

Universidades Lusíada

Ribeiro, Danilo Serafim Oliveira

**Modelação e simulação de um sistema de
transporte marítimo : aplicação de um estudo de
caso**

<http://hdl.handle.net/11067/7947>

Metadados

Data de Publicação

2024

Resumo

O sistema de transporte marítimo de contentores é responsável pela maioria das transações comerciais internacionais nos dias de hoje e enfrenta diversos desafios, desde questões operacionais até preocupações ambientais. Com a sua crescente expansão, a competitividade é cada vez maior pela satisfação dos requisitos da procura e, também, exigências de mudanças operacionais dos portos e estruturais dos navios. As complexidades inerentes neste domínio, requerem uma compreensão mais aprofundada dos p...

The container maritime transport system is responsible for the majority of international commercial transactions today, facing numerous challenges from operational issues to environmental concerns. With its growing expansion, competitiveness is increasingly driven by meeting demand requirements and the operational changes in ports and structural changes in ships. The inherent complexities in this domain require a deeper understanding of the processes and the identification of innovative strategi...

Palavras Chave

Logística, Simulação, Estatística

Tipo

masterThesis

Revisão de Pares

no

Coleções

[ULF-FET] Dissertações

Esta página foi gerada automaticamente em 2025-04-17T02:24:16Z com
informação proveniente do Repositório



UNIVERSIDADE LUSÍADA
VILA NOVA DE FAMALICÃO

**MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE
TRANSPORTE MARÍTIMO: APLICAÇÃO DE UM ESTUDO DE
CASO**

Danilo Serafim Oliveira Ribeiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão
Industrial

Vila Nova de Famalicão – julho 2024



UNIVERSIDADE LUSÍADA
VILA NOVA DE FAMALICÃO

**MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE
TRANSPORTE MARÍTIMO: APLICAÇÃO DE UM ESTUDO DE
CASO**

Danilo Serafim Oliveira Ribeiro

Orientador: Professora Doutora Bruna Ramos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão
Industrial

Agradecimentos

Surpreendentemente, esta talvez tenha sido a parte mais difícil de redigir de todo este documento. Ao longo do meu percurso escolar e crescimento profissional, foram inúmeras as pessoas que me acompanharam, ensinaram, criticaram e, principalmente, apoiaram. Seria injusto listar todas essas pessoas, pois correria o risco de esquecer alguém. Se estás a ler isto, participas na minha vida de alguma forma, sabes que esta mensagem é para ti, e do fundo do meu coração agradeço-te pelo teu contributo na minha felicidade diária e força para seguir em frente. No entanto, preciso destacar a pessoa mais importante da minha vida, a que mais admiro e, à qual, nem sempre dedico o tempo necessário que ela merece: Paula Laurinda Monteiro Oliveira, a minha mãe. Com a sua força e determinação únicas, agarrou a vida com todas as forças para garantir que os seus quatro filhos tivessem uma vida estável e feliz, apesar de todas as adversidades que enfrentou como mãe solteira. Obrigado, mãe! Por me ensinares o verdadeiro significado de resiliência. Mereces que o mundo inteiro saiba o quão especial tu és. Para sempre minha!

Nesta jornada de contínua aprendizagem e superação intelectual e emocional, vários docentes me marcaram profundamente. Quer pela sua disciplina de trabalho, quer pela inteligência nas suas áreas de ensino. Sem dúvida, sem a ajuda da minha orientadora de dissertação, a Professora Doutora Bruna Ramos, este documento nem teria sido publicado. Uma salva de palmas a si, que diariamente ajuda jovens adultos a atingirem o seu potencial com profissionalismo e empatia. Aproveito também para agradecer aos restantes docentes do mestrado pelo conhecimento transmitido, e à Professora Sara Sofia Baltazar Martins, docente do Politécnico do Porto, por me ter passado a paixão pela logística e gestão de operações, apoiado no início da minha caminhada académica no ensino superior, e depositado grandes expectativas no meu futuro. Obrigado a vós!

Por fim, agradeço a estabilidade e amor recebido pela minha família materna e também pelas boas amigas que trago deste mestrado: Catarina, Lúcia e Inês. Não vos digo muitas vezes isto, mas vocês são mesmo muito importantes para mim! Agradecer a vós, leitores e júri, por dedicarem um pouco do vosso tempo a ler e/ou avaliar a minha dissertação.

Acreditem em vocês e no vosso potencial!

Um bem hajam a todos.

Resumo

O sistema de transporte marítimo de contentores é responsável pela maioria das transações comerciais internacionais nos dias de hoje e enfrenta diversos desafios, desde questões operacionais até preocupações ambientais. Com a sua crescente expansão, a competitividade é cada vez maior pela satisfação dos requisitos da procura e, também, exigências de mudanças operacionais dos portos e estruturais dos navios. As complexidades inerentes neste domínio, requerem uma compreensão mais aprofundada dos processos e a identificação de estratégias inovadoras que possam melhorar a eficiência operacional e reduzir o impacto ambiental associado a este tipo de operações.

O presente estudo analisou e otimizou os processos logísticos no Porto de Leixões, com o objetivo de melhorar a eficiência do ciclo de contentores em território nacional. Foram desenvolvidos dois modelos de simulação utilizando a ferramenta *AnyLogic*: um modelo representando o sistema atual e as suas operações e um segundo propondo a integração de um centro de desconsolidação como alternativa ao uso de um parque externo subcontratado. A simulação destes modelos permitiu avaliar o desempenho do sistema sob diferentes cenários e condições. Atualmente, a capacidade é limitada pelas gruas do terminal, uma vez que mais de 1/3 da carga rececionada está em regime de fila de espera para entrar na zona de armazenagem do terminal revelando-se, assim, como o maior obstáculo à eficiência. Como proposta de melhoria, definiu-se uma melhor gestão de contentores pela redução de movimentação de contentores vazios de importação em 50% e obtenção de benefícios operacionais pelo acréscimo da carga exportada em 53,8% numa visão de longo prazo. A análise de sensibilidade revelou que ajustes nos parâmetros operacionais, como tempos de movimentação e desconsolidação, têm um impacto importante na eficiência do sistema. Futuramente, recomenda-se uma visão mais centrada no terminal para validar as melhorias de todos os processos operacionais e a realização de uma análise sobre a adoção de contentores dobráveis por parte das companhias de navegação. Este estudo contribui para a melhoria do conhecimento dos processos logísticos no Porto de Leixões, oferecendo a oportunidade de desenvolver um modelo mais eficiente na gestão de contentores.

Palavras-chave: *AnyLogic*; Contentor Marítimo; Estatística; Logística; Simulação.

Abstract

The container maritime transport system is responsible for the majority of international commercial transactions today, facing numerous challenges from operational issues to environmental concerns. With its growing expansion, competitiveness is increasingly driven by meeting demand requirements and the operational changes in ports and structural changes in ships. The inherent complexities in this domain require a deeper understanding of the processes and the identification of innovative strategies that can improve operational efficiency and reduce the environmental impact associated with such operations.

The present study analyzed and optimized the logistics processes at the Port of Leixões, with the aim of improving the efficiency of the container cycle within the national territory. Two simulation models were developed using the AnyLogic tool: one model representing the current system and its operations, and a second proposing the integration of a deconsolidation center as an alternative to using an outsourced external *Yard*. The simulation of these models allowed for the evaluation of the system's performance under different scenarios and conditions. Currently, capacity is limited by the terminal's cranes, as more than one-third of the received cargo is in a queue waiting to enter the terminal's storage area, thus proving to be the biggest obstacle to efficiency. As a proposed improvement, a better management of containers was defined by reducing the movement of empty import containers by 50% and achieving operational benefits through a 53,5% increase in exported cargo in the long term. Sensitivity analysis revealed that adjustments in operational parameters, such as handling and deconsolidation times, have a significant impact on system efficiency. In the future, a more terminal-centric approach is recommended to validate the improvements in all operational processes and conduct an analysis on the adoption of foldable containers by shipping companies. This study contributes to enhancing the understanding of logistical processes at the Port of Leixões, offering the opportunity to develop a more efficient container management model.

Keywords: AnyLogic, Logistics, Maritime Container, Simulation, Statistics.

Índice geral

Resumo	iv
Abstract.....	v
Índice de figuras	viii
Índice de tabelas	x
Lista de abreviaturas	xi
1. Introdução	12
1.1. Enquadramento e motivação.....	12
1.2. Objetivos propostos.....	13
1.3. Metodologia aplicada.....	13
1.4. Organização da dissertação	14
2. Fundamentação teórica	16
2.1. Introdução ao transporte marítimo.....	16
2.1.1. Definição de transporte marítimo e rede de transporte multimodal	16
2.1.2. Evolução e extensão do transporte marítimo.....	17
2.2. Tipos de navios e a estrutura da indústria	18
2.2.1. Tipologia de navios no transporte marítimo	18
2.2.2. Organização da indústria marítima: Relações entre armadores, portos e outros agentes	26
2.3. Infraestrutura portuária.....	28
2.3.1. Portos e terminais marítimos	28
2.3.2. Importância da eficiência portuária no transporte marítimo.....	30
2.4. Contentor - A caixa que mudou o mundo	31
2.4.1. Origem e história do contentor de transporte marítimo	31
2.4.2. Tipos de contentores e especificidades	31
2.4.3. Impacto do contentor na eficiência do transporte marítimo	35
2.4.4. Desenvolvimentos tecnológicos relacionados ao contentor	35
2.5. Desafios e oportunidades	36

2.5.1. Regulamentações ambientais no transporte marítimo	36
2.5.2. Segurança marítima e avanços tecnológicos no setor marítimo	37
2.5.3. Papel do transporte marítimo no comércio internacional	38
2.6. Centro de desconsolidação de carga marítima	38
2.6.1. Definição, importância e operações de centros de desconsolidação	38
2.7. <i>AnyLogic</i> – Ferramenta de simulação e análise	40
2.7.1. Definição da ferramenta e aplicações	40
2.7.2. Processo de simulação	41
2.7.3. Terminologia e simbologia em <i>AnyLogic</i>	41
2.7.4. Distribuições e probabilidades	44
3. Sistema de transporte marítimo no norte de Portugal.....	47
3.1. Sistema atual de operações	47
3.1.1. Processo operacional do sistema atual.....	47
3.1.2. Recolha e análise de dados do sistema atual	49
3.1.3. Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo atual	65
3.1.4. Parametrização da simulação da situação atual	67
3.2. Sistema proposto de operações	68
3.2.1. Proposta de melhoria no sistema atual e respetiva parametrização	68
3.2.2. Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo proposto	69
3.3. Modelação e simulação em <i>AnyLogic</i>	71
3.3.1. Modelo físico da situação atual	71
3.3.2. Simulação da situação atual.....	74
3.3.3. Modelo físico do sistema proposto	82
3.3.4. Simulação do sistema proposto.....	84
3.4. Comparação de resultados entre os dois modelos.....	86
4. Conclusões e trabalho futuro	90
Referências bibliográficas	93

Índice de figuras

Figura 1 - Principais finalidades dos navios	18
Figura 2 - Navio petroleiro (Retirado de Eiermann (2023)).....	19
Figura 3 - Navio graneleiro (Retirado de Masao (2018))	20
Figura 4 - Navio de carga geral com mercadoria em convés (Retirado de DHL (2023)) .	21
Figura 5 - Exemplo de um navio Ro-Ro (Retirado de Cargotec Corporation (2024))	21
Figura 6 - Navio porta-contentores da Cosco Shipping (Retirado de Cosco Shipping Lines (2024))	22
Figura 7 - Navio cruzeiro MSC World Europa (Retirado de MSC Cruises (2024))	23
Figura 8 - Terminologias do navio (Adaptado de Britannica (2012))	24
Figura 9 - Layout do terminal sul de Leixões (Retirado de Yilport Leixões (2024)).....	29
Figura 10 - Stacker do Terminal de Contentores Sul do porto de Leixões (Retirado de (Yilport Leixões, 2024)	30
Figura 11 - Marcações do contentor marítimo (Retirado de Evergreen Line (2024)).....	32
Figura 12 - Contentor de carga seca Evergreen (Retirado de Evergreen Line (2024))	33
Figura 13 - Reefer Evergreen (Retirado de Evergreen Line (2024)).....	33
Figura 14 - Contentor open top e flat rack (Retirado de Evergreen Line (2024))	34
Figura 15 - Selo de contentor marítimo (Adaptado de Evergreen Line (2024))	34
Figura 16 - Processo de dobragem de um contentor colapsável (Retirado de Shintani et al. (2010))	36
Figura 17 - Modelo conceptual atual das operações.....	47
Figura 18 - Frequência de chegadas por tipologia de contentor no ano de 2023	53
Figura 19 - Histograma das saídas de contentores de importação do Yard.....	58
Figura 20 - Boxplot de levantes da importação	58
Figura 21 - Normalidade de 5 861 levantes da importação	59
Figura 22 - Normalidade de 5 262 levantes da importação	59
Figura 23 - Estatística descritiva em SPSS dos levantes de contentores da importação ...	60
Figura 24 - Histograma dos tempos, em minutos, de entrega de contentores vazios da importação no terminal.....	62
Figura 25 - Modelo conceptual do sistema atual de transporte marítimo no norte de Portugal	66
Figura 26 - Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo proposto para o norte de Portugal.....	70

Figura 27 - Modelo Conceptual do Sistema Atual de Transporte Marítimo no Norte de Portugal em AnyLogic.....	72
Figura 28 - Modelo Físico do Sistema Atual de Transporte Marítimo no Norte de Portugal em AnyLogic	73
Figura 29 - Codificação em AnyLogic da distribuição normal truncada no tempo de posse da exportação.....	74
Figura 30 - Fluxo de contentores da simulação do sistema atual para t=30 dias.....	76
Figura 31 - Médias dos parâmetros simulados ao longo de 30 dias	77
Figura 32 - Modelo físico do sistema atual ao longo de 30 dias de simulação	78
Figura 33 - Modelo físico do sistema atual ao longo de 180 dias de simulação	79
Figura 34 - Modelo físico do sistema atual ao longo de 466 dias de simulação	81
Figura 35 - Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo proposto para o norte de Portugal em AnyLogic.....	82
Figura 36 - Modelo físico do sistema de transporte marítimo proposto para o norte de Portugal em AnyLogic.....	83
Figura 37 - Parâmetros de simulação do sistema proposto.....	84
Figura 38 - Nível de inventário que necessita ser desconsolidada num teste da simulação ao sistema proposto	85
Figura 39 - Relação entre a distância entre o Centro de desconsolidação e o Yard comparativamente às quantidades exportadas e transacionadas em armazenagem do terminal.....	87

Índice de tabelas

Tabela 1 - Nomenclatura do tipo de navios	25
Tabela 2 - Simbologia em AnyLogic (Adaptado de The AnyLogic Company (2024))....	42
Tabela 3 - Distribuições estatísticas aplicáveis em AnyLogic (Adaptado de (The AnyLogic Company, 2024)).....	44
Tabela 4 - Relação entre a frequência de visitas e tempo de operação dos navios por categoria de operações.....	50
Tabela 5 - Independent Samples t.Test entre as médias de dias de operações dos navios	52
Tabela 6 - Quantidade média de TEUS transacionados em média por categoria de operações realizados no navio	52
Tabela 7 - Intervalo de tempo médio das operações de carga e descarga	55
Tabela 8 - Intervalo médio de tempo do levante e entrega de contentores no Porto de Leixões.....	56
Tabela 9 - Tempo médio, em minutos, de movimentação de contentores em terminal	57
Tabela 10 - Estatística descritiva do tempo, em minutos, entre saídas de contentores da importação nas gates do terminal	61
Tabela 11 - Estatística descritiva em SPSS das modalidades de entrega de vazios da importação	61
Tabela 12 - Estatística descritiva dos tempos de posse, em minutos, da importação na entrega de contentores vazios em parque ou em terminal	62
Tabela 13 - Estatística descritiva dos tempos de posse, em minutos, da exportação na entrega de contentores cheios em terminal.....	65
Tabela 14 - Variáveis de simulação do sistema atual	67
Tabela 15 - Parâmetros da distribuição uniforme truncada em AnyLogic	71
Tabela 16 - Desempenho do sistema atual ao longo de 30 dias de simulação	74
Tabela 17 - Desempenho do sistema atual ao longo de 180 dias de simulação	78
Tabela 18 - Desempenho do sistema atual ao longo de 466 dias de simulação	80
Tabela 19 - Desempenho do sistema proposto com os valores padrão	85
Tabela 20 - Desempenho do sistema proposto para 30 dias com variação de um parâmetro para o seu máximo	86
Tabela 21 - Resumo das diferenças quantitativas entre os dois modelos	88

Lista de abreviaturas

CNM	Companhia de Navegação Marítima
COMEGI	Centro de Investigação em Organizações, Mercados e Gestão Industrial
ConRo	Carga contentorizada e Rolante
CSC	<i>Convention for Safe Containers</i>
CTPAT	Customs-Trade Partnership Against Terrorism
FEU	Fourthy-foot Equivalent Unit
ISO	Organização Internacional de Normalização
RFID	Radiofrequência
Ro-Lo	Carga rolante e Carga geral
Ro-Ro	<i>Roll on – Roll off</i>
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>

1. Introdução

Esta dissertação insere-se no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial da Universidade Lusíada, Campus de Vila Nova de Famalicão.

Neste capítulo são apresentados os motivos que justificam a escolha do tema e o seu enquadramento. A Introdução inclui ainda a formulação dos objetivos propostos e a descrição detalhada da metodologia aplicada.

1.1. Enquadramento e motivação

O projeto de dissertação enquadra-se na área de investigação de “Operações, Logística & Lean Management: Desenvolvimento e aplicação de ferramentas para Indústria 5.0” uma das áreas de Gestão Tecnológica do centro de investigação COMEGI – Centro de Investigação em Organizações, Mercados e Gestão Industrial.

A ênfase na integração de novas tecnologias para otimização de processos é especialmente pertinente para a área da Logística e, este projeto, propõe-se a contribuir para o desenvolvimento e aplicação de ferramentas no contexto específico do transporte marítimo de contentores, alinhada a uma visão de alcançar uma gestão de recursos mais eficiente. Neste trabalho não se visa apenas compreender os processos existentes, mas também explorar inovações que possam ser aplicadas para a eficiência operacional, sustentabilidade e adaptação aos desafios emergentes na Indústria 5.0.

A elaboração de um modelo conceptual completo e atualizado deste sistema no seu todo poderá ser usado, futuramente, em estudos de outros investigadores por forma a detetar e validar propostas de inovação, o que contribuirá para o desenvolvimento de novas ferramentas necessárias nas operações logísticas futuras.

Desta forma, o projeto encontra-se alinhado com os objetivos da área de Gestão Tecnológica que visa a integração de novas tecnologias na otimização de processos onde se ambiciona uma gestão de recursos melhorada. Com a expansão da indústria marítima e aumento da procura, há um aumento significativo na competitividade entre os operadores portuários e as empresas de navegação, que procuram continuamente formas de melhorar a sua eficiência operacional. Além disso, há necessidade de implementar mudanças nos processos dos portos e adaptações estruturais nos navios para se manterem atualizados com os requisitos modernos.

Este estudo pretende contribuir para a evolução logística do sistema marítimo, fornecendo ferramentas e modelos que facilitam a integração de novas tecnologias e processos, para promover a gestão eficaz e sustentável de recursos.

1.2. Objetivos propostos

O principal objetivo desta dissertação é desenvolver e implementar um modelo conceptual que optimize o transporte marítimo de contentores, alinhado com as práticas da Indústria 5.0, visando a melhoria da eficiência operacional e da sustentabilidade nas operações logísticas marítimas.

Para atingir este objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos que estruturam o trabalho realizado:

- Realizar uma revisão abrangente da literatura existente sobre o conhecimento atual na área de transporte marítimo e simulação;
- Aplicar técnicas de modelação e simulação na análise dos processos;
- Desenvolver e validar um modelo conceptual do transporte marítimo de contentores com uma melhoria ao sistema atual;
- Proposta de diretrizes na implementação das melhorias e nas futuras pesquisas.

1.3. Metodologia aplicada

Para uma compreensão aprofundada do sistema de transporte marítimo de contentores, este estudo adota uma abordagem dedutiva, que começa com princípios teóricos e aplica-os no contexto específico do transporte marítimo. Esta abordagem oferece um caminho estruturado na análise do sistema, permitindo deduzir conclusões a partir de premissas teóricas estabelecidas. Ao adotar uma perspetiva exploratória, a investigação não só responde a perguntas específicas sobre o sistema, mas também procura descobrir novas nuances no ramo do transporte marítimo, enriquecendo o conhecimento existente (Saunders et al., 2018).

A metodologia adotada combina duas abordagens complementares: simulação e *action research*. A simulação proporciona um ambiente controlado para modelar e analisar os processos envolvidos no transporte marítimo de contentores. Esta técnica permite a visualização de diferentes cenários e a avaliação do desempenho dos processos sob diversas condições, facilitando a identificação de pontos críticos e oportunidades de melhoria.

Ainda, pela utilização de ferramentas de simulação, é possível testar e validar o modelo conceptual proposto, ajustando-o com base nos resultados obtidos (Saunders et al., 2018).

Paralelamente, a *action research* integra a participação ativa dos intervenientes do setor, proporcionando uma abordagem prática e colaborativa. Esta abordagem envolve a interação direta com profissionais e *stakeholders* do setor marítimo para identificar e implementar melhorias tangíveis nos processos. A *action research* permite a aplicação prática das conclusões teóricas e a adaptação das soluções propostas às necessidades reais do setor, garantindo que as melhorias sejam relevantes e eficazes na prática.

A combinação dessas metodologias visa não só compreender o sistema de transporte marítimo de contentores de forma teórica e prática, mas também garantir um impacto claro, prático e significativo. Assim, o estudo pretende otimizar as operações do transporte marítimo e promover práticas sustentáveis, contribuindo para a melhoria contínua dos processos e agentes em campo, a partir da análise da situação atual e previsão futura das melhorias implementadas, utilizando a ferramenta de simulação *AnyLogic*.

Para superar algumas das limitações da *Education Version* do *AnyLogic*, como a falta de acesso a testes de análise descritiva mais específicos, a utilização de ferramentas complementares como o *Microsoft Excel* e o SPSS é fundamental. O *Microsoft Excel* permite o tratamento e a organização inicial dos dados, ajudando nas operações de visualização iniciais e na preparação dos dados para análises mais complexas. Em complemento, o SPSS oferece técnicas estatísticas avançadas que permitem uma exploração mais profunda e a parametrização exata dos dados nas simulações. A integração dessas ferramentas com o *AnyLogic* enriquece o processo analítico, proporcionando uma abordagem mais precisa (Grigoryev, 2015).

1.4. Organização da dissertação

A estrutura da dissertação está organizada e dividida em várias secções principais, cada uma com um propósito específico para garantir uma análise detalhada e integrada do tema.

A **Introdução (Capítulo 1)** inicia o trabalho apresentando o enquadramento do tema, destacando a relevância e a motivação subjacentes à investigação. Esta seção define claramente os objetivos específicos que orientaram o trabalho subsequente. A metodologia aplicada é detalhada a seguir, abordando a abordagem, natureza e as metodologias específicas implementadas no estudo.

Na **Fundamentação Teórica (Capítulo 2)** foi feita uma revisão abrangente da literatura existente sobre o transporte marítimo de contentores, incluindo a definição e evolução do transporte marítimo, tipos de navios, infraestrutura portuária, e a importância do contentor. A revisão também define desafios e oportunidades no setor, como regulamentações ambientais e avanços tecnológicos, além de incluir uma discussão sobre o centro de desconsolidação de carga marítima e a ferramenta *AnyLogic* para simulação e análise.

O **Sistema de Transporte Marítimo no Norte de Portugal (Capítulo 3)** analisa detalhadamente os processos operacionais de uma companhia de navegação marítima a partir da recolha e análise de dados no sistema atual de operações. Esta seção inclui a construção do modelo conceptual das operações na atualidade e a sua parametrização. Seguidamente, apresenta-se o sistema anterior incorporando, propostas de melhoria e a respetiva construção do modelo conceptual. A modelação e simulação em *AnyLogic* são discutidas, comparando os modelos físico e simulado da situação atual e do sistema proposto.

Por fim, as **Conclusões e Trabalho Futuro (Capítulo 4)** sintetizam os principais resultados obtidos na investigação e apresentam uma projeção para pesquisas futuras. As Referências Bibliográficas encerram o trabalho, documentando a base teórica que sustentou a investigação.

2. Fundamentação teórica

Neste capítulo são aprofundados os principais termos e conceitos essenciais para compreender o estudo e a investigação realizados. A fundamentação teórica abrange uma análise detalhada do transporte marítimo, incluindo a sua definição, evolução, e estrutura industrial, bem como uma visão sobre a infraestrutura portuária e os diversos tipos de contentores utilizados no transporte marítimo. Além disso, são descritos alguns dos atuais desafios e oportunidades no setor, destacando-se alguns aspetos regulatórios, de segurança e tecnológicos. A importância dos centros de desconsolidação de carga é explorada, abordando-se a sua relevância e papel no funcionamento e eficiência das principais operações de logística marítima.

2.1. Introdução ao transporte marítimo

O setor marítimo é fundamental na logística do comércio internacional, responsável por cerca de 80% das transações físicas que ocorrem entre os mercados da atualidade (Doukas et al., 2021). O transporte marítimo assume um papel crucial no desenvolvimento económico, facilitando a troca de bens e influenciando as relações comerciais internacionais (Chávez et al., 2024).

Neste sentido, considerando a magnitude do objeto de estudo e as suas implicações tanto em termos macroeconómicos quanto ambientais, bem como as crescentes pressões para aprimorar a competitividade operacional, torna-se evidente que qualquer melhoria neste sistema pode levar não apenas a aumentos de eficiência e redução de custos, mas também a diminuir a pegada de carbono da geração atual e futura (Doukas et al., 2021).

2.1.1. Definição de transporte marítimo e rede de transporte multimodal

O transporte marítimo é definido como o movimento de mercadorias e pessoas por meio dos oceanos, mares e rios. Destaca-se pela sua eficiência na movimentação de grandes volumes de mercadorias em escala global, sendo o pilar da cadeia de abastecimento internacional (Wasesa et al., 2021).

Uma rede de transporte multimodal integra, eficazmente, os diferentes modos de transporte, unindo os operadores de transporte individual e a infraestrutura dentro do contexto da cadeia logística de transporte, também conhecida como intermodal (Antonov, 2020a). A rede de transporte marítima é multimodal, envolvendo várias conexões e

atributos entre os diversos agentes, bem como a sua dependência em relação ao nó de *transshipment*, o que torna a modelação desses problemas mais complexa. A interconexão entre os diferentes modos de transporte requer não só uma coordenação logística eficiente, mas também sistemas de comunicação que promovam a movimentação dos contentores de forma estável, portanto, surge a necessidade de se testar a funcionalidade, validade, sensibilidade e convergência de qualquer solução de melhoria no sistema por meio de vários estudos matemáticos (Nunes et al., 2017). Um contentor pode passar por distintos modos de transporte e países numa só viagem, exigindo a eficiência e comunicação entre as diversas operações desde a origem até ao destino final (Setiawan et al., 2018).

2.1.2. Evolução e extensão do transporte marítimo

Globalmente, a extensão transversal do transporte marítimo é evidenciada pela cobertura de rotas que, nos dias de hoje, interligam continentes e conectam portos em diversas partes do mundo, através da vasta rede de rotas marítimas: oceanos, mares e rios. Ao longo dos séculos, o transporte marítimo evoluiu desde simples embarcações até navios com capacidade de levar centenas de contentores, impulsionado pela necessidade de explorar novas rotas comerciais, estabelecer vínculos entre diferentes regiões do mundo e, também, construir uma rede de rotas marítimas e terrestres alinhadas (Guo et al., 2024). Essa evolução incluiu avanços como a introdução de navios a vapor e mais tarde a diesel, que ampliaram significativamente o alcance e a capacidade de carga das embarcações. A história do transporte marítimo também é marcada por desafios como a pirataria, os bloqueios navais em tempos de guerra e as rigorosas regulamentações ambientais modernas (Levinson, 2008).

Os portos marítimos tornaram-se centros logísticos do comércio internacional, responsáveis na entrada e saída de mercadorias pelas diferentes rotas marítimas (M. Zhang et al., 2015). Para alcançar a eficiência das operações comerciais e garantir o crescimento da economia mundial, será necessário garantir que todo o sistema multimodal seja rentavelmente sustentável. Apesar da sua atual vantagem competitiva face a outras modalidades de transporte, o marítimo enfrentou vários desafios ao longo da história, desde ameaças de pirataria até à necessidade de se adaptar à procura crescente da sociedade moderna. Assim, na sua contínua evolução foi essencial a incorporação de avanços significativos que transformaram as operações desta indústria. Inicialmente, os navios eram movidos por força humana ou vento, limitando a sua capacidade e alcance. No entanto,

após a Primeira Guerra Mundial, inovações como o motor a vapor revolucionaram a propulsão naval, possibilitando viagens mais rápidas e eficientes (Levinson, 2008).

A notável capacidade de adaptação do transporte marítimo às necessidades da sociedade envolvente, incorporando avanços tecnológicos para melhorar a eficiência, segurança e sustentabilidade das operações, permitiu que nos dias de hoje o comércio internacional no transporte de matérias-primas, produtos manufaturados e bens de consumo seja efetuado de forma mais eficiente. A longo prazo, a evolução do transporte marítimo deve alinhar-se com melhorias contínuas em eficiência, segurança e sustentabilidade.

2.2. Tipos de navios e a estrutura da indústria

O transporte marítimo compreende uma variedade de tipos de navios, cada um projetado para atender as finalidades e necessidades específicas no cenário global de movimentação de mercadorias (Mio et al., 2022). A estrutura da indústria marítima é complexa, uma vez que envolve diferentes grupos de interesse, como armadores, portos e transitários rodoviários, que desempenham papéis específicos para garantir a eficiência e a segurança das operações (Levinson, 2008).

2.2.1. Tipologias de navios no transporte marítimo

Os tipos de navios no transporte marítimo são projetados especificamente para acomodar determinados tipos de cargas e operar sob diversas condições (C. Zhang et al., 2023). De forma genérica, na Figura 1, podem elencar-se os seguintes motivos pelos quais se utilizam os navios:



Figura 1 - Principais finalidades dos navios

A exigência associada à movimentação de carga no mar, implicou uma adaptação e segmentação dos navios usados no transporte marítimo de acordo com o tipo de carga (J. Lee & Kim, 2015). Alguns dos principais tipos de navios no transporte marítimo são os navios-tanque, graneleiros, de carga geral, de carga rolante, porta-contentores e de passageiros.

Os **Navios-Tanque**, são especializados no transporte de grandes volumes de líquidos a granel, como o petróleo e os seus derivados. Geralmente, possuem tanques na sua estrutura para uma armazenagem segura desses líquidos durante toda a viagem (Wang et al., 2023). As operações de carga e descarga destes navios são realizadas por meio de mangueiras equipadas com bombas, que podem estar embutidas na estrutura do navio ou nos terminais terrestres. A Figura 2 apresenta um navio desta tipologia, o qual desempenha um papel fundamental no abastecimento global de energia, garantindo o transporte seguro e eficiente de recursos naturais essenciais em diversas indústrias e economias por todo o mundo (Siddiqui & Verma, 2015).



Figura 2 - Navio petroleiro (Retirado de Eiermann (2023))

Os **Navios Graneleiros** ou **Bulk Carriers** são projetados para transportar grandes volumes de carga a granel, tais como grãos, minérios e produtos agrícolas. Ao contrário de outros tipos de navios, os graneleiros são concebidos com porões espaçosos que permitem a armazenagem eficiente destas cargas ao longo do transporte (Gratsos et al., 2012). A sua estrutura é adaptada para facilitar o carregamento e a descarga através de mecanismos como tapetes de transporte, sucção ou garras, garantindo operações eficientes nos portos de carga e descarga (Soares & Teixeira, 2000). Esta capacidade de transporte em massa e a eficiência operacional tornam os navios graneleiros peças fundamentais na cadeia logística global, especialmente no comércio de *commodities* a granel (Kretschmann et al., 2017).

A carga a granel diferencia-se da carga geral (ou break bulk) pelo facto de não ser embalada individualmente e ser transportada diretamente no seu estado natural, sem a necessidade de unitização. A Figura 3 mostra um *Bulk Carrier* em alto mar.



Figura 3 - Navio graneleiro (Retirado de Masao (2018))

Os **Navios de Carga Geral ou *Break-Bulk***, também conhecidos como navios convencionais, são projetados para transportar carga geral diversificada, que não é acondicionada em contentores ou tanques. Todo o tipo de carga (unitária ou embalada) é expedida em caixas, paletes, sacos, tambores, entre outros, no porão ou convés por intermédio de uma grua (Rowbotham, 2022). Ao contrário dos navios porta-contentores ou tanque, os navios *Break-Bulk* carregam mercadorias soltas ou embaladas individualmente, como maquinaria pesada, equipamentos industriais, madeira, aço, entre outros produtos.

A flexibilidade é uma das principais características destes navios, uma vez que podem acomodar uma ampla variedade de cargas de diferentes tamanhos e formas (Prentice & Hemmes, 2015). As operações de carga e descarga são realizadas manualmente ou com o auxílio de equipamentos especializados, como guindastes de bordo. Embora este tipo de transporte seja menos comum atualmente, os navios *Break-Bulk* desempenharam um papel fundamental no comércio internacional ao longo da história, permitindo o transporte seguro e eficiente de mercadorias para destinos em todo o mundo (Shi et al., 2023). A Figura 4 mostra um Break-Bulk em operações de carga de hélices de eólicas.



Figura 4 - Navio de carga geral com mercadoria em convés (Retirado de DHL (2023))

Os **Navios de Carga Rolante (Ro-Ro)**, tal como representado na Figura 5, são especializados no transporte de mercadorias que podem ser movimentadas sobre rodas (Melideo & Desideri, 2024). O termo 'Ro-Ro' advém de *Roll on/Roll off*, referindo-se à maneira como as cargas são carregadas e descarregadas: elas rolam para dentro e para fora do navio utilizando a própria mobilidade ou com a ajuda de equipamentos especializados, sendo ideal para cargas pesadas e de grandes dimensões (Ammar & Seddiek, 2017). Os navios *Ro-Ro* possuem rampas de acesso que facilitam o manuseamento e a deslocação da carga, diferenciando-se significativamente dos navios graneleiros, que transportam cargas a granel soltas no porão, e dos navios porta-contentores, que transportam carga dentro de contentores (Kaptan, 2022). Esta capacidade de transportar carga autopropelida e itens volumosos, torna os navios *Ro-Ro* competitivos em indústrias que dependem do transporte rápido e flexível de bens passíveis de serem rodados e/ou equipamentos muito pesados (Görçün et al., 2023).

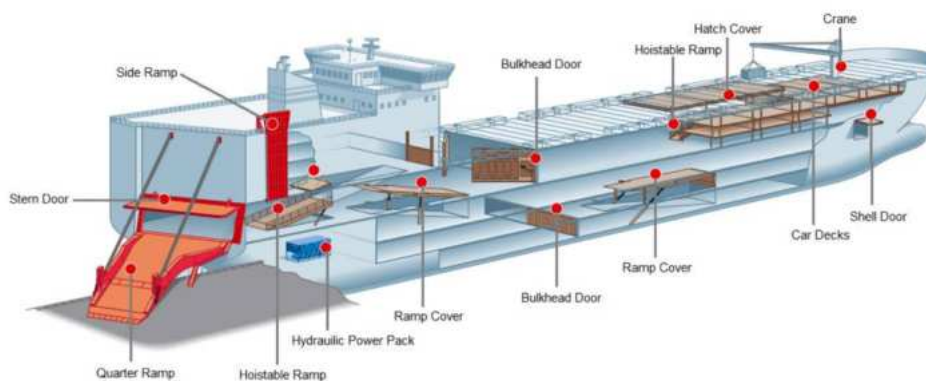


Figura 5 - Exemplo de um navio Ro-Ro (Retirado de Cargotec Corporation (2024))

Os **Navios Porta-Contentores**, como apresentado na Figura 6, constituem uma classe de navios mercantes projetados para o transporte eficiente de carga contentorizada. Estas embarcações são otimizadas para alojar contentores de dimensões padrão — ISO (Organização Internacional de Normalização) — tanto no porão quanto no convés, o que possibilita uma manipulação sistemática e a maximização do espaço disponível para carga (Levinson, 2008). A operacionalização na carga e descarga dos contentores é feita por gruas portuárias de alta capacidade (também conhecidas como *Quay Crane*), cuja engenharia garante um fluxo rápido e preciso dos contentores entre o navio e a interface portuária (van Twiller et al., 2023). O design dos navios e os procedimentos de manuseio de carga alinhados com os princípios da eficiência logística e da gestão de cadeia de abastecimento, conduzem para a redução dos tempos de ciclo de transbordo e para a integração com outros modos de transporte, assegurando a continuidade e a fluidez da cadeia de transporte intermodal. Esta classe de navios investe, cada vez mais, no desenvolvimento de sistemas de informação avançados que permitam o planeamento e a rastreabilidade da carga, componentes vitais para a eficácia na gestão industrial moderna (Mittendorf et al., 2023; Y. Yang et al., 2011).



Figura 6 - Navio porta-contentores da Cosco Shipping (Retirado de Cosco Shipping Lines (2024))

Os **Navios de Passageiros** são categorizados como embarcações civis porque são especificamente projetados para o transporte de indivíduos e, ao contrário das embarcações de carga, a sua conceção tem por base infraestruturas e instalações elaboradas para proporcionar segurança, conforto e serviços especializados aos passageiros durante o trânsito marítimo (Urbanyi-Popiołek, 2019). Utilizados em viagens marítimas com propósitos recreativos — cruzeiros — ou como meios de transporte em rotas marítimas

fixas. No contexto da engenharia naval, o design dos Navios de Passageiros incorpora sistemas avançados de segurança e navegação, áreas habitacionais ergonómicas e mecanismos de entretenimento (Solonen et al., 2023).

Do ponto de vista da gestão das operações, um Navio de Passageiros como o da Figura 7, requer a coordenação de serviços de hospitalidade e a manutenção eficiente das instalações a bordo para assegurar uma experiência otimizada para os passageiros e a sustentabilidade do serviço em termos económicos e ambientais (Roy & Chakraborty, 2024).



Figura 7 – Navio cruzeiro MSC World Europa (Retirado de MSC Cruises (2024))

Na indústria marítima, a diversidade de navios é complementada pela existência de navios híbridos que podem transportar diferentes tipos de carga, atendendo a requisitos operacionais específicos e oferecendo flexibilidade nas operações de transporte, como carga contentorizada e rolante (ConRo) ou carga rolante e carga geral (RoLo) (Olsen, 2023).

A terminologia técnica na indústria marítima é um aspeto crítico, com nomenclaturas globalmente estabelecidas para padronizar a comunicação entre agentes de diferentes operações (Kehr et al., 2020). Por exemplo, o calado de um navio é uma característica base no design naval e nas operações marítimas, definindo a profundidade vertical desde a linha de flutuação até o ponto mais baixo da embarcação, ou seja, indica a altura mínima de água necessária para que o navio não toque o leito marinho, permitindo a sua movimentação segura e evitando o risco de encalhe (Kehr et al., 2020). Este parâmetro crítico para as operações portuárias, restringe o acesso de navios com um calado profundo a portos com restrições de profundidade, e pode exigir um planeamento adicional, de forma rigorosa, acerca da rota e plano de carga, a fim de otimizar a eficiência operacional sem

comprometer a segurança da navegação (ILLES et al., 2021). A Figura 8 detalha essa classificação.

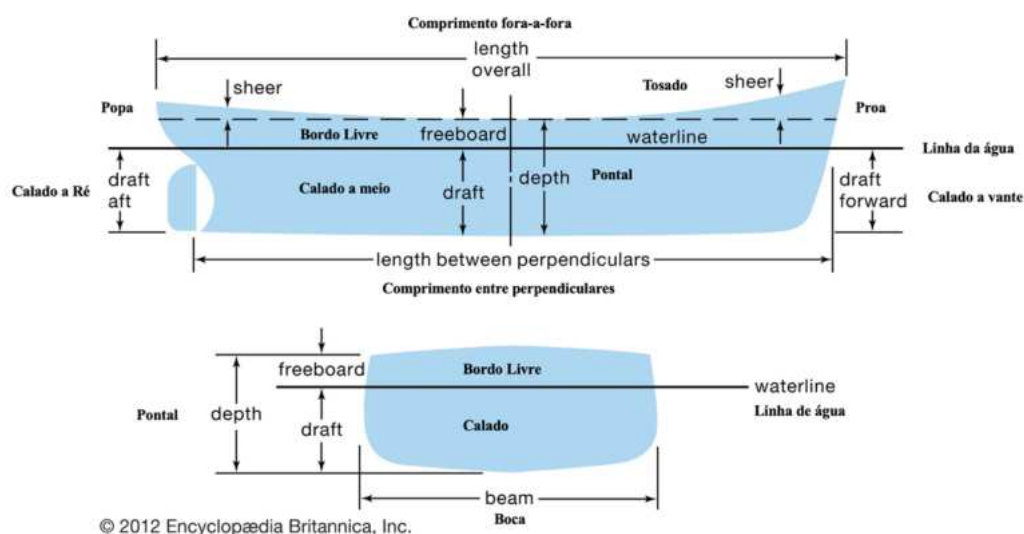


Figura 8 - Terminologias do navio (Adaptado de Britannica (2012))

A classificação das embarcações por finalidade, conforme estabelecido pela “Decisão 98/385/CE da Comissão Europeia” (1998), padroniza a definição dos diferentes tipos de navios e é essencial para a regulação e gestão eficaz da frota global. De acordo, a nomenclatura a adotar para definir os diferentes tipos de navios e embarcações por finalidade é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Nomenclatura do tipo de navios

Categoria ⁽¹⁾	Código	Descrição	Tonelagem	Número
Granel líquido	10	Granéis líquidos (ausência de unidade de carga)	X	
	11	Gás liquefeito	X	
	12	Petróleo bruto	X	
	13	Produtos petrolíferos	X	
	19	Outros granéis líquidos	X	
Granel sólido	20	Granéis sólidos (ausência de unidade de carga)	X	
	21	Minérios	X	
	22	Carvão	X	
	23	Produtos agrícolas (por exemplo: cereais, soja, tapioca)	X	
	29	Outros granéis secos	X	
Contentores	30	Mercadorias em grandes contentores	X ⁽³⁾	X
	31	Contentores de 20'	X ⁽³⁾	X
	32	Contentores de 40'	X ⁽³⁾	X
	33	Contentores > 20' e < 40'	X ⁽³⁾	X
	34	Contentores > 40'	X ⁽³⁾	X
<i>Ro-ro</i> (com auto-propulsão)	50	Unidades móveis de auto-propulsão	X	X
	51	Mercadorias em veículos rodoviários automóveis para o transporte de mercadorias e acompanhados de reboques	X ⁽³⁾	X
	52	Viaturas particulares e acompanhadas de reboques e caravanas		X ⁽²⁾
	53	Autocarros de passageiros		X ⁽²⁾
	54	Veículos automóveis <i>import/export</i>	X	X ⁽²⁾
	56	Animais vivos	X	X ⁽²⁾
<i>Ro-ro</i> (sem auto-propulsão)	60	Outras unidades móveis	X	X
	61	Mercadorias em reboques rodoviários de mercadorias e semi-reboques não acompanhados	X ⁽³⁾	X
	62	Caravanas não acompanhadas e outros reboques agrícolas e industriais	X	X ⁽²⁾
	63	Mercadorias em vagões de caminho-de-ferro, reboques para o transporte marítimo transportados por navios, batelões para transporte de mercadorias transportadas por navios	X ⁽³⁾	X
Carga geral (incluindo pequenos contentores)	90	Outra carga não classificada noutra posição	X	
	91	Produtos florestais	X	
	92	Produtos ferrosos e aço	X	
	99	Outra carga geral	X	

⁽¹⁾ Estas categorias são compatíveis com a Recomendação nº 21 CEE-ONU.

⁽²⁾ Unicamente número total de unidades.

⁽³⁾ A quantidade registada é o peso bruto das mercadorias incluindo a embalagem, mas excluindo o peso dos contentores e das unidades *ro-ro*.

2.2.2. Organização da indústria marítima: Relações entre armadores, portos e outros agentes

A organização da indústria marítima caracteriza-se por uma vasta rede de relacionamentos entre diversos agentes, cuja interação é importante para a eficiência e segurança das operações marítimas.

Esta rede de agentes inclui:

Armadores: proprietários dos navios cuja responsabilidade passa pela gestão das operações marítimas, sujeita a inúmeros desafios como a manutenção da sustentabilidade e segurança (Agnolucci et al., 2014);

Portos: pontos essenciais no comércio internacional, funcionando como a interface principal para a carga e descarga de mercadorias, onde a eficiência operacional impacta diretamente a cadeia logística marítima quer em tempos de trânsito quanto em custos de operação adicionais (Tijan et al., 2021);

Disponent Owners: armadores que, mediante operações de fretamento de navios, alugam ou fretam navios de outros proprietários para uso nas suas operações, expandindo a sua capacidade operacional sem a posse direta de embarcações adicionais (Cariou et al., 2021);

Shipmanagers: entidades especializadas na gestão técnica e operacional dos navios, assegurando que se reúnem as condições adequadas para a navegação (Kandakoglu et al., 2009);

Empresas de *manning*: fornecem e gerem as tripulações dos navios, garantindo pessoal qualificado e em conformidade com os regulamentos marítimos (P. Zhang & Zhao, 2015);

Brokers: atuam como intermediários nas negociações entre fretadores e afretadores, facilitando acordos comerciais e contratos de fretamento (Holland et al., 2015);

Agentes de Navegação: representam os interesses dos armadores em portos específicos ou países, tratando de questões logísticas, administrativas e regulatórias (Frémont, 2009);

Autoridades do Estado de Bandeira e Sociedades Classificadoras: responsáveis pela regulação, certificação e fiscalização dos navios, assegurando que cumpram os padrões de segurança e ambientais (Atkinson et al., 2018).

Nesta rede evidencia-se a interdependência crítica entre os agentes, sublinhando-se a importância de cada um para a manutenção da cadeia de valor marítima e no sucesso da indústria marítima face a desafios específicos, incluindo:

Elevada Especialização: a diversidade de operações de cada segmento da indústria marítima exige conhecimentos especializados, onde a gestão e operação dos diferentes tipos de navios requerem conhecimento e competências específicas. Profissionais de todas as áreas, desde a tripulação até os gestores de frota, devem possuir competências específicas para garantir operações seguras e eficientes (Davarzani et al., 2016);

Fiscalização por Autoridades: a atividade marítima está sujeita a uma rigorosa monitorização por diversas autoridades reguladoras, tanto a nível nacional e internacional, como a Guarda Costeira e as sociedades classificadoras, que desempenham um papel determinante na fiscalização das operações, assegurando o cumprimento das normas de segurança e proteção ambiental (Tijan et al., 2021);

Questões de Segurança e Regulamentação: a segurança é uma prioridade fundamental na indústria marítima. Regulamentações como o Código Internacional para a Segurança dos Navios e Instalações Portuárias (ISM), o Código Internacional para a Proteção de Navios e Instalações Portuárias (ISPS), o Código Marítimo Internacional de Mercadorias Perigosas (IMDG) e o Controlo do Estado do Porto (PSC) estabelecem padrões minuciosos para assegurar a segurança das tripulações, das embarcações e a proteção do meio ambiente (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 2006).

A compreensão da função e interdependência destes agentes na resolução destes desafios é fundamental para reconhecer não apenas a complexidade da indústria marítima, mas também a necessidade de uma cooperação eficaz entre os diferentes intervenientes. Desta cooperação, asseguram-se operações realizadas dentro dos parâmetros estabelecidos, promovendo um ambiente marítimo seguro, sustentável e eficiente (C.-Y. Lee & Song, 2017).

2.3. Infraestrutura portuária

Os portos influenciam o comércio mundial e, quando se fala em infraestrutura portuária, existe muito mais do que o simples cais onde os barcos atracam. É aqui que tudo se organiza, desde as entradas e saídas dos navios geridas cuidadosamente, às mercadorias que são armazenadas e preparadas para seguir viagem até aos diferentes meios de transporte que se interligam. Toda esta organização é importante para que as cargas cheguem e partam sem problemas, mantendo o fluxo de negócios pelo mundo de forma eficiente e ágil. Nesta seção, explorar-se-á os principais elementos relacionados aos portos e terminais marítimos.

2.3.1. Portos e terminais marítimos

Os portos, como principais nós de interconexão entre as vias marítimas e terrestres, coordenam os vários modos de transporte e a movimentação de mercadoria. Foram desenhados para gerir uma variedade de operações que vão desde o trânsito de navios até ao processamento alfandegário. A estrutura física portuária abrange diversos elementos, desde áreas de atracação até instalações para armazenagem e movimentação de cargas.

Os terminais marítimos são instalações altamente especializadas, localizados dentro dos portos, e projetados para lidar com operações específicas, como carga e descarga de contentores, graneis sólidos ou líquidos, entre outras. A disposição e as capacidades destes terminais refletem as necessidades comerciais e operacionais do porto, influenciadas por fatores económicos, geográficos e, também, tecnológicos, com implicações diretas na eficiência das cadeias logísticas e no custo dos produtos no mercado global.

O parque de um terminal é o ponto de armazenagem temporária dos contentores de importação e exportação. Geralmente existe outra zona de depósito, um pouco mais longe do terminal, e que é destinado para “guardar” contentores vazios que poderão ser usados em futuras reservas ou embarcar em futuras viagens.

Os portos multimodais também englobam uma área específica de recepção e armazenagem de unidades via ferroviária. A Figura 9 mostra um exemplo da distribuição espacial destes elementos para o Porto de Contentores Sul de Leixões.



Figura 9 - Layout do terminal sul de Leixões (Retirado de Yilport Leixões (2024))

O Terminal de Contentores Sul possui diferentes postos de atuação sendo que se destacam os seguintes: recepção e armazenagem de mercadoria; sistema intermodal; manutenção de contentores; direção e controlo de operações.

Os *stackers* são responsáveis por posicionar cada contentor no seu devido lugar, maximizando a utilização do espaço disponível enquanto aguardam a recolha pelos clientes. Neste processo, o camião do terminal fica imobilizado no meio do parque e os contentores são removidos e ou pousados no trailer, tal como mostra a Figura 10.



Figura 10 - Stacker do Terminal de Contentores Sul do porto de Leixões (Retirado de (Yilport Leixões, 2024))

2.3.2. Importância da eficiência portuária no transporte marítimo

A eficiência portuária é um indicador chave do desempenho logístico de um país e tem um impacto direto na velocidade com que o comércio pode fluir. Um porto eficiente e bem projetado minimiza o tempo de inatividade e espera dos navios, reduz os custos de armazenagem e otimiza a movimentação de cargas. A eficiência é alcançada não apenas através da infraestrutura física, mas também por meio de sistemas de gestão de operações que utilizam tecnologias avançadas para a movimentação e rastreamento de cargas. As estratégias para melhorar a eficiência portuária passam pela otimização de procedimentos, investimento em tecnologia e infraestrutura, e a formação de recursos humanos. Um porto bem orientado, contribui para a redução de custos logísticos e promove a competitividade das exportações e importações.

A eficiência portuária e a eficácia com que as mercadorias são movimentadas têm um impacto direto na economia do transporte marítimo como um todo, afetando não só o custo, mas também a pegada ambiental da cadeia de abastecimentos. Os portos mais eficientes contribuem para uma menor pegada de carbono do transporte marítimo pelo reduzido tempo de espera dos navios e, conseqüentemente, diminuição das emissões poluentes portuárias.

Neste contexto, compreender os elementos que compõem a infraestrutura portuária é importante para analisar e aprimorar as operações logísticas, contribuindo assim para um transporte marítimo mais eficiente e sustentável.

2.4. Contentor - A caixa que mudou o mundo

O contentor revolucionou o transporte marítimo e redefiniu a logística global. Esta seção aborda a origem e evolução do contentor, destacando o impacto de diferentes tipologias de contentores na eficiência do transporte marítimo e alguns desenvolvimentos tecnológicos recentes.

2.4.1. Origem e história do contentor de transporte marítimo

O contentor, inicialmente concebido como uma solução prática para o transporte de mercadorias, teve origem no final do século XIX. Contudo, a sua utilização generalizada apenas ocorreu pelo século XX. Malcom McLean, um empresário norte-americano, é reconhecido como pioneiro no transporte de contentores porque, em 1956, McLean desenvolveu o primeiro navio porta-contentores, o "Ideal-X," marcando o início de uma nova era na movimentação de carga marítima (Levinson, 2008).

A partir desse momento, a padronização dos contentores e a criação de uma infraestrutura portuária adaptada revolucionaram as operações logísticas (Xu et al., 2023). A existência de um sistema com contentores padronizados permitiu a movimentação eficiente entre diferentes modos de transporte para diversos pontos geográficos, promovendo a intermodalidade e facilitação das operações comerciais ao longo dos últimos anos (C.-Y. Lee & Song, 2017).

2.4.2. Tipos de contentores e especificidades

Os contentores intermodais, também conhecidos como contentores de carga, foram projetados para o transporte de mercadorias em diversas condições ambientais e através de diferentes modos de transporte, incluindo marítimo (sobre ou sob o convés), rodoviário e ferroviário. Estes contentores são construídos para resistir às condições impostas por esses modos de transporte sem sofrer deformações permanentes (Kuzmich & Pesch, 2019)

Os contentores são frequentemente medidos em unidades equivalentes a vinte pés (TEU). Um TEU (*Twenty-foot Equivalent Unit*) representa um contentor-padrão de aço de vinte pés (aproximadamente seis metros de comprimento), projetado para o transporte de carga geral sem deformação. Esses contentores possuem dimensões padrão de aproximadamente 2,44 metros de largura e 2,59 metros de altura, resultando num volume interno de cerca de 33 metros cúbicos. Os contentores também podem ser medidos em

unidades equivalentes a quarenta pés (FEU - *Fourty-foot Equivalent Unit*), que possuem o dobro do comprimento dos TEU, mantendo a largura e altura (Levinson, 2008).

Os contentores apresentam marcações operacionais obrigatórias feitas com autoadesivos ou decalques que fornecem informações vitais sobre o contentor e incluem:

- Emblemas do proprietário;
- Código do proprietário, número de série e dígito verificador;
- Código de tamanho e tipo;
- Detalhes de peso.

A Figura 11 localiza cada marcação no contentor marítimo.



Figura 11 - Marcações do contentor marítimo (Retirado de Evergreen Line (2024))

Estas informações garantem que o manuseamento, transporte e rastreabilidade dos contentores sejam realizados de maneira eficiente e segura.

Os tipos de contentores de carga subdividem-se em:

Contentores de Carga Seca: a tipologia mais comum de contentores é a apresentada na Figura 12, disponíveis geralmente nos tamanhos de vinte e quarenta pés e utilizam-se para transportar uma ampla gama de mercadorias gerais.



Figura 12 - Contentor de carga seca Evergreen (Retirado de Evergreen Line (2024))

Contentores Refrigerados: Equipados com máquinas de refrigeração, estes contentores são responsáveis pelo transporte de produtos perecíveis, como alimentos e medicamentos, mantendo-os em temperaturas controladas durante todo o transporte (Figura 13);



Figura 13 - Reefer Evergreen (Retirado de Evergreen Line (2024))

Contentores Especiais: abertos na parte superior (*Open Top*) ou contentores de base plana sem laterais e topo (*Flat Rack*), projetados para transportar cargas de dimensões especiais, como máquinas pesadas ou barcos. A Figura 14 apresenta, respetivamente, o contentor *Open Top* (A) e uma *Flat Rack* (B).



Figura 14 - Contentor open top e flat rack (Retirado de Evergreen Line (2024))

De acordo com o programa CTPAT, ou *Customs-Trade Partnership Against Terrorism*, as companhias marítimas adotam selos de alta segurança que são projetados para proteger as cargas durante o transporte. Esses selos, em conformidade com os rigorosos padrões estabelecidos pela norma internacional ISO 17712:2013, garantem que foram fabricados e testados para resistir a violações ou adulterações. O CTPAT, é um programa que visa aumentar a segurança da cadeia de abastecimento internacional, enquanto a ISO 17712:2013 define requisitos específicos para tais selos, assegurando sua qualidade e eficácia (Tong et al., 2022). Na Figura 15 encontra-se o selo da companhia Evergreen.

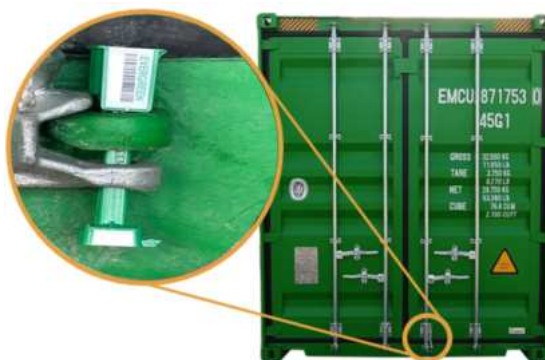


Figura 15 - Selo de contentor marítimo (Adaptado de Evergreen Line (2024))

A segurança da cadeia de abastecimento começa no embarcador, no momento do carregamento, aplicando selos de segurança ISSO, imediatamente após a operação de carregamento e documentando o número do selo. Esta prática é crucial para manter a integridade da carga e garantir a segurança ao longo de toda a cadeia de transporte (Scholliers et al., 2016).

Estas especificações e práticas garantem que os contentores possam ser usados de forma flexível e segura em diversos contextos logísticos, maximizando a eficiência do transporte intermodal e a segurança das cargas transportadas.

2.4.3. Impacto do contentor na eficiência do transporte marítimo

O contentor trouxe uma eficiência ao transporte marítimo com a sua padronização, que simplificou o processo de carga e descarga, reduzindo significativamente os tempos nos portos. A capacidade de serem empilhados transformou a organização de carga nos navios, maximizando o uso de espaço e permitindo o transporte de grandes volumes de carga de uma só vez (Levinson, 2008).

A introdução do contentor também reforçou a segurança da mercadoria, diminuindo os danos e perdas durante o manuseio o que, por sua vez, agilizou as operações e reduziu os custos logísticos, impulsionando o comércio a nível mundial (Scholliers et al., 2016).

2.4.4. Desenvolvimentos tecnológicos relacionados ao contentor

Atualmente, com os avanços tecnológicos, os contentores evoluíram de simples caixas de metal para componentes sofisticados inerentes ao sistema de transporte. Hoje, com recursos como refrigeração, rastreamento GPS e monitorização ambiental, os contentores garantem a segurança e a integridade das cargas (Mittendorf et al., 2023). Essas inovações melhoram a segurança e a integridade da carga, especialmente para produtos sensíveis a temperatura.

Um dos avanços mais notáveis no design de contentores é o desenvolvimento de modelos dobráveis. A Figura 16 mostra como estes contentores podem ser dobrados e fechados até ficarem planos, o que representa uma economia significativa em termos de espaço e custos quando estão vazios e precisam ser transportados ou armazenados (Bandara et al., 2015).

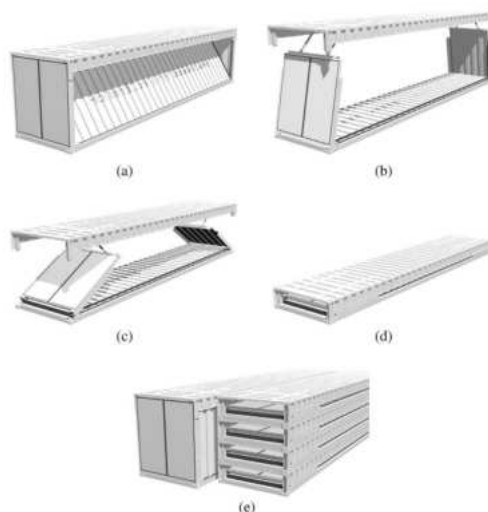


Figura 16 - Processo de dobragem de um contêntor colapsável (Retirado de Shintani et al. (2010))

Este tipo de inovação é particularmente promissor para a fase prática do transporte, uma vez que oferece uma solução para o problema do transporte de contentores vazios, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade do setor (Kuzmicz & Pesch, 2019).

As inovações atuais dos contentores transformam o transporte marítimo, impulsionando positivamente a globalização e a eficiência logística.

2.5. Desafios e oportunidades

Esta secção explora os desafios ambientais enfrentados pelo transporte marítimo, as iniciativas sustentáveis adotadas pelo setor e as regulamentações ambientais em vigor, destacando-se a importância da segurança marítima, prevenção de acidentes e as medidas implementadas para mitigar riscos.

2.5.1. Regulamentações ambientais no transporte marítimo

O transporte marítimo enfrenta desafios significativos relacionados às emissões de carbono, poluição do ar e impacto nos ecossistemas marinhos. A queima de combustíveis fósseis por navios contribui para as mudanças climáticas, levando a uma busca por soluções mais sustentáveis com vista à proteção do ambiente e à conservação da energia (Zhou et al., 2018).

Yang et al. (2021) exploraram o impacto das políticas governamentais nas emissões de carbono propondo um modelo de otimização que considerava um conjunto de restrições, taxas e necessidades que devem ser tidas em conta quando se fala de transporte marítimo.

No fim, provaram que existia uma relação entre o investimento do governo e a performance do sistema de transporte marítimo. Por outro lado, mudanças simples que em nada afetam operações de larga escala, como a alteração no soalho interno do contentor de madeira por um composto de metal que é mais sustentável, podem também trazer impactos significativos em toda a pegada ambiental do setor (Doukas et al., 2021).

O setor marítimo está a responder aos desafios ambientais por meio de iniciativas sustentáveis, como a transição para combustíveis de baixo teor de enxofre, o desenvolvimento de tecnologias verdes e a busca por fontes de energia renovável. Regulamentações rigorosas, como o Acordo de Controlo de Emissões de Enxofre (IMO 2020), estão a impulsionar essas mudanças (Levinson, 2008).

2.5.2. Segurança marítima e avanços tecnológicos no setor marítimo

A segurança marítima é uma prioridade, considerando os riscos associados à navegação. Medidas como treino avançado da tripulação, implementação de padrões de segurança internacionais e avanços tecnológicos, como sistemas anticollisão, são cruciais para prevenir acidentes e garantir a integridade das operações marítimas (Christiansen et al., 2007).

A automação e digitalização estão a transformar rapidamente o cenário do transporte marítimo. A introdução de sistemas avançados de gestão de navios, navegação autónoma e operações portuárias automatizadas visa otimizar as operações e reduzir custos (Kretschmann et al., 2017).

Navios equipados com tecnologia de automação podem realizar várias tarefas de forma eficiente, desde a navegação até às operações de carga e descarga. A utilização de sensores, drones e inteligência artificial contribui para uma gestão mais eficaz dos recursos e uma resposta rápida a condições adversas (Meyer et al., 2023). A ascensão dos navios autónomos representa uma revolução no transporte marítimo. Estas embarcações, impulsionadas por inteligência artificial e tecnologia de sensores avançada, têm o potencial de operar com eficiência, reduzir riscos de colisões e melhorar a segurança marítima (Kretschmann et al., 2017).

Os sistemas de gestão de frotas, baseados em dados em tempo real e análise preditiva, possibilitam uma supervisão abrangente de múltiplos navios. Essas soluções visam maximizar a eficiência operacional, otimizar rotas para poupança de combustível e reduzir as emissões de carbono (Christiansen et al., 2007).

2.5.3. Papel do transporte marítimo no comércio internacional

Atualmente, a economia é globalizada, cada vez mais exigente a nível de prazos e custos, relativamente ao transporte de mercadorias e bens.

Neste contexto, o transporte por via marítima tem grande impacto pelas elevadas movimentações de mercadorias entre grandes distâncias devido ao baixo custo de transporte por tonelada. Por isso, este meio de transporte é muito competitivo para satisfazer os requisitos da procura e, também, a exigências em mudanças operacionais dos portos e estruturais dos navios (Meng et al., 2017).

A frota mundial de navios fornece não só uma conectividade para o comércio internacional, mas também um meio de subsistência para todas as pessoas que trabalham nesta área de negócio. A existência de diferentes países especializados e portos em diferentes subsectores do transporte marítimo continua a verificar-se. Vários países, incluindo os que se encontram em regiões em desenvolvimento, beneficiam da construção, registo e desmantelamento de navios. A especialização em negócios ligados ao comércio marítimo necessita que as pessoas responsáveis pela elaboração de políticas identifiquem cuidadosamente possíveis nichos de mercado para os seus países e optem entre políticas conflituantes. O poder político poderá ter de escolher entre proteger as empresas nacionais de transporte da concorrência estrangeira, ou aumentar a competitividade comercial, melhorando a conectividade e reduzindo os custos comerciais. Neste último caso, pode haver a necessidade de liberalizar os mercados marítimos e portuários nacionais (UNCTAD, 2017).

2.6. Centro de desconsolidação de carga marítima

Este capítulo abordará o conceito e a importância dos centros de desconsolidação de carga marítima, as suas operações, vantagens e desafios logísticos, e alguns estudos de caso que ilustram as suas aplicações práticas.

2.6.1. Definição, importância e operações de centros de desconsolidação

Os centros de desconsolidação de carga são instalações logísticas especializadas onde as mercadorias consolidadas em contentores são descarregadas, separadas e redistribuídas para diferentes destinos (Cheng & Tsai, 2009). Estes centros desempenham

um papel crucial na cadeia de abastecimento global, ao permitir uma rápida reclassificação e distribuição eficiente das mercadorias. A sua importância reside na capacidade de reduzir custos de transporte, melhorar a gestão de inventário e acelerar o tempo de entrega ao cliente final (Rodrigues et al., 2023).

As operações num centro de desconsolidação de carga incluem a receção de contentores, a inspeção das mercadorias, a separação das cargas conforme os destinos finais, o armazenamento temporário e a redistribuição (Cheng & Tsai, 2009). Estas operações são frequentemente apoiadas por tecnologias avançadas, como sistemas de gestão de *stock* ou identificação por radiofrequência (RFID), que otimizam a organização e o rastreamento das mercadorias.

2.6.2. Vantagens logísticas e desafios

Os centros de desconsolidação oferecem várias vantagens logísticas, que se traduzem em benefícios significativos para a cadeia de abastecimento. Entre as principais vantagens, destacam-se a redução de custos de transporte, uma vez que as mercadorias podem ser redistribuídas de forma mais eficiente a partir de um ponto central (Rodrigues et al., 2023). Além disso, a melhoria da eficiência operacional é alcançada através da automação e do uso de tecnologias avançadas, que permitem uma gestão otimizada do fluxo de mercadorias. A flexibilidade na distribuição das mercadorias também é uma vantagem crucial, permitindo uma resposta rápida às mudanças na procura do mercado (Barkley & Mcleod, 2022).

A implementação e operação de centros de desconsolidação enfrenta desafios significativos. A complexidade na gestão das operações diárias requer uma coordenação precisa entre várias partes interessadas, incluindo operadores logísticos, autoridades portuárias e empresas de transporte. Os elevados custos de instalação e manutenção das infraestruturas são outro desafio, exigindo investimentos substanciais em tecnologia e capacidade operacional (Lin et al., 2020). Além disso, a necessidade de assegurar a segurança das mercadorias e a conformidade com regulamentos internacionais adiciona camadas adicionais de complexidade à operação desses centros.

2.6.3. Estudos de caso e experiências práticas

Vários portos marítimos ao redor do mundo têm centros de desconsolidação de carga, onde os contentores são descarregados e a sua carga é separada e distribuída

(Rodrigues et al., 2010). Um exemplo notável é o Porto de Los Angeles nos Estados Unidos. Este porto, como um dos mais movimentados do mundo, tendo no ano de 2020 movimentado cerca de 9,3 milhões de TEUS. Este porto possui tecnologias avançadas, como sistemas automatizados de manuseio de contentores e plataformas de rastreamento em tempo real, permitindo a redistribuição eficiente das mercadorias importadas e a redução de congestionamentos nas operações (Leachman, 2008). Outro exemplo é o Porto de Rotterdam, nos Países Baixos. Com uma movimentação anual superior a 14 milhões de TEUS, é considerado o maior porto de *transshipment* da Europa, possuindo amplas instalações para a desconsolidação de carga, que permite a rápida redistribuição de mercadorias pelos diferentes destinos no continente (Fransen & Davydenko, 2021).

2.7. AnyLogic – Ferramenta de simulação e análise

Este capítulo aborda o conceito da ferramenta *AnyLogic*, as suas aplicações, o processo de modelação e simulação com recurso a simbologia específica, fornecendo uma visão de como este *software* pode ser utilizado para implementar um centro de desconsolidação junto a um terminal de contentores e otimizar os processos da cadeia de abastecimento marítima.

2.7.1. Definição da ferramenta e aplicações

The AnyLogic Company (2024) é uma plataforma de simulação que permite a modelação de sistemas dinâmicos complexos através de três principais paradigmas de simulação: a simulação baseada em eventos discretos, a simulação baseada em agentes e a simulação de dinâmica de sistemas. Pela sua combinação, é possível a construção de modelos funcionais que capturam a complexidade dos sistemas reais.

A simulação com recurso ao *AnyLogic* admite a resolução de problemas do mundo real de forma mais segura e eficiente, proporcionando um método de análise que é facilmente verificado, comunicado e compreendido (Torbalı & Alpan, 2023). O *AnyLogic* baseia-se em representações digitais válidas de sistemas, usando algoritmos e equações por forma a oferecer um ambiente dinâmico na análise de modelos computacionais aquando da sua execução, permitindo a visualização dos processos em 2D ou 3D.

As aplicações do *AnyLogic* são vastas e incluem áreas como a logística, gestão de cadeias de abastecimento, saúde, produção industrial e transporte (Antonov, 2020b). A

capacidade do *AnyLogic* para criar modelos híbridos permite aos analistas desenvolver soluções eficazes para problemas com difícil resolução e de suporte à tomada de decisão.

2.7.2. Processo de simulação

Para efetuar simulações nesta ferramenta deve seguir-se um procedimento específico (Grigoryev, 2015):

1. criação dos modelos conceptuais no *AnyLogic*, definindo a estrutura básica e os componentes principais do sistema. Envolve a identificação dos agentes, as suas interações e o fluxo de processos dentro do sistema;
2. parametrização dos agentes e das suas conexões, atribuindo características e comportamentos específicos a cada componente. Nesta etapa é importante garantir que os modelos representem com precisão a realidade do sistema. Após a parametrização, adiciona-se ferramentas de análise, como gráficos e relatórios, para monitorizar e visualizar o desempenho dos modelos durante as simulações;
3. com os modelos preparados e as ferramentas de análise configuradas, realiza-se simulações para comparar os indicadores de desempenho entre o modelo atual e o modelo proposto. Essa comparação permitirá identificar melhorias ao sistema proposto pela companhia e validar as propostas de otimização com base em dados concretos.

A utilização da simulação é particularmente valiosa em situações onde a realização de experiências em sistemas reais é impraticável devido a custos ou limitações de tempo. A capacidade de analisar o modelo em execução diferencia a simulação de outros métodos, como o uso de Excel ou programação linear (Winter et al., 2022). Através da inspeção e interação com um modelo de simulação em ação, é possível construir rapidamente conhecimento que aumenta a fiabilidade dos resultados.

2.7.3. Terminologia e simbologia em *AnyLogic*

A terminologia utilizada em *AnyLogic* é essencial para compreender os modelos lógicos e físicos que servem de base para a simulação 3D dos modelos em análise. De acordo com Grigoryev (2015) alguns termos importantes associados ao *AnyLogic* incluem:

Agentes: Representam entidades ativas no sistema que interagem entre si e com o ambiente, representando diversas coisas: veículos, peças de equipamento, projetos,

produtos, ideias, organizações, investimentos, lotes de terra, pessoas em diferentes profissões, entre outros;

Conectores: Indicam a interação e o fluxo de informação ou materiais entre os agentes. Apresenta a ligação entre diferentes blocos e garante o fluxo desde *source* até ao *sink*;

Processos: Representam atividades ou operações específicas que ocorrem ao longo do tempo;

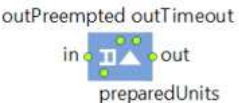
Recursos: Elementos que são utilizados ou consumidos pelos agentes durante as operações;

Eventos: Pontos no tempo que desencadeiam mudanças no estado do sistema ou nas atividades dos agentes.

Para construir modelos precisos e eficazes, que permitem obter das simulações, informações relevantes para a melhoria dos sistemas estudados, é necessário utilizar corretamente a simbologia deste *software* de análise (Torballi & Alpan, 2023). A Tabela 2 descreve os principais símbolos quando se simula em *AnyLogic*.

Tabela 2 – Simbologia em AnyLogic (Adaptado de The AnyLogic Company (2024))

Símbolo	Termo	Descrição
	<i>Source</i>	Gera agentes
	<i>Sink</i>	Descarta os agentes que chegam
	<i>Delay</i>	Atrasa os agentes pelo tempo de demora especificado
	<i>Queue</i>	Armazena, em fila, agentes na ordem especificada

Símbolo	Termo	Descrição
	<i>SelectOutput</i>	Encaminha o agente para uma das portas de saída dependendo da condição
	<i>Hold</i>	Bloqueia ou desbloqueia o fluxo de agentes
	<i>Split</i>	Cria uma ou mais cópias de cada agente que chega ("original")
	<i>Combine</i>	Aguarda por dois agentes e, em seguida, cria um novo agente a partir deles
	<i>MoveTo</i>	Move um agente da sua localização atual para uma nova localização
	<i>ResourcePool</i>	Fornecer unidades de recurso que podem ser requisitadas e libertadas pelos agentes
	<i>Seize</i>	Requisita o número de unidades do recurso especificado necessário pelo agente
	<i>Release</i>	Liberta as unidades de recurso previamente requisitadas pelo agente
	<i>Service</i>	Requisita unidades de recurso para o agente, atrasa-o e liberta as unidades requisitadas
	<i>PickUp</i>	Adiciona os agentes selecionados ao conteúdo do agente que chega
	<i>PalletRack</i>	Zona de armazenagem de agentes
	<i>RackSystem</i>	Modela uma zona de armazenamento contendo um conjunto de racks (definidos por formas <i>PalletRack</i>), proporcionando acesso e gestão centralizada dos racks.

Símbolo	Termo	Descrição
	<i>RackStore</i>	Coloca um agente numa célula do <i>rack</i> especificado (<i>PalletRack</i>) ou zona de armazenamento (<i>RackSystem</i>)
	<i>RackPick</i>	Retira um agente de uma célula do <i>rack</i> (<i>PalletRack</i>) ou zona de armazenamento (<i>RackSystem</i>) e move-o para o nó de rede especificado

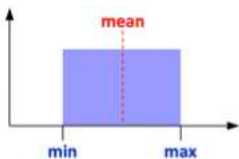
2.7.4. Distribuições e probabilidades

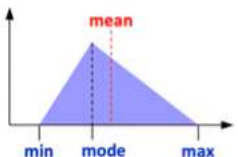
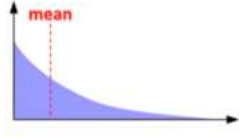
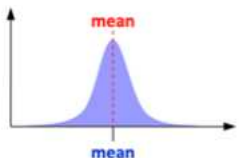
A incerteza é uma consideração relevante quando se define um processo ou fenómeno da realidade e, um modelo de simulação, precisa de garantir a reflexão precisa dessa realidade. A única maneira de fazer isso é incorporar aleatoriedade no modelo, ou seja, incluir pontos que proporcionem resultados aleatórios cada vez que se aciona a execução do modelo.

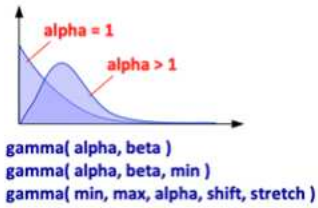
Existem diversos mecanismos que permitem criar fontes de aleatoriedade no modelo, nomeadamente pelas distribuições de probabilidade ou criação de números aleatórios.

O *AnyLogic* suporta cerca de 25 distribuições e oferece mais de 50 funções correspondentes. Na Tabela 3, descreve-se as distribuições mais frequentemente utilizadas neste *software*.

Tabela 3 - Distribuições estatísticas aplicáveis em *AnyLogic* (Adaptado de (The AnyLogic Company, 2024))

Distribuição	Utilidade
Uniforme  uniform() uniform_pos() uniform(max) uniform(min, max)	Conhece-se os valores mínimo e máximo, mas assume-se uma probabilidade constante para qualquer valor entre eles. Usada, por exemplo, para gerar coordenadas de agentes uniformemente distribuídos numa área retangular.

Distribuição	Utilidade
Triangular  <code>triangular(min, max)</code> <code>triangular(min, mode, max)</code> <code>triangular(min, max, mode)</code> <code>triangular(min, max, left, mode, right)</code>	Conhecem-se os valores mínimo, máximo e tem-se uma estimativa do valor mais provável (moda). Usada, por exemplo, para tempos de serviço, tempos de viagem ou, de forma geral, para estipular a duração de operações em condições de dados amostrais limitados (poucas amostras para construir uma forma de distribuição significativa).
Exponencial  <code>exponential()</code> <code>exponential(lambda)</code> <code>exponential(lambda, min)</code> <code>exponential(min, max, shift, stretch)</code>	Descreve os tempos entre eventos num processo de <i>Poisson</i>, ou seja, quando os eventos ocorrem independentemente a uma taxa média constante. Usada como tempo entre chegadas para fluxos de entrada de clientes, peças, chamadas, pedidos, transações ou falhas dos modelos que representam um processo. Nos modelos baseados em agentes, é usada como tempo limite para transições de taxa que modelam eventos independentes em agentes, conhecidos por ocorrerem a uma certa taxa média global.
Normal  <code>normal()</code> <code>normal(sigma)</code> <code>normal(sigma, mean)</code> <code>normal(min, max, shift, stretch)</code>	Oferece uma boa descrição para dados que tendem a agrupar-se em torno da média. Por exemplo, a altura de um adulto do sexo masculino, o erro de observação, entre outros. Como a distribuição normal é ilimitada para ambos os lados, então é necessário colocar limites (por exemplo, evitar valores negativos), devendo-se usar a sua forma truncada ou recorrendo a outras distribuições como <i>Lognormal</i>, <i>Weibull</i>, <i>Gamma</i> ou <i>Beta</i>.

Distribuição	Utilidade
<i>Gamma</i>  $\text{gamma}(\alpha, \beta)$ $\text{gamma}(\alpha, \beta, \min)$ $\text{gamma}(\min, \max, \alpha, \text{shift}, \text{stretch})$	Trata-se de uma distribuição limitada no lado inferior. Se α (parâmetro de forma) for 1, a distribuição exponencial reduz; para valores de α maiores do que 1, verifica-se um pico de aumento e depois uma diminuição de forma suave. Usada para avaliar, por exemplo, tempos de vida, tempos de espera ou rendimento mensal.

Existem modelos estocásticos e determinísticos. Um modelo determinístico não possui aleatoriedade interna e, quando executado para o mesmo conjunto de parâmetros de entrada, segue sempre a mesma trajetória e produz os mesmos resultados de saída. Um modelo estocástico possui fontes internas de aleatoriedade e, em cada execução (mesmo com os mesmos parâmetros), pode resultar em trajetórias e saídas diferentes (Grigoryev, 2015). Neste momento, o Sistema de Transporte Marítimo lida maioritariamente com parâmetros estocásticos, uma vez que os tempos das atividades que compõem este sistema variam conforme as características de cada cliente (a sua disponibilidade, localização ou veículo utilizado), do tipo de carga (densidade, volume, perigosidade, entre outros) ou até dos operadores do terminal (nível de experiência, fadiga, entre outros).

3. Sistema de transporte marítimo no norte de Portugal

Atualmente, as operações marítimas operam a nível mundial e, o interesse da presente investigação, irá incidir no mercado português, mais especificamente no norte de Portugal.

3.1. Sistema atual de operações

Em análise, encontra-se uma companhia de navegação marítima que, por motivos de confidencialidade, irá ser tratada por *CNM* ao longo do estudo e, também, o porto marítimo que utiliza nas suas operações, o Porto de Contentores Sul de Leixões.

3.1.1. Processo operacional do sistema atual

A Figura 17 apresenta o ciclo operacional de contentores, genérico, adotado em Portugal pela *CNM* e restantes companhias de navegação na atualidade.

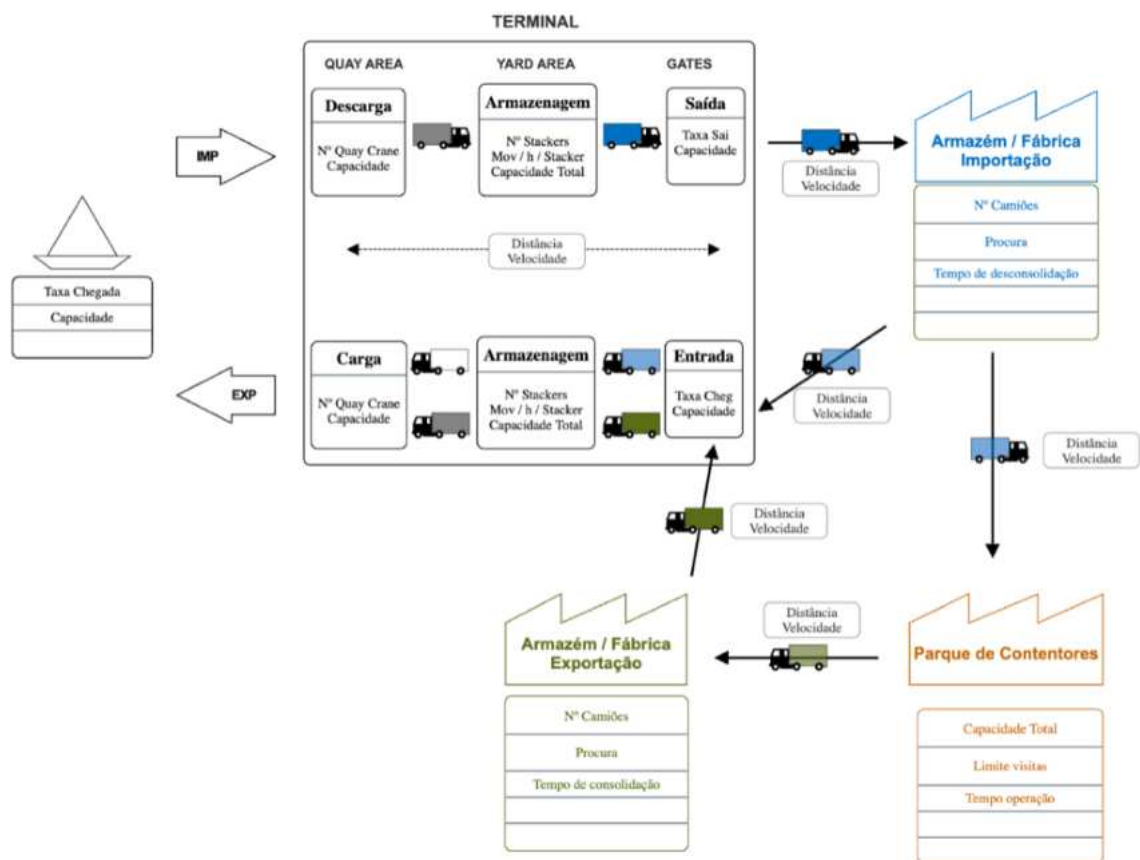


Figura 17 - Modelo conceptual atual das operações

O ciclo operacional inicia-se no Terminal de Contentores Sul do Porto de Leixões (TCL Sul) com a chegada de navios ao cais. Utilizando guindastes de cais, conhecidos como “*Quay Cranes*”, dá-se início ao processo de descarga dos contentores cheios de importação.

Estes contentores são retirados dos navios e colocados sobre camiões especiais do terminal, preparados para movimentar carga pesada. Assim que os contentores estão seguros e acomodados, os camiões transportam-nos até à área de armazenamento, chamada de “*Yard Area*”. Aqui, os contentores serão organizados e armazenados temporariamente utilizando as *stackers*. A disposição e gestão do espaço são cruciais para o alcance da alta eficiência dos portos.

Os camiões do terminal, que entregam os contentores de importação no pátio, não permanecem inativos. Eles são imediatamente recarregados, desta vez com contentores destinados à exportação. Essa eficiência no processo de “*turnaround*” é fundamental para manter o fluxo contínuo e a operacionalidade do terminal.

Com os contentores de exportação a bordo, os camiões fazem o caminho de volta ao cais. Aqui, os *Quay Cranes* entram novamente em ação, levantando os contentores dos camiões para carregar os navios que os levarão a destinos internacionais. Este processo de carga deve ser tão eficiente quanto o de descarga, garantindo que os navios possam partir conforme o cronograma.

A precisão e a coordenação são fundamentais neste processo. A troca de informações em tempo real entre as áreas do cais, *Yard* e portões do terminal é crucial para as operações. Cada elemento, desde a chegada dos navios até à saída dos contentores exportados, representa um elo de uma cadeia de atividades interligadas, desenhadas para maximizar a eficiência e minimizar o tempo de inatividade, tanto para o terminal quanto para os seus utilizadores.

Ao longo deste ciclo, a gestão do terminal controla cada etapa, ajustando as operações conforme necessário para responder a quaisquer imprevistos ou alterações do planeamento. O objetivo é assegurar que cada contentor, seja de importação ou exportação, passe pelo terminal de Leixões com rapidez, segurança e eficácia. Incorporando a dinâmica externa ao processo operacional no Terminal de Contentores Sul do Porto de Leixões, a experiência do cliente ganha novas dimensões. Após a eficiente descarga e armazenamento temporário dos contentores importados na área do terminal, os clientes dispõem de um período previamente acordado para proceder ao levantamento dos seus contentores.

O destino dos contentores após deixar o TCL Sul varia conforme a natureza da carga. Matérias-primas geralmente têm como destino as fábricas, onde são essenciais para os processos de produção contínuos. Por outro lado, mercadorias destinadas ao consumo direto são levadas para armazéns de distribuição, onde serão mais tarde encaminhadas para as lojas ou pontos de consumo.

Cumprida a entrega, a responsabilidade pelo contentor vazio recai sobre o cliente. A companhia de navegação estabelece o local para a devolução do contentor, podendo ser um parque de contentores subcontratado ou o próprio terminal. A escolha depende do sistema de logística implementado pela companhia marítima.

Se o contentor vazio retornar ao terminal, é armazenado na “área de pátio” até que haja oportunidade de embarcá-lo num navio *feeder* (navios de menor dimensão que “alimentam” pequenos portos). Caso contrário, quando entregue no parque de contentores, o mesmo pode ser recolhido por outros clientes que necessitem de contentores para exportações.

O processo de exportação inicia-se quando a companhia de navegação liberta o contentor para um cliente específico. O transportador designado pelo cliente recolhe o contentor vazio, leva-o para um armazém ou fábrica para carregamento e sela o contentor com a segurança fornecida pelo parque de contentores. Este selo é uma garantia de que a carga chegará intacta ao destinatário final.

Após o enchimento, o transportador de exportação volta com o contentor ao terminal, onde será armazenado na área de pátio, pronto para ser embarcado no próximo navio disponível. A programação do terminal é rigorosa e apenas as cargas entregues até o dia anterior à chegada de um navio serão consideradas para embarque. Isso garante que os processos de carga sejam realizados com a máxima eficiência, assegurando que as exportações fluam sem interrupções e que os navios partam segundo o planeado.

3.1.2. Recolha e análise de dados do sistema atual

Numa análise da frequência de chegadas de navios ao Porto de Leixões, com carga e descarga para a companhia *CNM*, num período observacional de 466 dias, foram contabilizadas um total de 75 chegadas. A partir do conjunto de dados relativos aos *feeders* que conectam Portugal ao porto de T/S (*transhipment*) Rotterdam, calculou-se a taxa média de chegadas (λ) e, usando a distribuição de *Poisson*, determinou-se que a taxa média de chegadas é, aproximadamente, 0,161 chegadas por dia e o intervalo de tempo entre chegadas, inverso de λ , é de 6,21 dias. Assim, a probabilidade de não ocorrer nenhuma

chegada num dia específico no Porto de Leixões para a companhia de transporte em análise é de aproximadamente 85,1%. Este valor foi obtido pela aplicação da Equação 1 na ferramenta *Excel*, sendo que k representa o número de chegadas num dia.

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad k = 0, 1, 2 \dots \quad (1)$$

Substituindo os valores para $k = 0$, tem-se que:

$$P(X = 0) = \frac{0,161^0 e^{-0,161}}{0!}$$

Resultado de $P(X = 0)$:

$$P(X = 0) = \frac{e^{-0,161}}{1} \approx 0,851$$

Existe uma elevada probabilidade de se ficar vários dias seguidos sem nenhuma chegada de navio, refletindo a variabilidade e a dispersão temporal das chegadas ao porto para a companhia de navegação em análise.

Para avaliar o comportamento desta variabilidade e tentar minimizar a incerteza dos pressupostos neste estudo, subdividiu-se os navios em três categorias de acordo com as operações que irá realizar:

- Unicamente descarga de contentores de importação (I)
- Unicamente carga de contentores para exportação (E)
- Carga e descarga de contentores (IE)

Dentro de cada grupo foram contabilizadas as frequências de visitas e o tempo médio de operações, estando organizadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Relação entre a frequência de visitas e tempo de operação dos navios por categoria de operações

Categoria do navio	Número de visitas	Média de dias de operação	Variância
E	1	8	N/D
I	19	2,37	6,58
IE	55	2,15	0,46
Total Geral	75	2,28	

Pela observação da Tabela 4, estipulou-se que os dados da categoria "E" seriam excluídos na comparação das médias entre os grupos devido à presença de apenas uma

observação nessa categoria, o que inviabiliza uma comparação significativa com as demais. O foco da análise no teste de hipóteses recaiu sobre as categorias que apresentam um número razoável de observações para uma comparação estatisticamente válida.

Os dados das categorias "I" e "IE" foram, portanto, considerados no Teste t de *Student* para verificar se existia uma diferença significativa entre as médias do tempo de operação por navio desses dois conjuntos de dados, uma vez que um dos grupos tinha menos de 30 observações. As hipóteses definem-se como:

H0: Não há diferença significativa entre as médias dos tempos de operação dos navios (em dias) que realizam unicamente a descarga de contentores de importação (categoria I) e os navios que realizam tanto a carga quanto a descarga de contentores (categoria IE).

H1: Existe uma diferença significativa entre as médias dos tempos de operação dos navios que realizam unicamente a descarga de contentores de importação (categoria I) e os navios que realizam tanto a carga quanto a descarga de contentores (categoria IE).

A variância de cada grupo identificada na Tabela 4 sugere que, uma vez que o conjunto I apresenta maior nível de variância, alguns elementos ao contribuir mais para a variação do grupo, poderiam estar a influenciar o teste de hipótese anterior.

Nestas condições, verificou-se que uma observação específica, o Navio HLSP com 11 dias de operação, exclusivamente de descarga, era definido como um *outlier* para o teste de hipóteses devido ao seu tempo de operação ter sido afetado por um evento extraordinário (greves dos pilotos do Porto de Leixões). Para além deste navio, foram removidos os restantes *outliers*.

Pela análise da Tabela 5 obtida no SPSS, observa-se que para o Teste de *Levene's* o valor de *p-value* é 0,361, sendo superior a 0,05, pelo que se deve assumir a igualdade das variâncias entre grupos e analisar a linha superior do teste. Como o valor de *p-value* é inferior a 0,001 rejeita-se a hipótese nula.

Tabela 5 - Independent Samples t.Test entre as médias de dias de operações dos navios

Independent Samples Test											
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
		F	Sig.	t	df	Significance		Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
						One-Sided p	Two-Sided p			Lower	Upper
Dias Operações	Equal variances assumed	.847	.361	-3.732	69	<.001	<.001	-.708	.190	-1.086	-.330
	Equal variances not assumed			-3.891	26.028	<.001	<.001	-.708	.182	-1.082	-.334

Existe uma diferença significativa no tempo de operação entre os navios que se dedicam exclusivamente à descarga de contentores e aqueles que realizam simultaneamente operações de carga e descarga.

O tempo de operações de um navio atracado no terminal está dependente da quantidade carga (número de contentores) que é movimentada entre o navio e o terminal por via de gruas. A Tabela 6 apresenta, na unidade universal TEU, a quantidade média de carga transacionada para cada uma das diferentes categorias de navios.

Tabela 6 - Quantidade média de TEUS transacionados em média por categoria de operações realizados no navio

Categoria do navio	TEUS cheios para E (Carga)	TEUS vazios para E (Carga)	TEUS cheios para I (Descarga)	TEUS vazios para I (Descarga)
E	159	0	0	0
I	0	0	90,4	0
IE	231,3	52,5	209,6	0
Total Geral	171,8	38,5	176,6	0

Pela análise da Tabela 6 verifica-se que a companhia de navegação *CNM* não descarregou contentores vazios de nenhum navio no Porto de Leixões para o período em análise. A política da empresa não permite a reposição de *stock* de contentores vazios I no Porto de Leixões. Pelos dados recolhidos e contexto geográfico e económico de Portugal, a *CNM* está inserida num ambiente que importa maior quantidade do que aquela que exporta e, por isso, não se torna vantajoso o custo de reposição que envolve a movimentação do contentor vazio desde o porto de T/S para o POL (*Port of Loading*) em análise. Verifica-se que o fluxo de contentores com mercadoria é maior na descarga comparativamente à carga e que a categoria de navio que transaciona maior quantidade de TEUS é a “IE”, a qual será o foco do presente estudo.

Os contentores são enviados vazios para o terminal de Rotterdam quando não existe quantidade de contentores de exportação suficientes para cumprir o *allocation* reservado

junto do armador do navio. O *allocation* em cada navio é estipulado por via de um contrato que define um valor padrão de TEUS transportados pela companhia *CNM* nos navios num determinado intervalo de tempo. Independentemente da carga que vai carregar, a empresa tem de pagar sempre o espaço fixo e, em situações de falta de contentores cheios de exportação, opta por enviar contentores vazios no navio para serem utilizados noutros portos de interesse da cadeia logística marítima. O *allocation* contratual dos *feeders* na janela temporal do período em estudo, era de 365 TEUS por navio. O espaço para a companhia engloba a carga que sai de Leixões e Lisboa. Verificou-se que Leixões é, em média, responsável por carregar cerca de 57,6% do *allocation* de cada navio, que se traduz em 210 TEUS aproximadamente.

De acordo com a Tabela 6 a companhia *CNM*, em média, expede 81,7% de contentores cheios (172 TEUS) e 18,3% de contentores vazios (38 TEUS) do *allocation* de Leixões. A carga de importação média descarregada é de 177 TEUS com um desvio padrão de, aproximadamente, 91 TEUS.

A companhia *CNM*, em 2023, descarregou 6498 contentores. A frequência de chegadas por tipologia é descrita pelo gráfico da Figura 18 de forma absoluta pelas barras azuis e percentual pela linha de cor laranja.

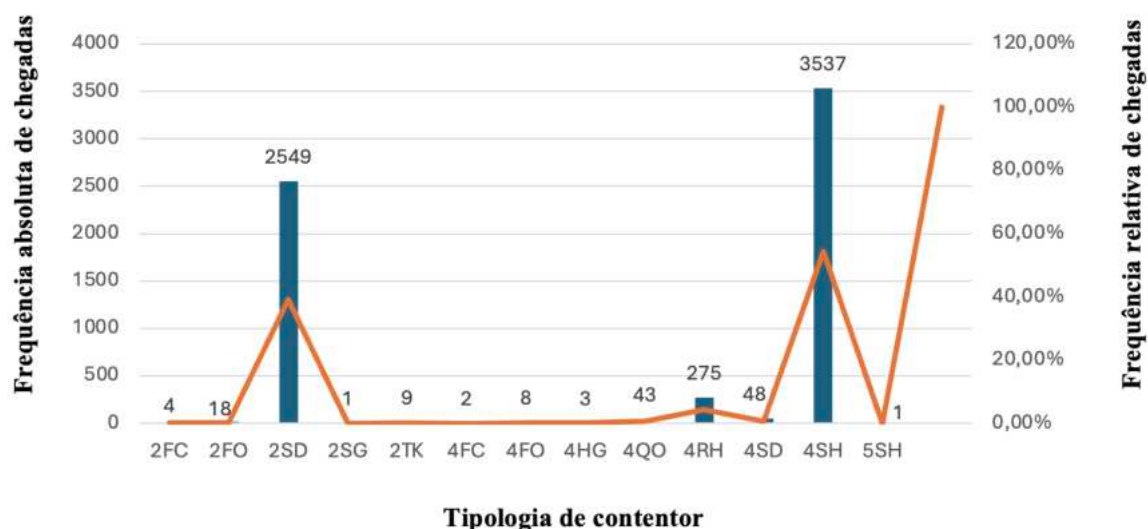


Figura 18 - Frequência de chegadas por tipologia de contentor no ano de 2023

Observa-se que no Porto de Leixões a tipologia da companhia que é importada com maior frequência são contentores de quarenta pés do tipo *Hi-cube*, representando 54,43% do total da amostra, seguida por 39,23% para a tipologia vinte pés *Dry*. As tipologias de

dimensão vinte representam cerca de 40% do total de contentores que descarregaram no ano de 2023 a Leixões.

A Tabela 7 apresenta, para uma amostra de dez navios aleatórios, o intervalo médio de carga e descarga de contentores. Foram considerados apenas dez navios da amostra devido à limitação de acesso aos dados, imposta pela empresa em estudo. O tempo médio, em minutos, que um contentor é carregado no navio foi calculado pelo rácio do total de tempo de operação de carga com a quantidade total de contentores alocados a essa chamada. O mesmo procedimento foi efetuado no cálculo do tempo médio de descarga de um contentor da companhia *CNM* no Porto de Leixões aquando da chegada de um navio. O intervalo médio de operações representa o tempo médio que um contentor é transacionado entre o navio e o terminal, podendo ser de importação ou de exportação. O conjunto dos dez valores individuais serão utilizados para definir a capacidade das *Quay Cranes* do TCL.

Na Tabela 8 observa-se, para o mesmo conjunto de chamadas, as atividades de levante de contentores de Importação (saída do porto) e entrega de contentores para Exportação (entrada no porto). Estas informações permitirão estipular uma frequência média de entradas e saídas do Porto de Leixões.

Tabela 7 - Intervalo de tempo médio das operações de carga e descarga

Viagem	DESCARGA DO NAVIO - FV				CARGA DO NAVIO - FF				Intervalo Médio de Operações	
	Quantidade	Tempo Início	Tempo de Fim	Tempo Total (Min)	Intervalo Médio	Quantidade	Tempo Início	Tempo de Fim		Tempo Total (Min)
GRON24	134	20230623 08:28	20230623 23:02	874	6,52	37	20230623 15:50	20230624 02:18	628	16,97
GRON45	195	20231128 08:44	20231129 22:36	2272	11,65	58	20231129 10:45	20231130 10:55	1450	25,00
XPSG48	163	20231211 08:33	20231211 17:53	560	3,44	135	20231211 08:26	20231211 18:15	589	4,36
ATLA33	69	20230828 11:38	20230828 19:09	451	6,54	131	20230828 17:52	20230829 00:28	396	3,02
XPAG25	108	20230704 10:01	20230705 02:25	984	9,11	93	20230704 17:08	20230705 11:22	1094	11,76
ESNC15	82	20230420 08:57	20230420 19:03	606	7,39	80	20230420 09:09	20230420 22:23	794	9,93
XPAG27	135	20230716 08:31	20230716 18:17	586	4,34	112	20230716 10:50	20230716 19:48	538	4,80
GRON37	165	20230919 21:21	20230920 10:58	817	4,95	57	20230920 02:59	20230920 10:04	425	7,46
GRON41	156	20231018 10:43	20231018 18:01	438	2,81	75	20231018 13:34	20231018 22:50	556	7,41
ESNC23	119	20230617 21:11	20230618 11:44	873	7,34	75	20230618 13:21	20230618 19:40	379	5,05

Tabela 8 - Intervalo médio de tempo do levante e entrega de contentores no Porto de Leixões

Viagem	Levante do Contentor em Terminal - FU					Entrega do Contentor em Terminal - EL				
	Quantidade	Tempo Início	Tempo de Fim	Tempo Total (Min)	Intervalo Médio	Quantidade	Tempo Início	Tempo de Fim	Tempo Total (Min)	Intervalo Médio
GRON24	134	20230623 12:55	20230726 17:50	47815	356,83	37	20230616 08:30	20230621 15:37	7627	206,14
GRON45	187	20231128 17:23	20231212 16:47	20124	107,61	58	20231121 10:50	20231124 21:08	4938	85,14
XPSG48	155	20231211 09:59	20231219 16:42	11923	76,92	135	20231123 19:01	20231206 18:36	18695	138,48
ATLA33	69	20230829 11:31	20230921 13:49	33258	482,00	131	20230821 16:52	20230828 08:06	9554	72,93
XPAG25	108	20230704 14:56	20230713 19:34	13238	122,57	93	20230623 16:57	20230630 16:22	10045	108,01
ESNC15	82	20230420 16:36	20230428 10:38	11162	136,12	80	20230411 09:46	20230419 19:40	12114	151,42
XPAG27	132	20230717 16:29	20230801 17:41	21672	164,18	112	20230706 21:18	20230714 16:47	11249	100,44
GRON37	164	20230920 09:17	20231108 15:33	70936	432,54	57	20230911 17:05	20230919 10:15	11110	194,91
GRON41	155	20231018 17:47	20231102 15:59	21492	138,66	75	20231010 11:41	20231016 08:27	8446	112,61
ESNC23	119	20230619 12:11	20230724 11:21	50350	423,11	75	20230606 09:46	20230612 15:04	8958	119,44

A diferença que se verifica, em alguns navios, entre a quantidade que é descarregada do navio e a que é levantada do terminal, ocorre porque alguns clientes da *CNM* optam por fazer a desconsolidação da carga dos contentores dentro do terminal e transferi-la para camiões de lona. Os contentores como não saem efetivamente do terminal, acabam por não ter influência direta no intervalo de tempo médio de levante e representam aproximadamente 1,6% da amostra selecionada.

Em média, os intervalos médios das operações estão em torno de 5,49 minutos, com um desvio padrão de 2,90 minutos, utilizando-se dois guindastes de cais. A tabela abaixo apresenta a confirmação dos parâmetros anteriores, obtida pela ferramenta da estatística descritiva (“*Descriptive Statistics*”) do *Excel* para os contentores que são transacionados entre o navio e os camiões do terminal com recurso às gruas do terminal.

Tabela 9 - Tempo médio, em minutos, de movimentação de contentores em terminal

Tempo médio de movimentação de cada contentor em terminal	
<i>Mean</i>	5,49
<i>Standard Error</i>	0,92
<i>Median</i>	5
<i>Mode</i>	#N/D
<i>Standard Deviation</i>	2,90
<i>Sample Variance</i>	8,38
<i>Kurtosis</i>	1,72
<i>Skewness</i>	1,13
<i>Range</i>	10
<i>Minimum</i>	2
<i>Maximum</i>	12
<i>Sum</i>	55
<i>Count</i>	10
<i>Confidence Level(95,0%)</i>	2,07

Para definir o tempo de espera dos contentores em terminal e o tempo de posse dos contentores pelos clientes de Importação e Exportação, observaram-se as entradas e saídas do TCL e do parque externo no ano de 2023. Na definição destes parâmetros utilizar-se-á a ferramenta SPSS de análise e tratamento de dados.

O processo de levante de contentores de Importação em *Yard Area* da amostra caracteriza-se por ter 5 861 observações cujo tempo médio entre saídas do terminal é de, aproximadamente, 23,82 minutos. A Figura 19 apresenta o histograma das saídas e pode-

se observar que existe uma elevada concentração de dados à esquerda (tempos de levante menores possuem frequências mais elevadas), que sugere a existência de *outliers*.

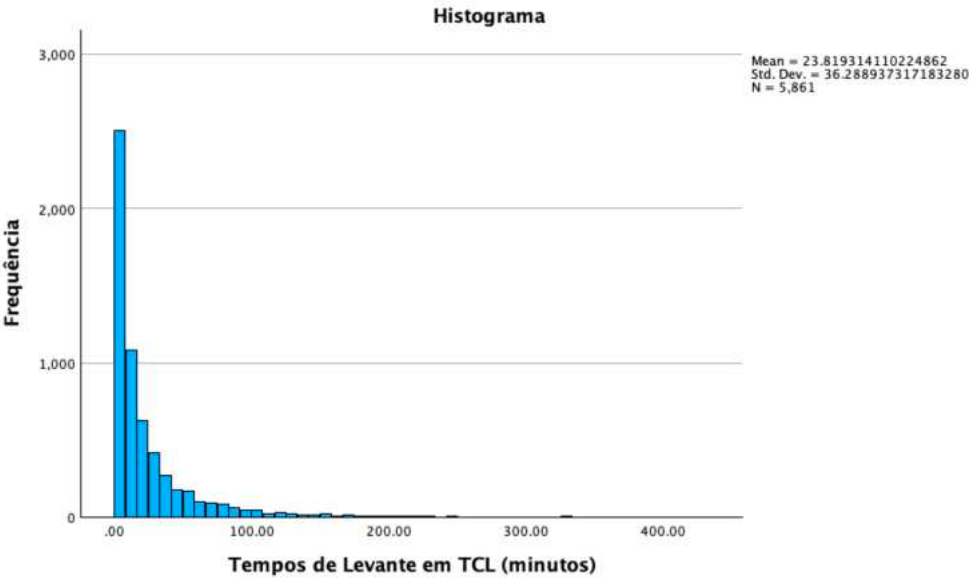


Figura 19 - Histograma das saídas de contentores de importação do Yard

A validação de existência de *outliers* é efetuada pela análise do Boxplot obtido pelo SPSS constante da Figura 20.

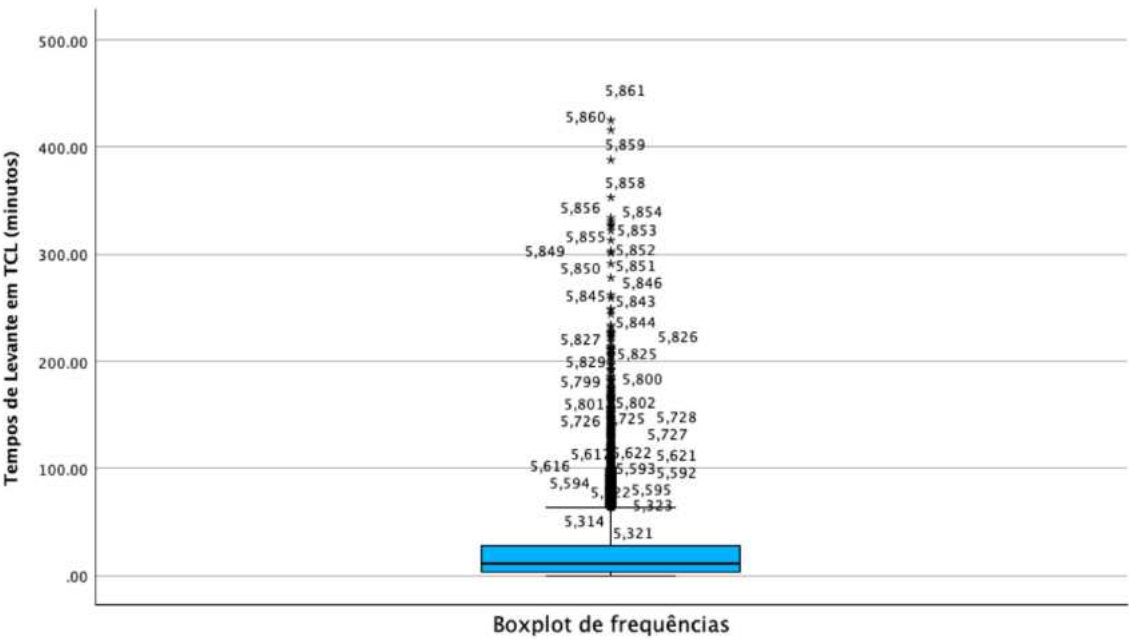


Figura 20 - Boxplot de levantes da importação

A normalidade dos dados também não se verifica com a existência de *outliers*. Isto observa-se pela reduzida proximidade dos pontos em torno da reta de distribuição normal da Figura 21.

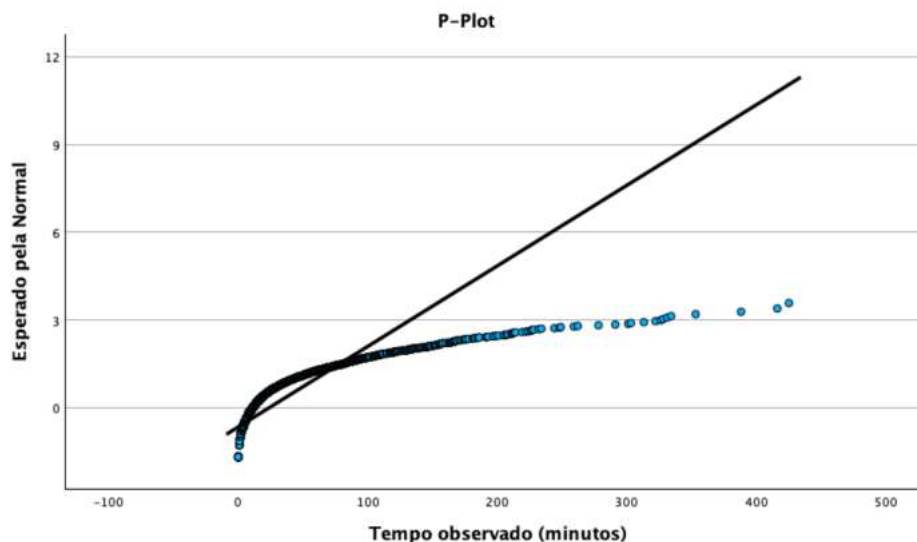


Figura 21 - Normalidade de 5 861 levantes da importação

A remoção de 599 observações cujo $T > 60$ minutos, permitiu validar uma aproximação dos dados à reta normal da Figura 22 e determinar o tempo médio entre saídas do *Yard* a cargo do cliente da importação.

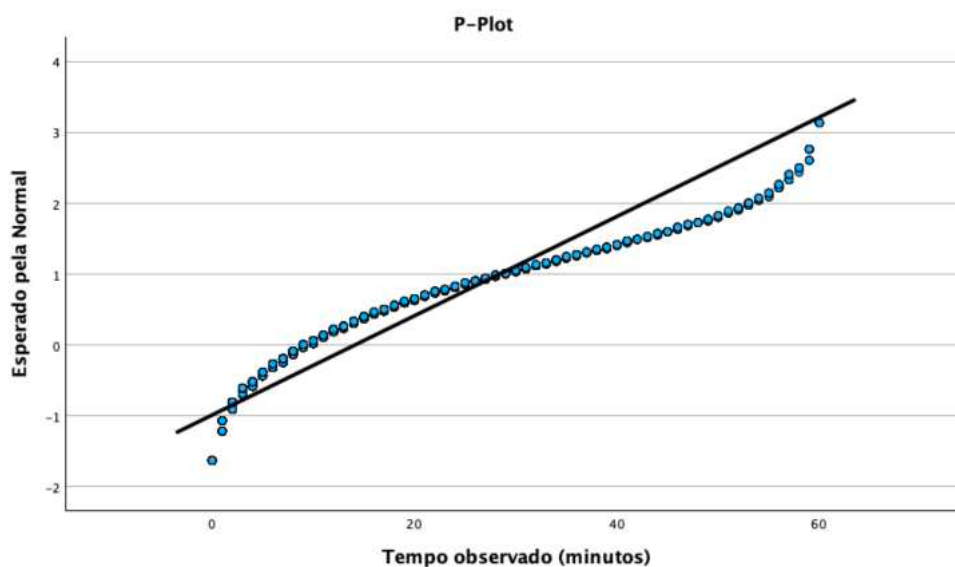


Figura 22 - Normalidade de 5 262 levantes da importação

A análise descritiva, encontrada no SPSS, permitiu perceber que existe um contentor cheio a sair do *Yard* a cada 14,07 minutos, aproximadamente, a partir dos dados apresentados na Figura 23.

Sumário			
		Casos	
		Válidos	
Tempo entre levantes TCL		5262	

Descritiva			
		Statistic	Std. Error
Tempo entre levantes TCL	Mean	14.0712657	.196850309
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	13.6853574
		Upper Bound	14.4571740
	5% Trimmed Mean	12.7100807	
	Median	9.00000000	
	Variance	203.903	
	Std. Deviation	14.2794514	
	Minimum	.00000000	
	Maximum	60.0000000	
	Range	60.0000000	
	Interquartile Range	17.2500000	
	Skewness	1.279	.034
	Kurtosis	.920	.068

Figura 23 - Estatística descritiva em SPSS dos levantes de contentores da importação

Para estabelecer a taxa de saída das *gates* do *Yard* de Leixões, alinhado com a análise descritiva anterior, calculou-se o intervalo de confiança a partir da *Descriptive Statistics* do *Excel* e determinou-se que o valor do parâmetro será de $14,07 \pm 0,39$ minutos. Esta informação está detalhada na Tabela 10.

Tabela 10 - Estatística descritiva do tempo, em minutos, entre saídas de contentores da importação nas gates do terminal

Tempos entre saídas das gates do terminal	
Mean	14,07
Standard Error	0,20
Median	9
Mode	0
Standard Deviation	14,28
Sample Variance	203,90
Kurtosis	0,92
Skewness	1,28
Range	60
Minimum	0
Maximum	60
Sum	74043
Count	5262
Confidence Level(95,0%)	0,39

Na análise dos tempos de posse, em minutos, dos contentores pelos clientes de Importação no Porto de Leixões, considerou-se duas modalidades de entrega: diretamente no terminal ou no parque externo. Como se pode observar na Tabela 11, cada grupo apresenta mais de 30 observações logo, de acordo com o Teorema de Limite Central, presumiu-se que as distribuições tendem para a normalidade.

Tabela 11 - Estatística descritiva em SPSS das modalidades de entrega de vazios da importação

	Descritiva				
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Tempo de entrega do contentor vazio em TCL	957	29.00000000	24316.0000	1711.45873	2488.27721
Tempo de entrega do contentor vazio em Parque	4052	5.00000000	149165.000	2069.54911	3908.50351
N Válidos	957				

Nos tempos desde que o cliente da importação levanta o contentor cheio do *Yard* e o devolve vazio no TCL, verificou-se este pressuposto. A Figura 24, mostra que as entregas ocorrem ao longo de três dias após o momento de levantar. Cada grupo de cor representa uma classe do total de dias. O azul os levantes e entregas efetuados no próprio dia, a vermelho a entrega que ocorre no dia seguinte ao levantar e, por fim, a verde corresponde à classe de 3 dias de posse. Salienta-se que o período permitido à entrega em terminal é de

15 horas por dia. Para estes três grupos da amostra, verifica-se pela análise do histograma a tendência para a normalidade dos dados.

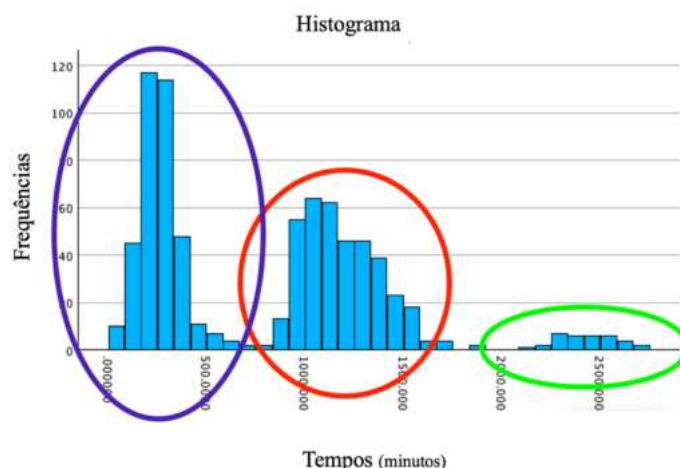


Figura 24 - Histograma dos tempos, em minutos, de entrega de contentores vazios da importação no terminal

No ano de 2023, para o total de 6498 contentores que foram transacionados no Porto de Leixões, foram considerados 5009 contentores devido à existência de inconsistências nos dados do Sistema de Informação que impediram a análise da totalidade da amostra. Desses, 957 (n_1) foram entregues vazios diretamente no terminal, enquanto os restantes 4052 (n_2) foram entregues no parque externo antes de serem devolvidos cheios ao terminal.

A Tabela 12 apresenta, para cada amostra independente, de tamanho n_1 e n_2 , os parâmetros da estatística descritiva.

Tabela 12 - Estatística descritiva dos tempos de posse, em minutos, da importação na entrega de contentores vazios em parque ou em terminal

Tempos de contentores entregues terminal		Tempos de contentores entregues em parque	
Mean	1711,46	Mean	2069,55
Standard Error	80,43	Standard Error	61,40
Median	1062	Median	1197
Mode	179	Mode	337
Standard Deviation	2488,28	Standard Deviation	3908,50
Sample Variance	6191523,50	Sample Variance	15276399,71
Kurtosis	27,57	Kurtosis	627,35
Skewness	4,39	Skewness	19,63
Range	24287	Range	149160
Minimum	29	Minimum	5
Maximum	24316	Maximum	149165
Sum	1637866	Sum	8385813
Count	957	Count	4052
Confidence Level(95,0%)	157,85	Confidence Level(95,0%)	120,38

Os contentores entregues vazios diretamente no terminal, têm uma média do tempo de posse ($\bar{x}_1$) de 1711,46 minutos, com um desvio-padrão (s_1) de 2488,28 minutos e um nível de confiança de 157,85 minutos. No caso dos 4052 contentores que são entregues no parque externo pelos clientes de importação, o tempo médio de posse ($\bar{x}_2$) é de 2069,55 minutos, com um desvio-padrão (s_2) de 3908,50 minutos e nível de confiança de 120,38 minutos.

Para investigar se há evidência estatística de que as médias dos tempos de posse dos contentores são iguais nas duas modalidades de entrega, diretamente no terminal ou ao parque externo, será aplicado o Teste Z para duas amostras independentes, com variância da população desconhecida, para verificar se existe uma diferença significativa nos tempos médios de posse entre a amostra de cada grupo para um nível de significância de 0,05. Este teste é mais adequado do que o Teste T porque cada grupo possui mais de 30 observações.

As hipóteses em estudo podem ser definidas como:

H0: Não há diferença significativa nos tempos médios de posse entre os contentores entregues diretamente no terminal e aqueles entregues num parque externo:

$$(\mu_1 - \mu_2) = 0$$

H1: Existe uma diferença significativa nos tempos médios de posse entre os dois cenários.

$$(\mu_1 - \mu_2) \neq 0$$

No cálculo do Teste Z para duas amostras independentes com variâncias desconhecidas, calcula-se a estatística de teste através da fórmula apresentada na Equação 2.

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

Substituindo os valores, tem-se que:

$$Z = \frac{(1711,46 - 2069,55) - 0}{\sqrt{\frac{2488,28^2}{957} + \frac{3908,50^2}{4052}}}$$

Resultado de Z:

$$Z = \frac{-358,09}{101,19} \approx -3,53$$

Usando um teste bilateral, no qual as hipóteses fornecidas visam detetar qualquer diferença significativa entre os dois grupos (tanto se a média de um grupo é maior quanto

se é menor que a média do outro grupo), os resultados do Teste Z indicam uma diferença estatisticamente significativa nos tempos médios de posse de contentores entre os métodos de entrega diretamente no terminal ou no parque externo.

O valor crítico para um teste bilateral ao nível de significância de 0,05 é, aproximadamente, 1,96. Obtém-se pelo cálculo $INV.NORMAL(0,975;0;1)$, em que 0 corresponde à média e o desvio padrão é 1. Como $|Z| > Z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$, no qual a parte direita da inequação corresponde ao valor crítico e a esquerda ao valor da estatística de teste, o valor situa-se na região de rejeição da hipótese nula e, consequentemente, rejeita-se a hipótese nula.

Este resultado implica que o método de entrega dos contentores vazios após desconsolidação pode ter um impacto significativo nos tempos de posse, com implicações importantes para a logística e eficiência operacional do terminal, destacando-se a necessidade de considerar para os dois métodos de entrega, diferentes tempos nos processos operacionais de desconsolidação de contentores.

O tempo médio de posse para consolidar carga de Exportação será calculado considerando o processo desde o levantar do contentor vazio do parque até à entrega do contentor cheio na gate do terminal. Para este caso, uma vez que existiram contentores danificados que não foram reparados localmente devido a custos elevados ou transferências excecionais de vazios para TCL com o objetivo de cumprir o *allocation* contratual, analisou-se um subconjunto de 4473 contentores das 6498 observações disponíveis em 2023.

Os dados revelaram que o tempo médio de posse para os contentores vazios, desde o levantar do parque até à entrega do contentor cheio na gate do terminal, foi de aproximadamente 2582,46 minutos, com um desvio-padrão de 4697,41 minutos e nível de confiança de 137,7 minutos. A Tabela 13 mostra a análise descritiva para esta amostra.

Tabela 13 - Estatística descritiva dos tempos de posse, em minutos, da exportação na entrega de contentores cheios em terminal

Tempo de posse na exportação	
Mean	2582,46
Standard Error	70,24
Median	969
Mode	22440
Standard Deviation	4697,41
Sample Variance	22065700,10
Kurtosis	9,79
Skewness	3,01
Range	31499
Minimum	2
Maximum	31501
Sum	11551334
Count	4473
Confidence Level(95,0%)	137,70

A quantidade de contentores cheios de exportação é calculada pela diferença da quantidade já entregue em *Yard Area* no dia anterior à chegada do navio comparativamente ao *allocation* de Exportação. Atualmente, a companhia *CNM* permite que se exceda a capacidade de TEUS máximos por navio caso se tenha contentores em TCL prontos para expedição. Se o nível em armazenagem do terminal for inferior ao *allocation*, o número de vazios carregados será apenas o suficiente para cumprir o *target* dos 210 TEUS.

3.1.3. Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo atual

A partir da informação recolhida e tratada, definiu-se o mapa conceptual da Figura 25 que representa a situação atual do ciclo operacional no norte de Portugal e descreve os principais parâmetros a considerar ao longo do estudo. Uma consideração relevante estabelecida, prende-se com a definição da quantidade da frota de veículos de cada interveniente do sistema, que poderá ser ajustada pelo autor do estudo ou pelo futuro utilizador da simulação, tomando como valor padrão 20 camiões/*stakeholder* baseado na experiência e conhecimento dos colaboradores da empresa em estudo sobre a dimensão das frotas utilizadas.

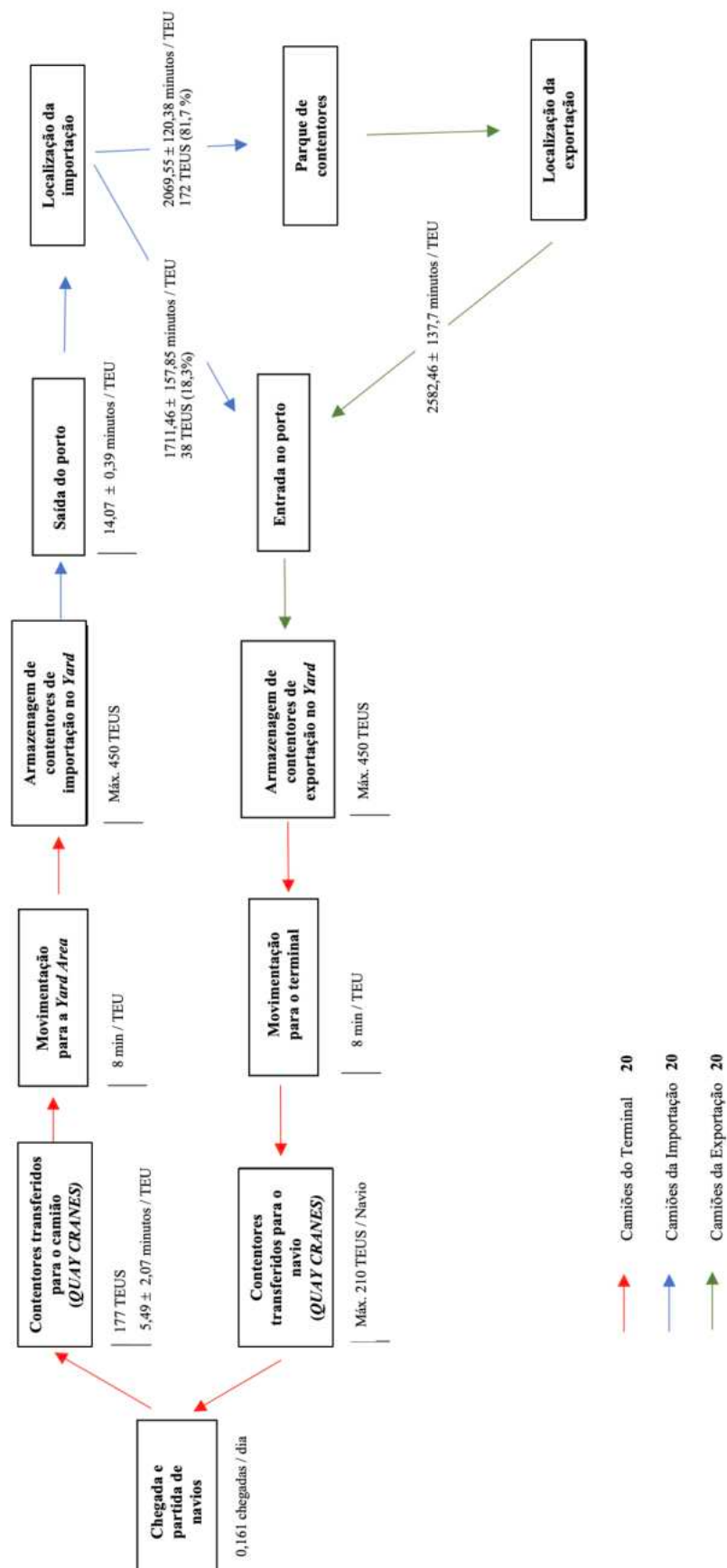


Figura 25 - Modelo conceptual do sistema atual de transporte marítimo no norte de Portugal

3.1.4. Parametrização da simulação da situação atual

Para analisar a situação atual do sistema em estudo, utilizou-se a ferramenta *AnyLogic*, que se trata de uma plataforma de simulação que combina três metodologias: simulação baseada em agentes, dinâmica de sistemas e simulação de eventos discretos para sistemas complexos de maneira detalhada e precisa.

A interface gráfica do *AnyLogic* facilita a criação de modelos através de fluxogramas e diagramas, o que torna o processo mais intuitivo. Além disso, a ferramenta pode ser estendida com programação em Java, aumentando a sua flexibilidade e aplicabilidade. Neste trabalho, a simulação em *AnyLogic* será utilizada para entender o comportamento do sistema, identificar pontos críticos e avaliar diferentes cenários, avaliando propostas de melhorias fundamentadas para dados concretos e contribuindo para a otimização do sistema em estudo.

As variáveis consideradas na simulação, respectivos valores e unidades de grandeza estão sumariadas na Tabela 14 de acordo com o modelo conceptual da Figura 17. Foram definidas algumas considerações a nível do tempo operacional das *stackers* que é desconhecido pelo que se utilizará a mesma capacidade média das *Quay Cranes* e também que todos os contentores da simulação representarão apenas um TEU pelo que, nas unidades de 40 pés, se dividiu os valores obtidos dos tempos para metade por forma a uniformizar corretamente os dados.

Tabela 14 - Variáveis de simulação do sistema atual

Variável	Unidade	Valor
Taxa de Chegada do Navio	Chegadas / Dia	0,161
Capacidade das 2 <i>Quay Cranes</i> (simultâneo)	Minutos / TEU	5,49 ± 2,07
Capacidade das <i>stackers</i> do <i>Yard</i> (simultâneo)	Minutos / TEU	5,49 ± 2,07
Taxa de saída das Gates	Minutos / TEU	14,07 ± 0,39
<i>Allocation</i> de Exportação	TEUS	210
Contentores Cheios de Importação	TEUS / Chegada	177 ± 91,2
Contentores vazios devolvidos pela importação ao terminal	Porcentagem	18,3
Tempo desde levantar e entrega em terminal	Minutos / TEU	1711,46 ± 157,85

Variável	Unidade	Valor
Tempo desde levantar em terminal e entrega em parque	Minutos / TEU	2069,55 ± 120,38
Tempo desde levantar em parque e entrega em terminal	Minutos / TEU	2582,46 ± 137,70

3.2. Sistema proposto de operações

Será explorada uma proposta de melhoria para otimizar as operações e fluxo de contentores do sistema em estudo.

3.2.1. Proposta de melhoria no sistema atual e respetiva parametrização

A companhia *CNM* pretende minimizar o tempo que cada contentor permanece em território terrestre. Os tempos de espera estão fortemente dependentes da disponibilidade dos transportadores da importação ou exportação.

A integração de um centro de desconsolidação com o Porto de Leixões, poderá minimizar este desperdício. Os contentores após serem colocados no local de armazenagem do Terminal passariam a ser movimentados para um local onde a carga seria desconsolidada, armazenada e, mais tarde, recolhida pelos respetivos clientes de importação sob a supervisão e responsabilidade do Porto de Leixões. Relativamente à carga de exportação, que atualmente é movimentada dentro do contentor desde a localização do cliente e o porto, neste novo cenário seria movimentada dentro dos camiões do cliente e, já no centro de desconsolidação, seria colocada dentro dos contentores vazios para exportação.

A principal diferença entre os dois sistemas reside no tempo de posse do contentor que, no segundo caso, estaria totalmente a cargo da direção portuária pois os clientes apenas teriam de se deslocar para carregar, sem necessitarem de levantar e movimentar o contentor vazio de importação em transporte rodoviário ou ferroviário. Para cumprir as normas de qualidade, o centro de desconsolidação teria também de fiscalizar e garantir os requisitos de qualidade, que engloba a lavagem e manutenção dos contentores.

Neste cenário, existem novos parâmetros a serem estabelecidos, como o tempo médio de desconsolidação e consolidação de um contentor, a distância entre o *Yard* do terminal e o centro, o tempo de inspeção e manutenção se aplicável e a capacidade do centro.

3.2.2. Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo proposto

A Figura 26 apresenta a modelação conceptual deste sistema proposto, juntamente com os parâmetros e os seus valores padrão. Aqui, o utilizador poderá estabelecer e ajustar de forma fácil e visual, na janela de simulação do *AnyLogic*, os valores de cada um dos parâmetros.

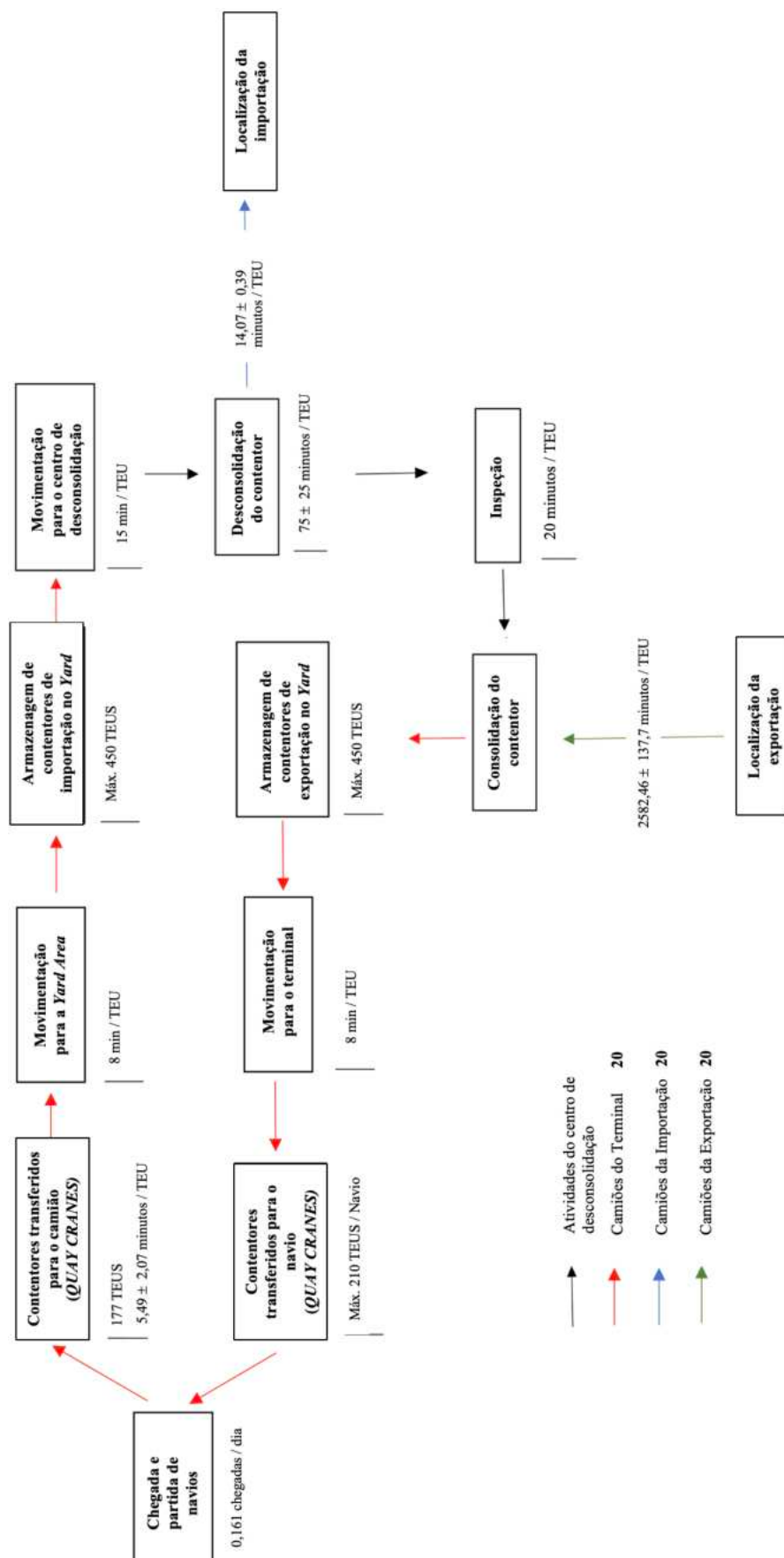


Figura 26 - Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo proposto para o norte de Portugal

3.3. Modelação e simulação em *AnyLogic*

Para realizar a simulação da situação atual e proposta de melhoria no sistema, seguiu-se o processo estruturado descrito na revisão de literatura utilizando a ferramenta *AnyLogic*.

Para cada modelo foram recolhidos e analisados dados em três instantes da simulação: 30, 180 e 466 dias. Esta decisão foi tomada de acordo com o período observacional de dados fornecidos pela companhia com o objetivo de verificar a tendência dos parâmetros em estudo no curto, médio e longo prazo e a fiabilidade da parametrização face aos dados obtidos para o mesmo espaço temporal.

A distribuição utilizada nos tempos de operação será a normal truncada e a codificação em *AnyLogic* é:

normal (double min, double max, double shift, double stretch)

Para cada parâmetro, o tipo de valor e descrição são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros da distribuição uniforme truncada em *AnyLogic*

Nome	Tipo de Valor	Descrição
<i>min</i>	<i>double</i>	Valor mínimo
<i>max</i>	<i>double</i>	Valor máximo
<i>shift</i>	<i>double</i>	Média da distribuição antes de truncar
<i>stretch</i>	<i>double</i>	Desvio padrão da distribuição normal

3.3.1. Modelo físico da situação atual

O primeiro modelo conceptual, representando o sistema atual, inclui vários detalhes importantes para a compreensão do *AnyLogic*, conforme visível na Figura 27. A estrutura de armazenagem do *Yard* é organizada em *racks* de cor azul, proporcionando uma visualização clara da disposição dos itens. Além disso, utiliza-se *attractors* para garantir o posicionamento preciso dos agentes dentro do sistema, simulando fielmente o fluxo de operações. O trajeto que a carga percorre ao longo do percurso também é destacado, pela linha descontínua, permitindo uma análise detalhada dos movimentos e interações no ambiente atual.

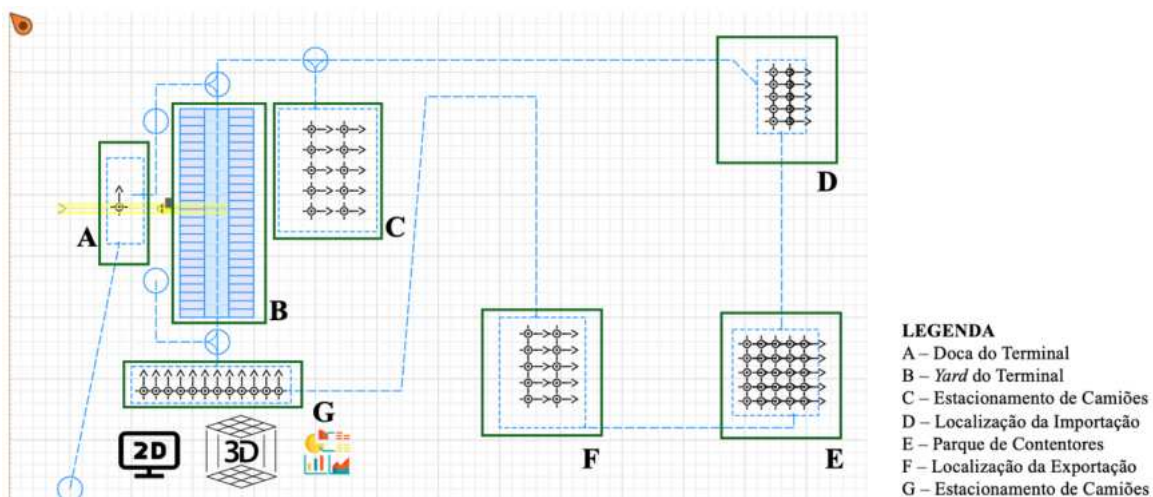


Figura 27 - Modelo Conceptual do Sistema Atual de Transporte Marítimo no Norte de Portugal em AnyLogic

Na segunda etapa, passa-se do modelo conceitual para a construção do modelo físico no *AnyLogic*, que represente a situação atual. Nesta fase, programa-se a simulação detalhando os diferentes eventos, as suas precedências e dependências, envolvendo a tradução dos componentes e interações definidas no modelo conceitual para um ambiente de simulação operável, onde os processos são executados conforme especificado.

O ciclo inicia-se na Zona A que corresponde ao local onde atracam os navios para descarregarem e/ou carregarem os contentores. De seguida, esses contentores são movimentados pelos camiões do terminal para a zona de armazenagem no *Yard*, Zona B.

Os camiões da importação levantam os contentores do *Yard* e prosseguem para a sua desconsolidação no seu armazém, fábrica ou centro, representado pela Zona D. No fim, devolvem os contentores vazios ao parque localizado na Zona E.

Quando os clientes da exportação recebem autorização da companhia CNM, prosseguem com a recolha do contentor vazio do parque e deslocam-no até ao seu centro, armazém ou fábrica para consolidarem a mercadoria (Zona F).

Finalmente, o contentor é transportado para o *Yard* onde aguardará chamada para embarcar no navio.

A configuração do modelo físico da Figura 28 permite que a simulação funcione de maneira realista, refletindo com precisão a dinâmica do sistema atual e possibilitando uma análise aprofundada do desempenho operacional

O tempo médio de posse dos clientes da exportação, a partir dos valores da Tabela 13 na definição de cada parâmetro da Tabela 15, foi codificado em *AnyLogic* conforme apresentado na Figura 29.

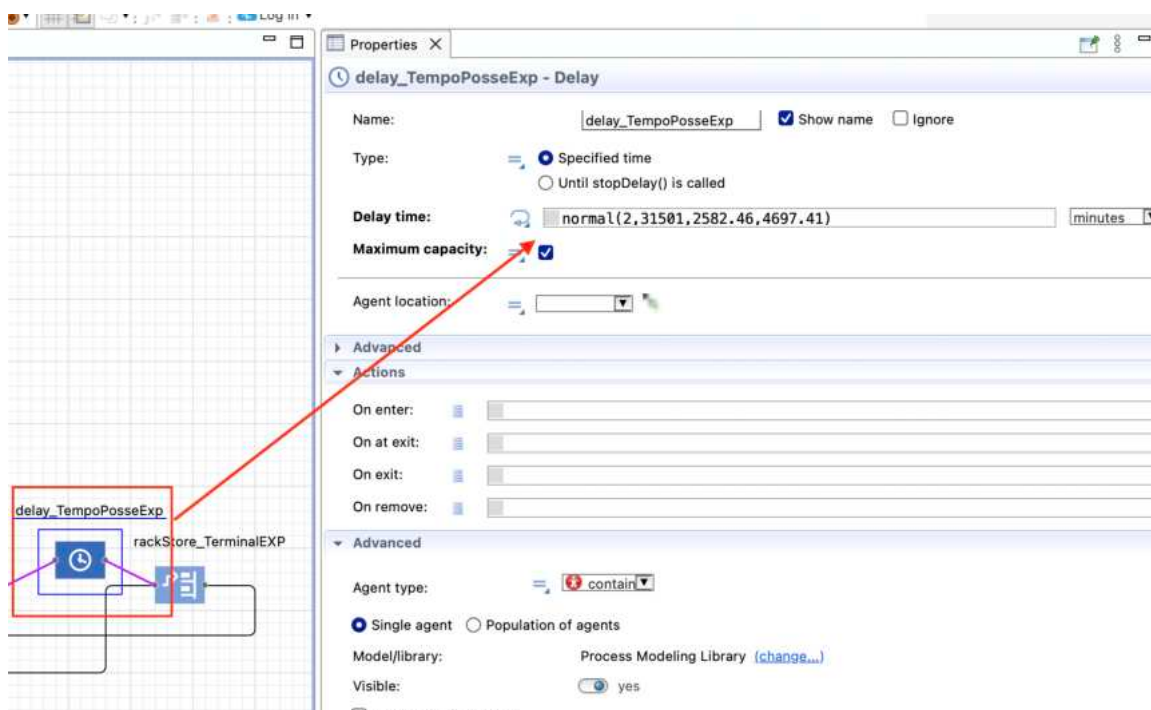


Figura 29 - Codificação em AnyLogic da distribuição normal truncada no tempo de posse da exportação

Para os restantes tempos operacionais como, por exemplo, o tempo de posse de importação quando a entrega do contentor vazio é feita no parque externo, foi aplicada a mesma metodologia de parametrização.

3.3.2. Simulação da situação atual

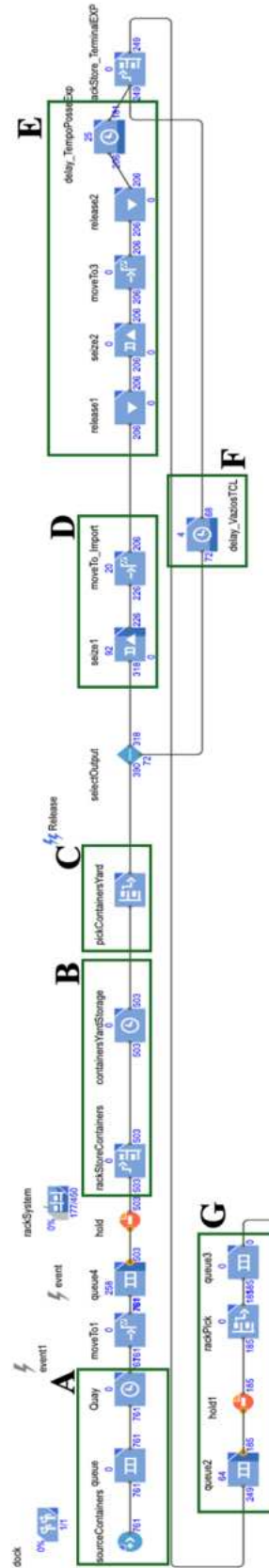
Para o período observacional de 30 dias, verifica-se que chegaram 5 navios que descarregaram 761 contentores de importação. A Tabela 16 apresenta sumariada a análise descritiva dos dados.

Tabela 16 – Desempenho do sistema atual ao longo de 30 dias de simulação

	Entradas no <i>Yard</i>	Levantes de importação	Entregas em Porto	Saídas em navio
Contagem	503	390	249	185
Média	2,605	7,003	$8,384 \text{ E}^{-5}$	14,676

	Entradas no <i>Yard</i>	Levantes de importação	Entregas em Porto	Saídas em navio
Mín	0,002	$2,893 \text{ E}^{-4}$	$7,242 \text{ E}^{-5}$	6,215
Máx	14,205	14,126	$9,279 \text{ E}^{-5}$	24,846
Desvio	4,276	5,636	$4,623 \text{ E}^{-6}$	6,189
Confiança da Média	0,374	0,559	$5,742 \text{ E}^{-7}$	0,892

Observa-se que existem 72 contentores vazios a serem entregues diretamente ao terminal pelos clientes de importação para um total de 390 levantados, dos quais 68 entraram em terminal $t = 30$ dias, respeitando a percentagem de divergência de vazios estabelecida pela companhia nos parâmetros. Os contentores que foram selecionados para a exportação corresponderam a 318 unidades, contudo apenas 181 entraram no terminal. Este facto é verificado pela análise da Tabela 16, que mostra que entraram um total de 249 contentores, mas também pela informação do fluxo de contentores do modelo físico da Figura 30.



LEGENDA

- A – Descarga em terminal dos contentores de importação
- B – Armazenagem em *yard*
- C – Levante de cheios da importação
- D – Entrega de vazios em parque pela importação após visitar a sua localização
- E - Recolha de vazios em parque pela exportação e entrega de cheios em TCL
- F – Entrega de vazios em TCL pela importação
- G – Fila de espera em *yard* para exportação

Figura 30 - Fluxo de contentores da simulação do sistema atual para t=30 dias

O gráfico de barras da Figura 31 destaca os tempos médios, em minutos, de viagem e o tempo total médio de processamento deste processo logístico, identificando as etapas mais demoradas no fluxo operacional.

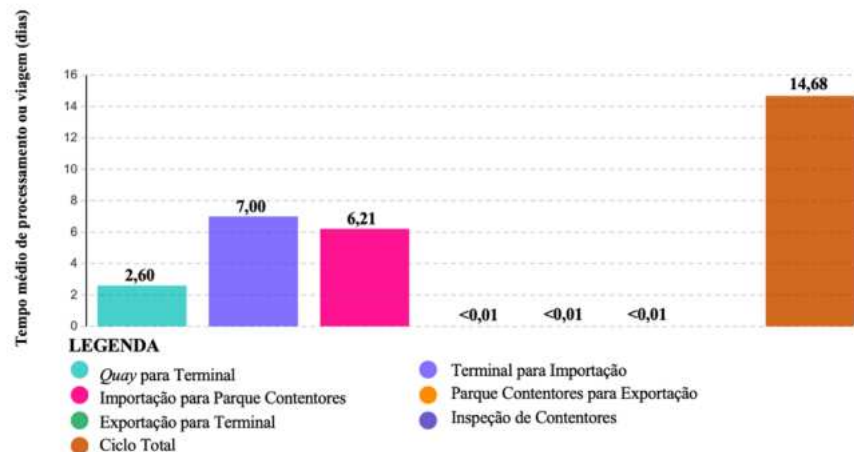


Figura 31 - Médias dos parâmetros simulados ao longo de 30 dias

O modelo físico fornece também informações importantes no sistema e permite a identificação de possíveis desperdícios do sistema. No canto superior esquerdo da Figura 32 existem dados organizados, “*Resource Pool Used*”, que identificam a utilização da capacidade de cada Recurso. Ao fim do trigésimo dia de simulação verifica-se que 99% dos camiões de importação estão a ser utilizados e 5 dos 25 inspetores do parque estão a verificar e atuar em algum contentor.

Aqui, ainda é possível validar ao longo de todo o percurso o total de recursos utilizados ou processados como, por exemplo, que descarregaram 761 contentores no Porto de Leixões (destacado a vermelho) e, desses, 185 contentores já saíram nos cinco navios (destacado a verde).

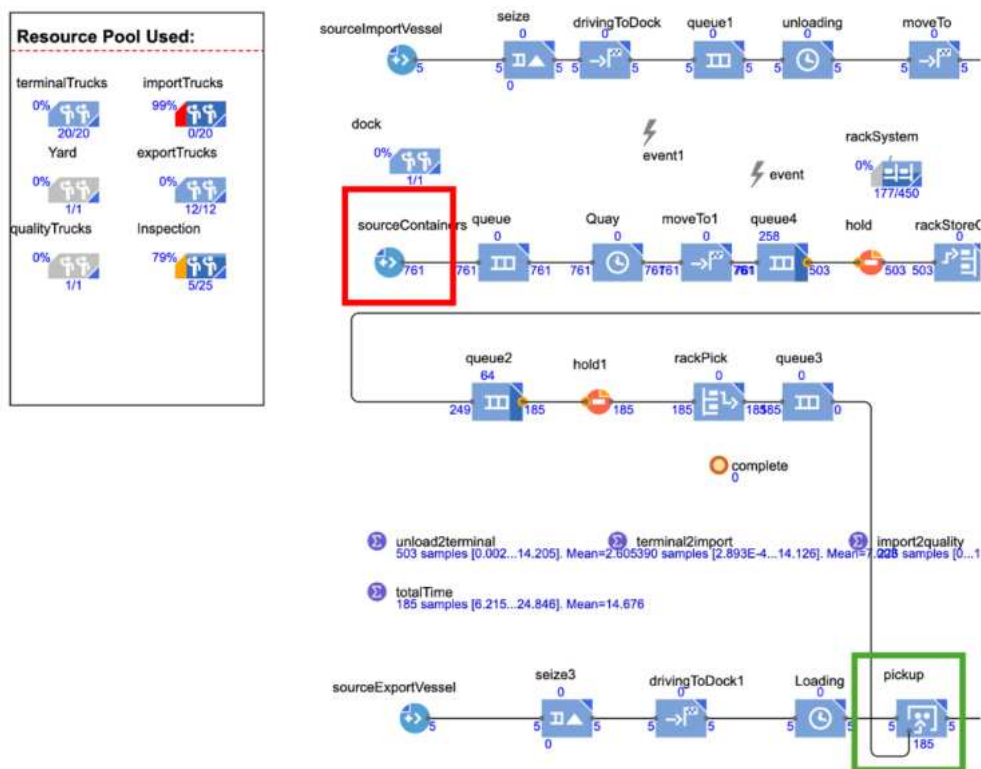


Figura 32 - Modelo físico do sistema atual ao longo de 30 dias de simulação

A complementar a análise de desempenho anterior, apresentam-se abaixo descritos dados adicionais para períodos de 180 dias e 466 dias, mantendo as condições de simulação. A 180 dias de simulação, o sistema atual recebe 5 277 contentores e 29 navios. A Tabela 17 mostra o respetivo desempenho. Neste instante, 1 817 contentores entraram no Porto de Leixões, dos quais 57 aguardavam para embarcar na próxima saída. A Figura 33 mostra o respetivo modelo lógico.

Tabela 17 - Desempenho do sistema atual ao longo de 180 dias de simulação

	Entradas no Yard	Levantes de importação	Entregas em Porto	Saídas em navio
Contagem	1 817	1 703	1 572	1 515
Média	45,935	12,669	8,314 E ⁻⁵	63,677
Mín	0,002	2,893 E ⁻⁴	7,242 E ⁻⁵	6,215
Máx	118,026	17,956	9,279 E ⁻⁵	130,417
Desvio	38,406	4,565	4,687 E ⁻⁶	35,570
Confiança da Média	1,766	0,217	2,317 E ⁻⁷	1,791

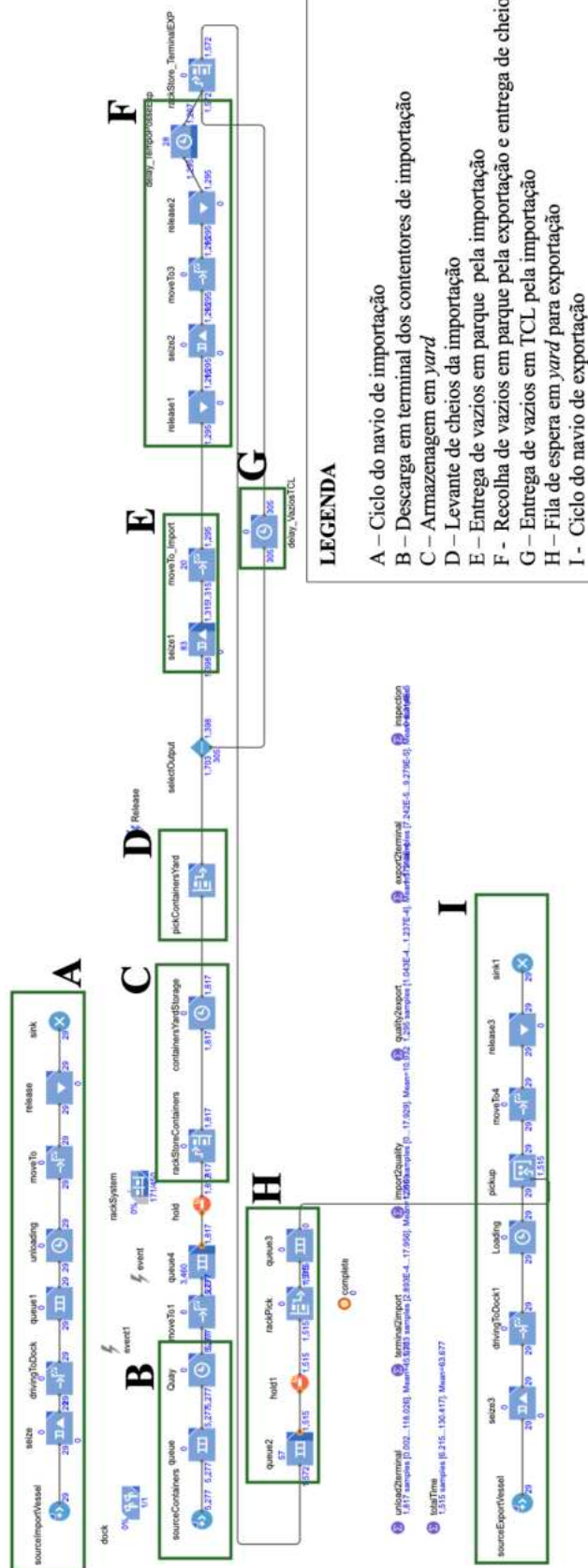


Figura 33 - Modelo físico do sistema atual ao longo de 180 dias de simulação

A Tabela 18 apresenta o valor dos diversos parâmetros para 466 dias observacionais da simulação. Neste período, ocorreram 76 chegadas com um fluxo total de importação de 13 513 contentores.

Tabela 18 - Desempenho do sistema atual ao longo de 466 dias de simulação

	Entradas no Yard	Levantes de importação	Entregas em Porto	Saídas em navio
Contagem	4 391	4 251	4 095	4 091
Média	149,202	13,99	$8,319 \text{ E}^{-5}$	169,611
Mín	0,002	$2,893 \text{ E}^{-4}$	$7,242 \text{ E}^{-5}$	6,215
Máx	322,961	18,575	$9,279 \text{ E}^{-5}$	335,348
Desvio	101,485	3,378	$4,737 \text{ E}^{-6}$	96,895
Confiança da Média	3,002	0,102	$1,451 \text{ E}^{-7}$	2,969

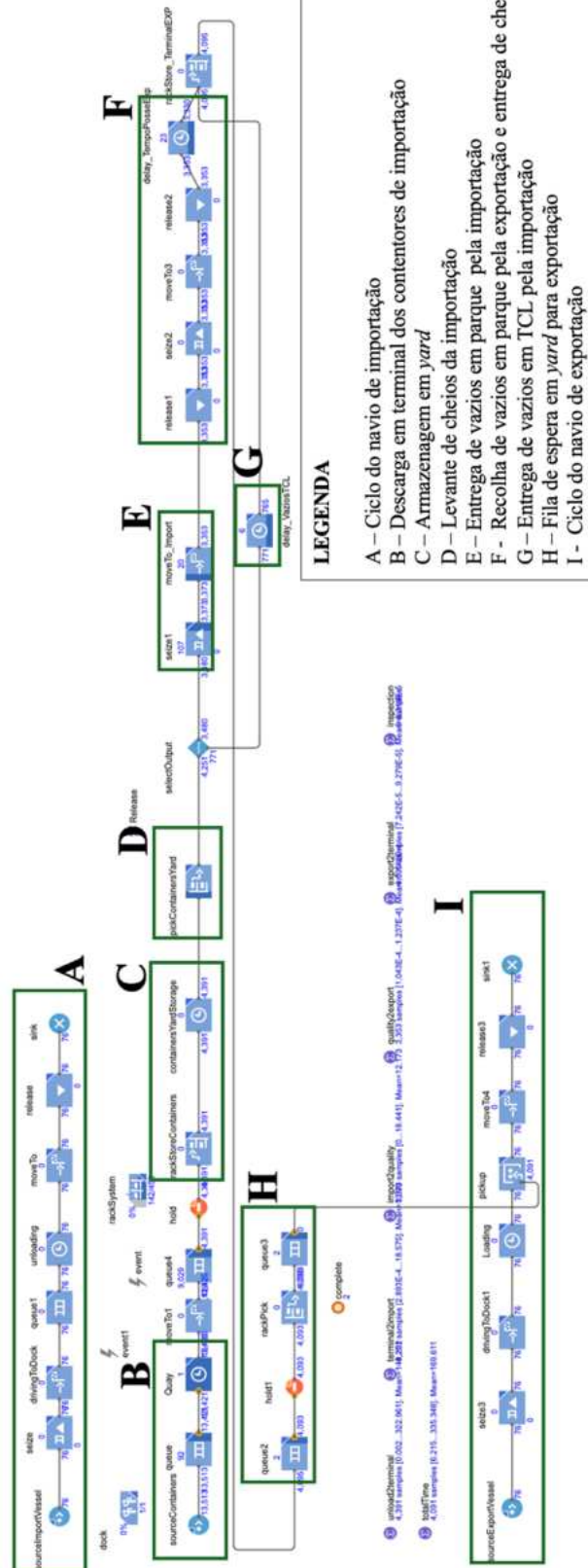


Figura 34 - Modelo físico do sistema atual ao longo de 466 dias de simulação

3.3.3. Modelo físico do sistema proposto

A Figura 35 apresenta o modelo conceptual do sistema proposto, que inclui a implementação de um centro de desconsolidação ou consolidação de carga. Esta adição visa diminuir a distância percorrida pelos clientes e aumentar a disponibilidade dos contentores, reduzindo o tempo que permanecem em território nacional. No novo modelo, o parque de contentores, anteriormente responsável pela interligação entre importação e exportação, já não existe, refletindo uma mudança significativa na estrutura do sistema.

O ciclo inicia-se na Zona A onde atracam os navios para descarregarem e/ou carregarem os contentores e, posteriormente, serão transacionados para a zona de armazenagem no *Yard* (Zona B). Os camiões do terminal posicionarão, mais tarde, os contentores no Centro de Desconsolidação, Zona D, para ser removida a carga e o contentor ficar disponível para a exportação. Os clientes da importação levam a carga no centro e regressam ao seu armazém, fábrica ou centro, representado pela Zona E. Quando os clientes da exportação recebem autorização da companhia *CNM*, prosseguem com a recolha do contentor vazio do centro e deslocam-no até ao seu centro, armazém ou fábrica para consolidarem a mercadoria (Zona F) e o entregarem na zona de armazenagem do terminal. Por fim, o contentor é transportado do *Yard* para o navio *feeder* recorrendo aos camiões do terminal.

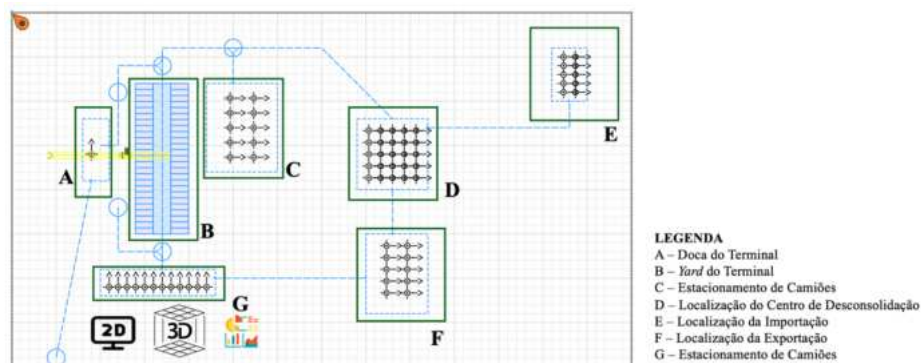


Figura 35 - Modelo conceptual do sistema de transporte marítimo proposto para o norte de Portugal em AnyLogic

A Figura 36 mostra o modelo físico em *AnyLogic* do sistema proposto. Nesta etapa, programou-se os diferentes eventos, precedências e dependências para refletir a introdução do centro de desconsolidação ou consolidação de carga. Com essa mudança a par da eliminação do parque de contentores externo, a simulação detalha o impacto na eficiência operacional e na disponibilidade dos contentores, permitindo uma análise aprofundada do desempenho do novo sistema.

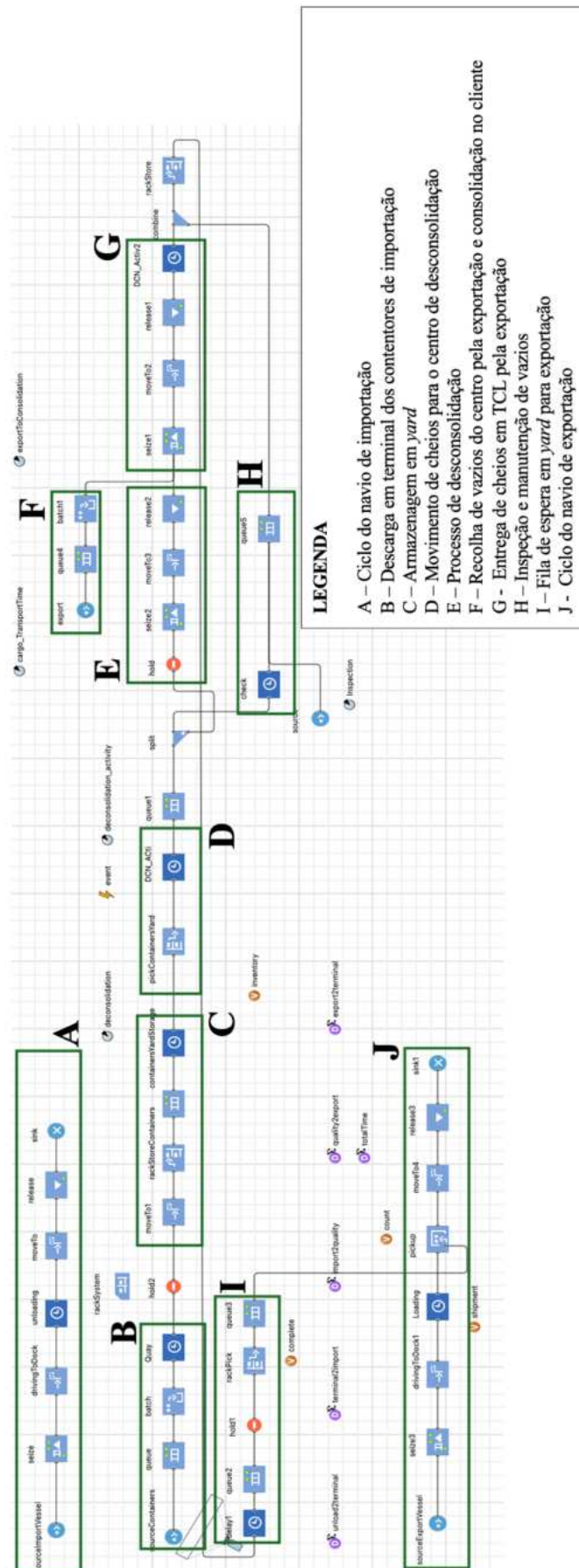


Figura 36 - Modelo físico do sistema de transporte marítimo proposto para o norte de Portugal em AnyLogic

3.3.4. Simulação do sistema proposto

Na simulação do sistema proposto, os valores considerados para os novos parâmetros inerentes à melhoria em estudo devem ser definidos pelo utilizador antes do início da simulação, tal como apresentado na Figura 37. Os parâmetros seccionados foram: tempo de movimentação de um contentor entre o *Yard* e o Centro de Desconsolidação, tempo para desconsolidar um contentor, tempo disponível para inspecionar e reparar algum contentor no Centro de Desconsolidação e, por último, os tempos de movimentação de um contentor entre o Centro de Desconsolidação e a localização do cliente de importação ou exportação. Os valores para cada parâmetro foram estipulados tendo por base o tempo médio das operações atuais do setor e os tempos admissíveis pela companhia *CNM*.

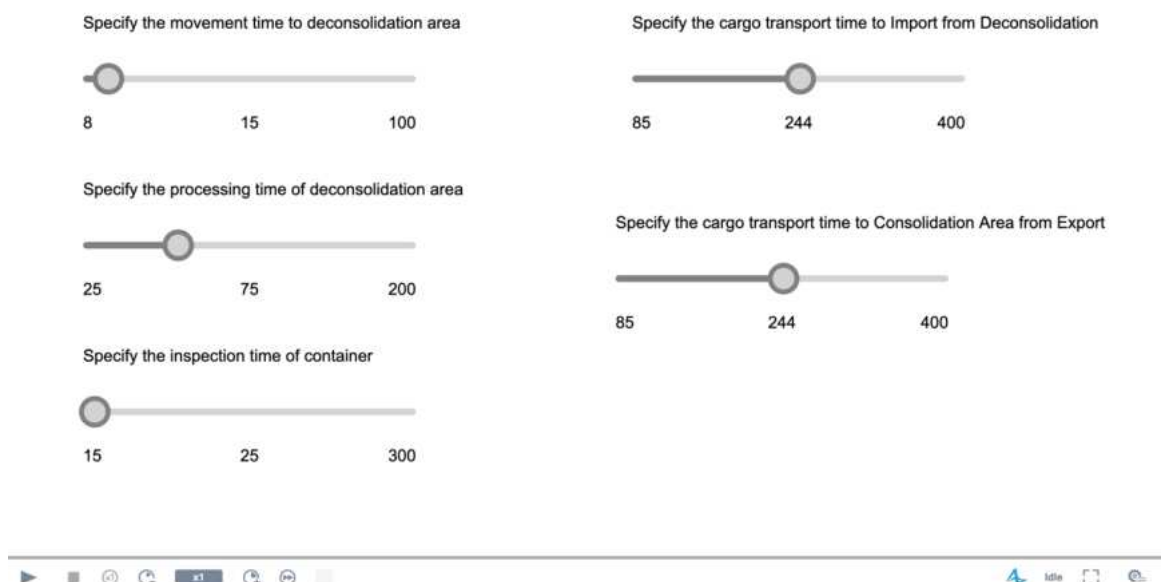


Figura 37 - Parâmetros de simulação do sistema proposto

Após realizados vários testes alterando os tempos médios de um ou mais parâmetros da Figura 37, verificou-se que o nível de *stock* de contentores a serem desconsolidados manteve-se constante e de forma linear muito próximo de zero, como apresentado na Figura 38.

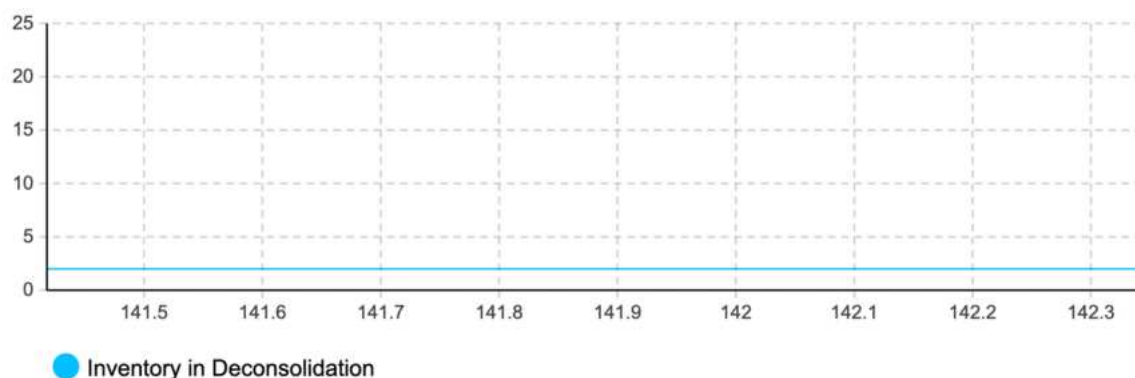


Figura 38 - Nível de inventário que necessita ser desconsolidado num teste da simulação ao sistema proposto

Considerando os valores padrão apresentados na Figura 37 como, por exemplo, tempo de desconsolidação igual a 75 minutos, o fluxo de carga transportada dos navios e o tempo médio que os contentores se encontram no sistema são descritos na Tabela 19.

Tabela 19 - Desempenho do sistema proposto com os valores padrão

	Número de Navios	Quantidade Importada (contentores)	Entradas no Yard (contentores)	Quantidade Exportada (contentores)	Tempo médio do contentor dentro do sistema (minutos)
30 dias	5	1027	513	394	16,18
180 dias	29	5 030	2 515	2 407	88,36
466 dias	76	12 850	6 343	6 294	230,01

No final de 30 dias, é expectável receber 5 navios com um tempo de ciclo de 16,94 dias para cada contentor dentro do sistema sob as condições apresentadas. O tempo de desconsolidação de 75 minutos, levou a que no instante $t = 180$ dias, o sistema proposto recebesse 29 navios que descarregariam 5 030 contentores e carregariam 2 407. Já para um tempo de desconsolidação de 200 minutos, o número de visitas é de 27 *feeders* com 4779 contentores descarregados e 1055 carregados.

Para avaliar a sensibilidade do sistema às variações das escolhas do utilizador para cada parâmetro, procedeu-se à simulação com o valor mínimo de cada variável mantendo os restantes parâmetros constantes para $t = 30$. Por exemplo, pressupondo que o tempo de

deslocação da zona de armazenagem do terminal até ao centro de desconsolidação fosse uma viagem de 8 minutos ao invés dos 15 minutos, obtiveram-se os resultados descritos na Tabela 20:

Tabela 20 - Desempenho do sistema proposto para 30 dias com variação de um parâmetro para o seu mínimo

Tempos	Valor Utilizado (minutos)	Entradas no Yard (contentores)	Quantidade Exportada (contentores)	Tempo médio do contentor dentro do sistema (minutos)
Movimentação do Yard até ao centro de desconsolidação	8	513	394	16,17
Desconsolidação de um contentor	25	459	385	15,97
Inspeção e manutenção de um contentor	15	513	394	16,173
Entrega de cheios de exportação	85	391	308	14,49

3.4. Comparação de resultados entre os dois modelos

No contexto do Porto de Leixões, tanto no sistema atual quanto no proposto com a integração do centro de desconsolidação, um dos principais “gargalos” identificados é o processo de carga e descarga dos navios.

Durante a simulação e análise de desempenho dos modelos físicos, verifica-se que em ambos os sistemas o maior *bottleneck* no sistema é a entrada de contentores na zona de armazenagem do Terminal (*Yard Area*). Especificamente, observa-se que as duas *Quay Cranes* atribuídas a cada navio limitam, significativamente, a otimização do sistema portuário. No instante $t = 30$ dias, o modelo atual apresenta uma taxa de entradas em *Yard* de 66,09 % e o modelo proposto de 49,9 % (rácio entre o total de entradas na zona de armazenagem do terminal com o total de contentores descarregados nos navios de importação). Já no instante $t = 466$ dias, o rácio de entradas em *Yard* para com o total de contentores descarregados no sistema atual foi de 32,5 % ao passo que no sistema proposto tomou o valor de 49,4 %. Assim,

as gruas do terminal limitaram o fluxo de contentores em ambos os sistemas, porém o sistema teve um desempenho mais constante no proposto.

A análise de sensibilidade efetuada a cada parâmetro do sistema proposto para o período de 30 dias mostrou que o tempo médio de um contentor dentro do sistema não sofria muita alteração perante a variação de cada variável aos seus extremos. Contudo, a diferença da quantidade total transacionada em *Yard* e para o navio de exportação foi mais representativa. Por exemplo, a distância entre o centro de desconsolidação e a zona de armazenagem tem uma relação inversa para com as quantidades transacionadas no sistema quando considerado os dois extremos (máximo e mínimo), tal como se mostra na Figura 39.

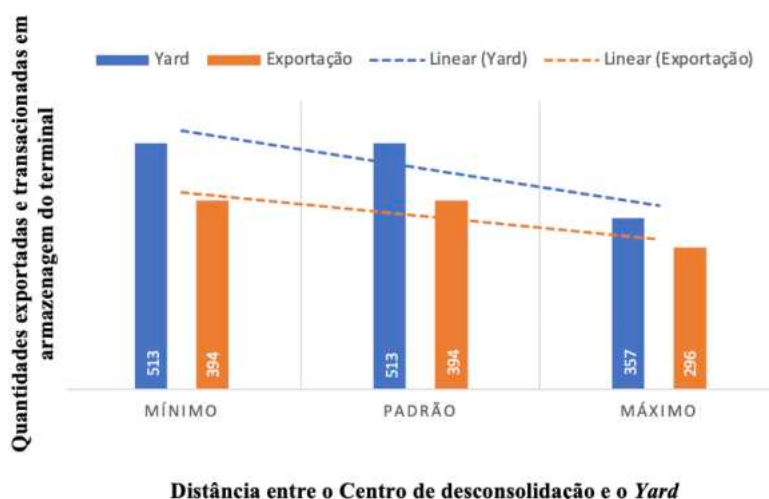


Figura 39 - Relação entre a distância entre o Centro de desconsolidação e o Yard comparativamente às quantidades exportadas e transacionadas em armazenagem do terminal

O tempo de desconsolidação também tem uma relação inversa com o número de contentores que são exportados no mesmo período, para um mesmo nível de visitas, pelo que a sua definição deve ser efetuada com o maior rigor possível. Na simulação do sistema proposto, a seleção dos valores padrão para cada parâmetro do sistema proposto (por exemplo, tempo de desconsolidação de um contentor é de 75 minutos) foi definida pelo autor do estudo pelos valores médios das operações do setor. Na ótica do cliente de importação, diminuiu-se o desperdício de deslocação desnecessária, uma vez que no sistema proposto não existe movimentação de contentores vazios à responsabilidade do cliente. Para o cliente de exportação aumentou-se a disponibilidade dos contentores e proporcionou um aumento da carga exportada.

No que diz respeito ao nível de *stock* no centro de desconsolidação, que tem operação de desconsolidação a variar entre 25 e 200 minutos por contentor conforme estipulado

pelo utilizador, observa-se que, nas condições operacionais atuais do terminal, não há formação de filas de espera de contentores. Isso ocorre uma vez que existe um *bottleneck* na entrada de contentores na área de armazenagem do Terminal (*Yard Area*), que limita o fluxo de contentores inicial e, consequentemente, equilibra os fluxos de entradas e saídas nas restantes atividades ao longo do sistema. A Tabela 21 mostra de forma sumariada as principais diferenças em termos quantitativos entre o modelo atual e o modelo proposto com os valores padrão, no curto (30 dias) e longo prazo (466 dias) de simulação, a partir da análise dos modelos conceptuais e dos resultados da simulação em *AnyLogic*.

Tabela 21 - Resumo das diferenças quantitativas e relativas entre os dois modelos

Variável	Modelo Atual		Modelo Proposto		Variação Percentual	
	Curto Prazo	Longo Prazo	Curto Prazo	Longo Prazo	Curto Prazo	Longo Prazo
Quantidade em sistema (nº contentores)	761	13 513	1 027	12 850	34,95%	-4,91%
Quantidade exportada (nº contentores)	185	4 091	394	6 296	112,97%	53,90%
Tempo de ciclo de um contentor (minutos)	14,676	169,611	16,18	230,01	-88,98%	-86,44%
Rácio da quantidade exportada com a que entrou em <i>Yard</i> (percentagem)	36,8	93	76,8	99,2	108,70%	6,66%
Número de movimentos do camião de importação numa reserva com entrega em parque	4	4	2	2	-50,00%	-50,00%
Rácio da fila espera do <i>Yard</i> com as descargas (percentagem)	33,9	67,5	50,1	50,6	47,79%	-25,04%

A simulação destes modelos permitiu validar que, atualmente, a capacidade é limitada pelas gruas do terminal, uma vez que mais de 33% da carga rececionada está em regime de fila de espera para entrar na zona de armazenagem do terminal.

O tempo de ciclo aumentou com proposta de melhoria, uma vez que neste sistema existiu um incremento da quantidade de carga a chegar nos navios de importação e, consequentemente, o tempo da fila de espera para entrar em *Yard* era maior. Apesar disso, o Sistema Proposto permitiu a redução de frequências de movimentação de contentores a cargo da importação em 50% e um aumento da carga exportada em 53,8% numa visão de longo prazo, sugerindo um aumento da eficiência dos processos após entrada na zona de armazenagem do porto.

A fila de espera do *Yard* corresponde ao rácio entre a quantidade de contentores que já entraram na zona de armazenagem com a totalidade de contentores existentes em sistema, por exemplo, a fila de espera no sistema atual para $T=30$ dias foi de 33,9%.

4. Conclusões e trabalho futuro

O presente estudo focou-se na análise e otimização dos processos logísticos no Porto de Leixões, com o objetivo de melhorar a eficiência do ciclo de contentores em território nacional. Para atingir este objetivo, foram desenvolvidos dois modelos a partir de uma abordagem de simulação detalhada: o modelo do sistema atual e um sistema proposto que inclui a integração de um centro de desconsolidação. Esta abordagem envolveu a concepção de modelos conceptuais e físicos utilizando a ferramenta *AnyLogic*, que permitiram avaliar o desempenho dos sistemas sob diferentes cenários, condições e períodos de observação.

O modelo do sistema atual foi avaliado com base em dados reais e observou-se que o maior obstáculo é a capacidade limitada das gruas do terminal, que restringem a eficiência do processo de carga e descarga dos navios. O sistema proposto, com a integração do centro de desconsolidação, pretendeu demonstrar melhorias na gestão da disponibilidade dos contentores e redução dos desperdícios associados à movimentação de contentores vazios.

Durante a simulação de ambos os modelos, os resultados mostraram que, no sistema atual, a taxa de entrada de contentores na zona de armazenagem do terminal foi de 66,1% após 30 dias, enquanto no sistema proposto, essa taxa foi reduzida para 49,9%. Após 466 dias, a taxa de entrada em *Yard* foi de 32,5% no sistema atual e aumentou para 49,4% no sistema proposto.

Embora tenha havido no curto prazo uma redução na quantidade transacionada para o *Yard* no sistema proposto, houve um aumento na quantidade de contentores exportados. Especificamente, no sistema proposto, a relação entre o número de contentores exportados e os contentores que entraram no *Yard* foi maior do que no sistema atual, sugerindo uma utilização mais eficiente dos contentores para exportação. No instante $t = 30$ dias, esse rácio foi de 0,368 no sistema atual e aumentou para 0,768 no sistema proposto, representando uma melhoria relativa de aproximadamente 108,70%. Após 466 dias, o rácio foi de 0,93 no sistema atual comparado a 0,992 no sistema proposto, representando uma melhoria relativa de aproximadamente 6,67%. Estes valores mostram uma melhoria na eficiência do sistema proposto, que conseguiu exportar mais contentores apesar da redução no total de contentores que entraram para o *Yard*.

Adicionalmente, o sistema proposto elimina a movimentação de contentores vazios de importação. Anteriormente, cada cliente tinha de movimentar contentores vazios entre o parque e o local de importação, causando um movimento de ida e volta considerados um

desperdício. No novo sistema, os clientes recolhem a carga diretamente do centro de desconsolidação, economizando assim o movimento adicional de ida e volta.

A análise de sensibilidade avaliou as variações nos tempos de movimentação e desconsolidação dos contentores, bem como no tempo disponível para inspeção e reparo. Os resultados mostraram que o tempo médio de um contentor dentro do sistema manteve-se relativamente estável mesmo quando os parâmetros foram ajustados para os seus extremos. No entanto, a quantidade total de contentores que entraram no *Yard* e saíram para exportação apresentaram variações. Por exemplo, a redução do tempo de deslocação entre o *Yard* e o centro de desconsolidação de 15 para 8 minutos levou a um aumento do número de contentores exportados, enquanto um aumento no tempo de desconsolidação de 75 para 200 minutos resultou numa diminuição proporcional do número de contentores exportados. Estes resultados destacam a sensibilidade do sistema a alterações nos parâmetros operacionais e reforçam a necessidade de uma definição precisa dos tempos de operação para otimizar o desempenho do modelo.

Futuramente, o foco deve ser uma visão ainda mais centrada no terminal, validando possíveis melhorias dos processos operacionais. Será importante considerar os tempos operacionais das *stackers* da zona de armazenagem, incluir todas as companhias que operam no Porto de Leixões e verificar a capacidade total do *Yard* e do centro de desconsolidação. A taxa de entradas e saídas de todos os navios e o total de contentores transacionados no TCL origina um novo dimensionamento no sucesso da recomendação de melhoria ao modelo atual de operações. Com a capacidade operacional do parque corretamente estipulada, deve-se focar nas filas de espera do centro de desconsolidação, que se esperam ficar mais congestionadas, uma vez que o fluxo de material deverá aumentar com o acréscimo da performance das gruas. Um possível passo, para diminuir este congestionamento, será desviar automaticamente todos os contentores dos navios para o centro de desconsolidação e usar a zona de armazenagem do terminal exclusivamente para os contentores de exportação (cheios e/ou vazios).

O projeto de integração do centro de desconsolidação, a ser realizado, deverá passar pelas seguintes fases principais: selecionar possíveis localizações do centro de desconsolidação, viabilidade do projeto, orçamentação, definição do impacto nas operações e rentabilidade dos processos e aprovação. Uma avaliação dos impactos financeiros e ambientais das operações de transporte de contentores será importante para compreender o custo-benefício das diferentes estratégias. Esta análise proporcionará uma visão holística das implicações, permitindo a tomada de decisões informadas.

Uma vertente não explorada neste estudo e que se considera de especial relevância passa pela realização de uma análise aprofundada às implicações da implementação do sistema de contentores dobráveis na ótica do terminal em ambos os modelos. Além disso, como se verificou que o maior problema do sistema atual é a transferência de contentores entre o navio e o *yard*, seria interessante avaliar o impacto de medidas de redução de tempos de operação dessa atividade, como por exemplo adoção de novas gruas ou aumento da capacidade das mesmas, a partir de análises de desempenho e sensibilidade como as efetuadas no contexto do centro de desconsolidação do presente estudo.

Referências bibliográficas

- Ammar, N. R., & Seddiek, I. S. (2017). Eco-environmental analysis of ship emission control methods: Case study RO-RO cargo vessel. *Ocean Engineering*, 137, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.052>
- Antonov, A. (2020a). Simulation of multimodal transport with AnyLogic. *Journal Scientific and Applied Research*, 19, 33–38.
- Antonov, A. (2020b). Simulation of multimodal transport with AnyLogic. *Original Contribution Journal Scientific and Applied Research*, 19.
- Atkinson, G., Nguyen, H., & Binns, J. (2018). Considerations regarding the use of rigid sails on modern powered ships. *Cogent Engineering*, 5(1), 1543564. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1543564>
- Bandara, Y. M., Garaniya, V., Chin, C., & Leong, Z. H. (2015). Improving Logistics Management Using Foldable/Collapsible Containers: A Case Study. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 31(1), 161–185. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2015.03.007>
- Barkley, A., & Mcleod, K. (2022). Congestion and consolidation: An empirical study of a barge shipping merger. *Regional Science and Urban Economics*, 93, 103725. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2021.103725>
- Britannica. (2012). *Nomenclatura do Navio*. <https://www.britannica.com/>
- Cargotec Corporation. (2024). RoRo Solutions. *Macgregor*. <https://www.macgregor.com/Products/merchant-cargo-and-passengers/ro-ro-solutions/>
- Cariou, P., Lindstad, E., & Jia, H. (2021). The impact of an EU maritime emissions trading system on oil trades. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 99, 102992. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102992>
- Cheng, Y.-H., & Tsai, Y.-L. (2009). Factors influencing shippers to use multiple country consolidation services in international distribution centers. *International Journal of Production Economics*, 122(1), 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.022>
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). *Chapter 4 Maritime Transportation* (pp. 189–284). [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14004-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14004-9)
- Cosco Shipping Lines. (2024). *Vessels*. <https://lines.coscoshipping.com/home/Services/ship/1>

- Davarzani, H., Fahimnia, B., Bell, M., & Sarkis, J. (2016). Greening ports and maritime logistics: A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 473–487. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.007>
- Decisão 98/385/CE da Comissão de 13 de Maio de 1998. (1998). *Jornal Oficial Das Comunidades Europeias*, L 174, 1–52. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1998:174:0001:0052:PT:PDF>
- DHL Group. (2023). *Breaking down the resurgence of breakbulk shipping*. <https://lot.dhl.com/resurgence-of-breakbulk-shipping/>
- Doukas, H., Spiliotis, E., Jafari, M. A., Giarola, S., & Nikas, A. (2021). Low-cost emissions cuts in container shipping: Thinking inside the box. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102815>
- Eiermann, G. (2023, June 20). Navio-Tanque. *Unsplash*. <https://unsplash.com/pt-br/fotografias/um-grande-barco-flutuando-em-cima-de-um-corpo-de-agua-Cjro-J9z6ZA>
- Evergreen Line. (2024). *Container Information*. https://www.evergreen-line.com/container/jsp/CNTR_ContainerInformation.jsp
- Fransen, R. W., & Davydenko, I. Y. (2021). Empirical agent-based model simulation for the port nautical services: A case study for the Port of Rotterdam. *Maritime Transport Research*, 2, 100040. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100040>
- Frémont, A. (2009). Shipping Lines and Logistics. *Transport Reviews*, 29(4), 537–554. <https://doi.org/10.1080/01441640802677607>
- González Chávez, C. A., Brynolf, S., Despeisse, M., Johansson, B., Rönnbäck, A. Ö., Rösler, J., & Stahre, J. (2024). Advancing sustainability through digital servitization: An exploratory study in the maritime shipping industry. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140401. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140401>
- Görçün, Ö. F., Pamucar, D., Krishankumar, R., & Küçükönder, H. (2023). The selection of appropriate Ro-Ro Vessel in the second-hand market using the WASPAS' Bonferroni approach in type 2 neutrosophic fuzzy environment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, 105531. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105531>
- Gratsos, G. A., Thanopoulou, H. A., & Veenstra, A. W. (2012). Dry Bulk Shipping. In *The Blackwell Companion to Maritime Economics* (pp. 185–204). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444345667.ch10>

- Grigoryev, I. (2015). *AnyLogic 7 in three days a quick course in simulation modeling*. [Selbstverlag].
- Guo, J., Feng, T., Wang, S., Qin, Y., & Yu, X. (2024). Shipping network vulnerability assessment integrated with geographical locations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 130, 104166. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104166>
- Holland, D. S., Thunberg, E., Agar, J., Crosson, S., Demarest, C., Kasperski, S., Perruso, L., Steiner, E., Stephen, J., Strelcheck, A., & Travis, M. (2015). US catch share markets: a review of data availability and impediments to transparent markets. *Marine Policy*, 57, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.03.027>
- ILLES, L., JURKOVIC, M., KALINA, T., GORZELANCZYK, P., & LUPTAK, V. (2021). Methodology for optimising the hull shape of a vessel with restricted draft. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 110, 59–71. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.5>
- Kandakoglu, A., Celik, M., & Akgun, I. (2009). A multi-methodological approach for shipping registry selection in maritime transportation industry. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(3–4), 586–597. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.09.001>
- Kaptan, M. (2022). Analysis of accidents during vehicle stowage on RO-RO vessels by using Fuzzy Bayesian networks. *Ocean Engineering*, 260, 111997. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111997>
- Kehr, Y. Z., Chang, G. A., Huang, G. J., & Weng, W. K. (2020). Study of a deep draft vessel to enhance onsite installation capability of a jack up type unit operating in the wind farm zone offshore of the Taichung Harbor Taiwan. *Ocean Engineering*, 217, 107998. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107998>
- Kretschmann, L., Burmeister, H.-C., & Jahn, C. (2017). Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier. *Research in Transportation Business & Management*, 25, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.06.002>
- Kuzmicz, K. A., & Pesch, E. (2019). Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation. *Omega*, 85, 194–213. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.06.004>
- Leachman, R. C. (2008). Port and modal allocation of waterborne containerized imports from Asia to the United States. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(2), 313–331. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.07.008>

- Lee, C.-Y., & Song, D.-P. (2017). Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 442–474. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.05.001>
- Lee, J., & Kim, B.-I. (2015). Industrial ship routing problem with split delivery and two types of vessels. *Expert Systems with Applications*, 42(22), 9012–9023. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.059>
- Levinson, M. (2008). *The Box: How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger*. Princeton University Press.
- Lin, N., Hjelle, H. M., & Bergqvist, R. (2020). The impact of an upstream buyer consolidation and downstream intermodal rail-based solution on logistics cost in the China-Europe container trades. *Case Studies on Transport Policy*, 8(3), 1073–1086. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.03.003>
- Masao, S. (2018). Navio Graneleiro Vale Brasil. *MarineTraffic*. https://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:729224/shipname:ORE%20BRASIL?order=date_uploaded
- Melideo, D., & Desideri, U. (2024). The use of hydrogen as alternative fuel for ship propulsion: A case study of full and partial retrofitting of roll-on/roll-off vessels for short distance routes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 1045–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.142>
- Meng, Q., Weng, J., & Suyi, L. (2017). Impact analysis of mega vessels on container terminal operations. *Transportation Research Procedia*, 25, 187–204. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.389>
- Meyer, R., Kleynhans, W., Portier, M., Beja, J., & Tyberghein, L. (2023). Dataset of ocean vessel traffic in the North Sea. *Data in Brief*, 51, 109746. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109746>
- Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. (2006). Decreto-Lei n.º 226/2006, de 15 de novembro. *Diário Da República n.º 220/2006, Série I de 2006-11-15*, 7874–7890. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/226-2006-544783>
- Mio, A., Fermeglia, M., & Favi, C. (2022). A critical review and normalization of the life cycle assessment outcomes in the naval sector. Bibliometric analysis and characteristics of the studies. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133268>

- Mittendorf, M., Nielsen, U. D., Bingham, H. B., & Dietz, J. (2023a). Assessment of added resistance estimates based on monitoring data from a fleet of container vessels. *Ocean Engineering*, 272, 113892. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113892>
- Mittendorf, M., Nielsen, U. D., Bingham, H. B., & Dietz, J. (2023b). Assessment of added resistance estimates based on monitoring data from a fleet of container vessels. *Ocean Engineering*, 272, 113892. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113892>
- MSC Cruises. (2024). *MSC World Europa*. <https://www.msccruzeiros.pt/os-nossos-cruzeiros/navios/msc-world-europa>
- Nunes, R. A. O., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., & Sousa, S. I. V. (2017). Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal. *Environmental Pollution*, 231, 1370–1379. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.112>
- Olsen, A. A. (2023). *Maritime Cargo Operations*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781003354338>
- Prentice, B. E., & Hemmes, M. (2015). Containerization of Grain: Emergence of a New Supply Chain Market. *Journal of Transportation Technologies*, 05(02), 55–68. <https://doi.org/10.4236/jtts.2015.52006>
- Rodrigue, J.-P., Debie, J., Fremont, A., & Gouveral, E. (2010). Functions and actors of inland ports: European and North American dynamics. *Journal of Transport Geography*, 18(4), 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.03.008>
- Rodrigues, T., Mota, C., Ojiako, U., Chipulu, M., Marshall, A., & Dweiri, F. (2023). A flexible cost model for seaport-hinterland decisions in container shipping. *Research in Transportation Business & Management*, 49, 101016. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101016>
- Rowbotham, M. (2022). Introduction to general cargo shipping. In *Break Bulk and Cargo Management* (pp. 1–8). Informa Law from Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003256359-1>
- Roy, A., & Chakraborty, M. (2024). Effects of Ship Emissions on Asian Haze Pollution, Health, and IMO Strategies. *Societal Impacts*, 100055. <https://doi.org/10.1016/j.socimp.2024.100055>
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2018). *Research methods for business students: Vol. Vol. 195* (8th Edition). Pearson Education.

- Scholliers, J., Permalu, A., Toivonen, S., & Salmela, H. (2016). Improving the Security of Containers in Port Related Supply Chains. *Transportation Research Procedia*, 14, 1374–1383. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.210>
- Setiawan, R., Sarno, R., & Fauzan, Abd. C. (2018). Evaluation of container forecasting methods for analyzing port container terminal performance using agent-based simulation. *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, 286–291.
- Shi, Y., Dai, L., Jing, D., Lee, S., & Hu, H. (2023). An empirical analysis of structural breaks in world dry bulk shipping market. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 16(1/2), 141. <https://doi.org/10.1504/IJSTL.2023.10053568>
- Shintani, K., Konings, R., & Imai, A. (2010). The impact of foldable containers on container fleet management costs in hinterland transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.12.008>
- Siddiqui, A. W., & Verma, M. (2015). A bi-objective approach to routing and scheduling maritime transportation of crude oil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.010>
- Soares, C. G., & Teixeira, A. P. (2000). Structural reliability of two bulk carrier designs. *Marine Structures*, 13(2), 107–128. [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(00)00004-6)
- Solonen, A., Maraia, R., Springer, S., Haario, H., Laine, M., Rätty, O., Jalkanen, J.-P., & Antola, M. (2023). Hierarchical Bayesian propulsion power models — A simplified example with cruise ships. *Ocean Engineering*, 285, 115226. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115226>
- The AnyLogic Company. (2024). *Library Reference Guides*.
- Tijan, E., Jović, M., Panjako, A., & Žgaljić, D. (2021). The Role of Port Authority in Port Governance and Port Community System Implementation. *Sustainability*, 13(5), 2795. <https://doi.org/10.3390/su13052795>
- Tong, X., Lai, K., Lo, C. K. Y., & Cheng, T. C. E. (2022). Supply chain security certification and operational performance: The role of upstream complexity. *International Journal of Production Economics*, 247, 108433. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108433>
- Torbali, B., & Alpan, G. (2023). A multi-agent-based real-time truck scheduling model for cross-docking problems with single inbound and outbound doors. *Supply Chain Analytics*, 3, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100028>

- Urbanyi-Popiołek, I. (2019). Cruise industry in the Baltic Sea Region, the challenges for ports in the context of sustainable logistics and ecological aspects. *Transportation Research Procedia*, 39, 544–553. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.056>
- van Twiller, J., Sivertsen, A., Pacino, D., & Jensen, R. M. (2023). Literature survey on the container stowage planning problem. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.12.018>
- Wang, S., Jia, H., Lu, J., & Yang, D. (2023). Crude oil transportation route choices: A connectivity reliability-based approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 235, 109254. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109254>
- Wasesa, M., Ramadhan, F. I., Nita, A., Belgiawan, P. F., & Mayangsari, L. (2021). Impact of overbooking reservation mechanism on container terminal's operational performance and greenhouse gas emissions. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 37(2), 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.01.002>
- Winter, M., Altendorfer, K., & Pickl, S. (2022). Applying simulation to estimate waiting times and optimize the booking size for oversea transportation vessels. *Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference*, 1603–1613.
- Xu, B., Wang, H., & Li, J. (2023). Evaluation of operation cost and energy consumption of ports: comparative study on different container terminal layouts. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102792>
- Yang, Y., Tang, W., & Ma, J. (2011). Analysis of shafting alignment for container vessels based on improved transition matrix method. *Procedia Engineering*, 15, 5373–5377. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.996>
- Yang, Z., Xin, X., Chen, K., & Yang, A. (2021). Coastal container multimodal transportation system shipping network design—toll policy joint optimization model. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123340>
- Yilport Leixões. (2024). *Terminais*. <http://tcl-leixoes.pt/pt/terminais/>
- Zhang, C., Ringsberg, J. W., & Thies, F. (2023). Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. *Ocean Engineering*, 287, 115731. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>
- Zhang, M., Janic, M., & Tavasszy, L. A. (2015). A freight transport optimization model for integrated network, service, and policy design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 77, 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.02.013>

- Zhang, P., & Zhao, M. (2015). Maritime Labour Convention, 2006 and the Chinese seafarers: How far is China to ratification? *Marine Policy*, 61, 54–65.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.07.016>
- Zhou, M., Zhou, M., Duan, Y., Yang, W., & Pan, Y. (2018). Capacitated multi-modal network flow models for minimizing total operational cost and CO2e emission. *Computers and Industrial Engineering*, 126, 361–377.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.049>