COSTA, G. A. A. Mapeamento da infraestrutura retroportuária do norte catarinense. *In Proceedings of: Cidesport*, 2022a.

SILVA, V.M.D., BENEDECTI, R.C., COSTA, G.A.A. Avaliação operacional e econômica de um serviço hidroviário na cadeia logística do Porto Itapoá. *In Proceedings of: IX Congresso Internacional de Desempenho Portuário (Cidesport)*, Florianópolis, 2022b.

SOUSA JR, J. N. C.; NOBRE JR, E. F.; PRATA, B. de A.; MELLO, J. C. C. B. S. Avaliação da eficiência dos portos utilizando análise envoltória de dados: estudo de caso dos portos da região nordeste do Brasil. **Journal of transport literature**, Coroad, v. 7, n. 4, out. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jtl/a/xb3FYGbYc34r3JQgmnGhWMx/?lang=pt#>. Acesso em: 10 ago. 2024.

TANGKHAM, K., ONGKUNARUK, P. Business process analysis for a container depot service provider in Thailand. *In Proceedings of: International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI)*, 2019.

TAVARES, A.C.O.K. **O porto de Natal: sua importância para o comércio exterior do RN.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

UNIÃO EUROPÉIA. Mobility and Transport. Parking Areas. Disponível em: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/road/parking-areas\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/road/parking-areas_en). Acesso em: 22 set. 2024.

WANG, J., HUYNH, N.N., PENA, E. Land side truck traffic modeling at container terminals by a stationary two-class queuing strategy with switching. **Journal of International Logistics and Trade**, v. 20, n.3, 2022. 10.1108/JILT-05-2022-0003.

WILLRODT1, S., KRÜGER S., JAHN, C. Application of pre-gate parking by a use case study in RoPax port of Turku. **Lecture Notes in Logistics**. Springer Science and Business Media B.V., 2024. 10.1007/978-3-031-61589-4\_18

XU, B., LI, J., LIU, X., YANG, Y. System Dynamics Analysis for the Governance Measures against Container Port Congestion. **IEEE Access**, v.9, pp. 13612-13623, 2021. 10.1109/ACCESS.2021.3049967.

XU, B., LIU, X., LI, J., WU J., SHEN, Y., ZHOU, Y. Dynamic Appointment Rescheduling of Trucks under Uncertainty of Arrival Time. **Marine Science and Engineering**, v.10, 2022. doi.org/10.3390/jmse10050695.

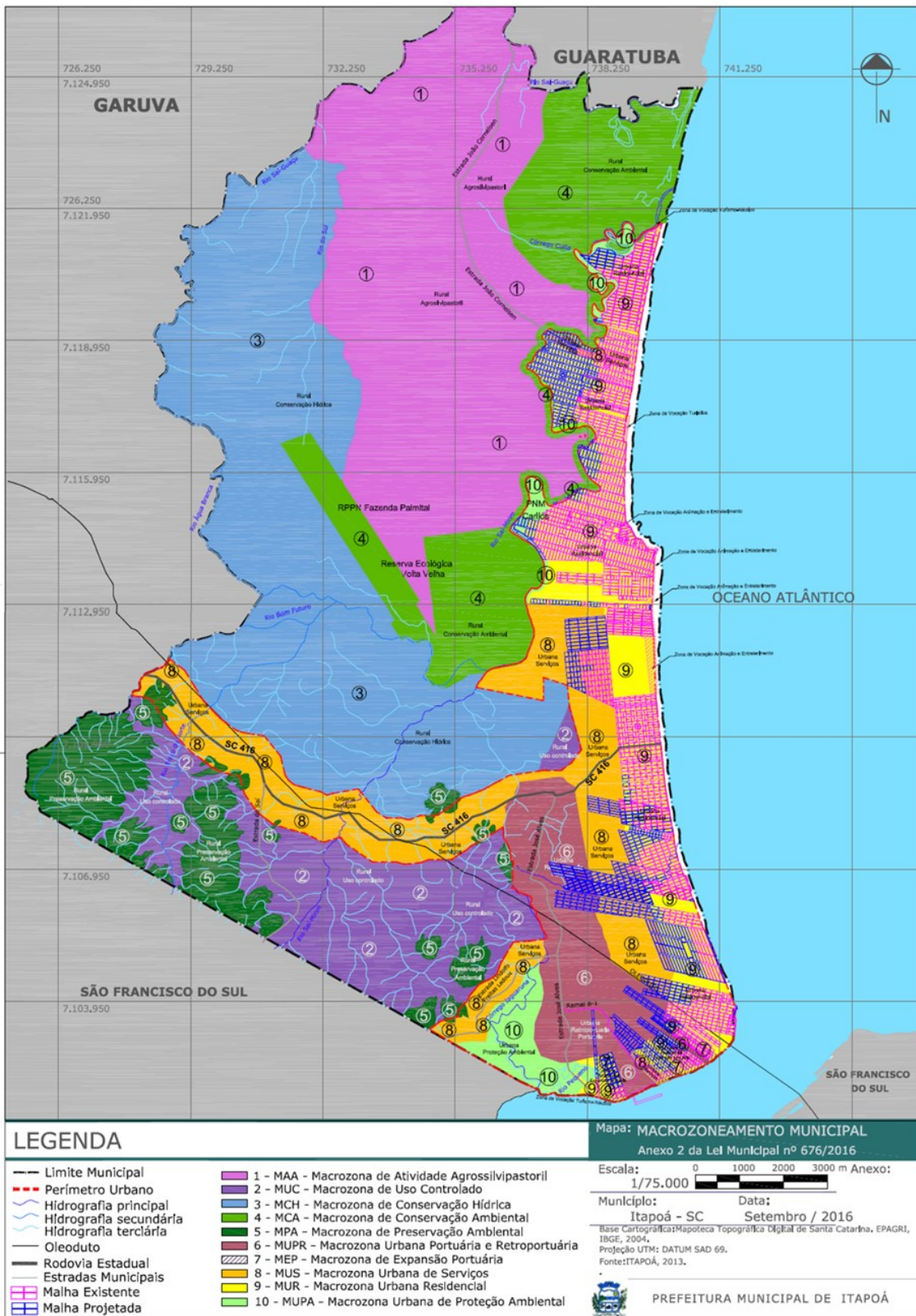
XU, B., LIU, W., LI, J., YANG, Y., WEN, F., SONG, H. Resilience measurement and dynamic optimization of container logistics supply chain under adverse events. **Computers and Industrial Engineering**, 2023. 10.1016/j.cie.2023.109202

XU, X., WANG, W., PENG, Y., ZHENG, T., LI, X. A simulation modeling approach for deciding the scale of buffer areas and gate lanes in container ports. *In Proceedings of: International Conference on Transportation and Development*, 2019.

YILDIRIM, M.S., AYDIN, M.M., GÖKKUŞ, Ü. Multimethod simulation approach for capacity design of a truck parking area in city ports. **Acta Scientiarum – Technology**, v. 44, 2022. 10.4025/actascitechnol.v44i1.58110.

ZHOU, Y., GE, Y. Managing Reversible Lanes with Truck Arrival Information to Alleviate Gate Congestion at Smart Container Terminals. *International Conference on Transportation and Development*, 2018.

## ANEXO A – Macrozoneamento de Itapoá (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPOÁ, 2016b)



## ANEXO B – Sistema viário urbano de Itapoá (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAPOÁ, 2016c)

