

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LAURA MOREIRA LESSA DE PINHO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA À MEDIÇÃO DE EMISSÕES EM
TERMINAIS DEPOT

Joinville
2024

LAURA MOREIRA LESSA DE PINHO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA À MEDIÇÃO DE EMISSÕES EM
TERMINAIS DEPOT

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Eng. Elisete
Santos da Silva Zagheni

Joinville
2024

LAURA MOREIRA LESSA DE PINHO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA À MEDIÇÃO DE EMISSÕES EM
TERMINAIS DEPOT

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 04 de julho de 2024.

Banca Examinadora:

Orientadora: Dra. Eng. Elisete Santos da Silva Zagheni
Orientador(a)
Presidente

Dra. Eng. Viviane Lilian Soethe Parucker
Membro(a)
UFSC

Eng. Henrique Santucci
Membro(a)
UFRJ

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Pinho, Laura Moreira Lessa de
Simulação computacional aplicada à medição de emissões em
terminais depot / Laura Moreira Lessa de Pinho ;
orientadora, Elisete Santos da Silva Zagheni, 2024.
61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Gases de efeito estufa. 3.
Terminais depot. 4. Estimativa de emissões. 5. Simulação
computacional. I. Zagheni, Elisete Santos da Silva. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Naval. III. Título.

Diva, Letícia e Bartholomeu, meus amores, dedico este trabalho a vocês.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o final de um período desafiador e gratificante - a graduação. Durante essa fase, fui muito afortunada por ter o apoio de tantos, sem os quais não teria sido capaz de chegar ao fim. Dessa forma, tomo este espaço para expressar uma parcela de minha gratidão àqueles que foram indispensáveis nessa jornada.

Este agradecimento não poderia se iniciar de outra forma senão agradecendo à minha mãe, Diva Lessa, e à minha família: Ledimar Pinho, Célia Moreira, Rosilene Lessa e Nathanny Lessa. Sou grata por vir de uma família de mulheres independentes que me deram uma excelente criação, serviram de exemplo e me permitiram tantas oportunidades e conquistas.

Ao me mudar para outro estado sozinha, fui agraciada com uma nova família. Eu, Letícia Mello e Samuel Nobre formamos um lar em Joinville, onde nossa casa era sinônimo de acolhimento, amizade e companheirismo. À Letícia, agradeço também por sua parceria sem limites, seja desenvolvendo pesquisas e projetos ou cuidando do nosso Bartho. Nosso laço é para sempre.

Os amigos antigos, mesmo com a distância e os anos, foram e seguem sendo base e apoio para todos os momentos. Beatriz Camara e Eduarda Sanches, minhas meninas, estão comigo desde sempre e me levantam a cada tropeço. Amigos são a família que escolhemos, e sou grata por cada um de vocês. Também agradeço ao meu namorado, Miguel Erthal, que é meu companheiro, quem divide comigo o dia a dia, o motivo do meu sorriso e minha força para continuar todos os dias.

Por fim, sendo filha de professora, agradeço a todos os meus professores. Eles são os grandes responsáveis pelo desenvolvimento de nós, jovens, e moldam diariamente o futuro do mundo. Sem eles, não seria possível chegar até aqui. Agradeço, especialmente, à Professora Elisete Zagheni, orientadora deste trabalho, que confiou em mim mesmo sem me conhecer e tornou este trabalho possível. Agradeço à banca que participou da defesa desta pesquisa - Viviane Parucker e Henrique Santucci - pelo aconselhamento, disponibilidade e atenção. E, ainda, aos meus orientadores anteriores - Vanina Durski e Gustavo Costa - que abriram muitas portas que viriam a tornar este trabalho real.

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa são a principal causa das mudanças climáticas, sendo o transporte marítimo responsável por 3% das emissões globais. Para enfrentar esse desafio, a OMI e ONU propõem regras de redução de emissões considerando não apenas as embarcações como também outros agentes envolvidos no setor. Nesse contexto, estudos com temas voltados questões de emissões no setor têm grande relevância. Para isso, este trabalho propõe a adaptação de um modelo de simulação computacional dos fluxos internos de caminhões e *reach stackers* em um terminal *depot* para estimar as emissões envolvidas. Com o objetivo de obter essas estimativas, também foram utilizadas equações de emissões disponíveis na literatura, considerando distâncias percorridas ou tempo de uso, além de dados sobre o consumo das máquinas e os fatores de emissão dos combustíveis. Foram, portanto, definidos quatro cenários de simulação para compreender quais mudanças nos parâmetros definidos promovem maiores melhorias nas emissões e como essas mudanças afetam os tempos de atendimento e o número de caminhões atendidos. A análise dos resultados apresenta problemas encontrados na operação do próprio terminal e, principalmente, uma visão de como a qualidade do combustível utilizado e os rendimentos das máquinas influencia nas emissões. Estudos desse tipo fomentam discussões importantes sobre preservação ambiental, promovendo conscientização e esclarecimento sobre as operações de empresas públicas e privadas, possibilitando a busca por estratégias objetivas e eficientes para mitigar emissões e desacelerar o processo de aquecimento global.

Palavras-chave: Gases de efeito estufa. Terminais *depot*. Estimativa de emissões. Simulação computacional.

ABSTRACT

Greenhouse gas emissions are the main cause of climate change, with maritime transport accounting for 3% of global emissions. To address this challenge, the IMO and UN propose emission reduction rules that consider not only vessels but also other sector agents. In this context, studies focusing on emissions in the sector are highly relevant. This work proposes adapting a computational simulation model of internal truck and reach stacker flows in a depot terminal to estimate associated emissions. To obtain these estimates, emission equations from the literature were used, considering distances traveled or time in use, as well as data on machine consumption and fuel emission factors. Four simulation scenarios were defined to understand which parameter changes yield the greatest emission improvements and how these changes affect service times and the number of trucks served. The results analysis highlights operational issues within the terminal and, importantly, how fuel quality and machine efficiency influence emissions. Studies like this foster important discussions on environmental preservation, raising awareness and understanding of public and private company operations, and enabling the pursuit of effective strategies to mitigate emissions and slow global warming.

Keywords: Greenhouse gases. Depot terminals. Emission estimation. Computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Histórico da movimentação de carga containerizada no Brasil	10
Figura 2 – Movimentação de contêineres no Brasil em 2023	12
Figura 3 – Fluxograma da cadeia logística portuária	18
Figura 4 – Fluxos possíveis em um <i>depot</i>	20
Figura 5 – <i>Reach Stacker</i>	21
Figura 6 – Fluxograma das etapas da metodologia	24
Figura 7 – Matriz de decisão	28
Figura 8 – Fluxograma de desenvolvimento do modelo de simulação	29
Figura 9 – <i>Depot ATM</i>	30
Figura 10 – Cenários considerados no estudo	31
Figura 11 – Detalhes cenário base	32
Figura 12 – Operação atual e cenários alternativos	32
Figura 13 – Layout do <i>depot</i>	34
Figura 14 – Modelo Conceitual	35
Figura 15 – Layout de movimentação de caminhões	42
Figura 16 – Layout geral do <i>depot</i>	43
Figura 17 – Modelo de um <i>depot</i> de cargas dry	45
Figura 18 – Parâmetros do modelo de um <i>depot</i> de cargas dry	46
Figura 19 – Síntese dos cenários propostos	53
Figura 20 – Emissões por cenário	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisão bibliográfica	26
Tabela 2 – Inputs para simulação	37
Tabela 3 – Inputs para o cenário base	37
Tabela 4 – Inputs para o cenário alternativo	38
Tabela 5 – Inputs para o cenário alternativo 2	39
Tabela 6 – Inputs para o cenário alternativo 3	39
Tabela 7 – Inputs para o cenário alternativo 4	40
Tabela 8 – Outputs esperados	40
Tabela 9 – Outputs da simulação	52
Tabela 10 – Resultados de emissões	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Acordos Climáticos e Emissões de GEE	14
2.2	Cadeia Logística dos Contêineres	17
2.3	Simulação Computacional	21
3	METODOLOGIA	24
3.1	Objeto de estudo	24
3.2	Revisão Bibliográfica	25
3.3	Sistematização do problema proposto	27
3.3.1	Etapas de desenvolvimento da simulação	27
3.3.2	Caracterização do problema	30
3.3.3	Cenário propostos	31
3.3.4	Desenvolvimento do modelo conceitual	33
3.3.5	Estratégias e simplificações adotadas	35
3.4	Desenvolvimento do modelo	36
3.4.1	Inputs e outputs esperados	36
3.4.2	Definição da ferramenta de simulação	41
3.4.3	Layout	41
3.4.4	Agentes	43
3.4.5	Fluxos e processos	44
3.4.6	Limitações do modelo	46
3.4.7	Validações do modelo	47
3.4.8	Limitações no Estudo de Emissões	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Resultados dos Cálculos de Emissões	51
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Desde 1995, ocorre anualmente a conferência mundial chamada Conferência das Partes (COP), que é um evento da Organização das Nações Unidas (ONU) e tem por objetivo principal tomar decisões de forma unânime entre os países Parte sobre tópicos de importância global. Uma dessas decisões resultou no primeiro acordo climático gerido pela ONU, Protocolo de Kyoto de 1997 que definia como meta, em um primeiro momento, reduzir em cerca de 5% os níveis de emissões referentes a 1990 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, s.d.).

Em 2015, ocorreu ainda um novo acordo climático, o Acordo de Paris que visou evitar que o aumento da temperatura global superasse os 1,5 °C. Nesse âmbito, o Brasil chegou a evitar a emissão de aproximadamente 113 milhões de toneladas de CO₂ entre 2015 e 2023 (BNDES, 2023). Mesmo com metas definidas para a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), 2023 atingiu um record como o ano com as maiores temperaturas nos últimos 125 mil anos (CNN BRASIL, 2023). De acordo com o Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus, o ano de 2023 chegou a 1,48 °C acima do período pré-industrial (COPERNICUS, 2024).

O CO₂ é o principal dos GEEs e junto aos demais causa naturalmente o efeito estufa, responsável pela manutenção da temperatura terrestre na faixa coerente com fauna e flora atuais. Sem o aquecimento causado pelo efeito estufa, as espécies que habitam o planeta, atualmente, não poderiam existir, entretanto o acúmulo exagerado desses gases resulta, também, em um aumento desenfreado da temperatura podendo chegar a desequilibrar e levar a extinção de diversas espécies (SILVA; LIMA, 2009). Por isso, nos acordos citados anteriormente foram estabelecidas medidas para reduzir essas emissões, tais como a transição para fontes de energia renovável, a implementação de políticas de eficiência energética e a proteção de florestas para a captura de carbono (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, s.d.).

Veículos elétricos, fontes de energia renováveis, combustíveis sintéticos, são algumas das soluções desenvolvidas e empregadas para a redução imediata dos gases do efeito estufa. Porém, certos seguimentos crescem tão rápido que essas soluções não conseguem ser empregadas numa escala simétrica. Um exemplar desse fenômeno é o comércio marítimo, que em seu avanço, é responsável por quase 3% da produção de CO₂ mundial como apontado pela Organização Marítima Internacional, no entanto, é previsto que até 2050 esse número suba para quase 17% (MONDO et al., 2024).

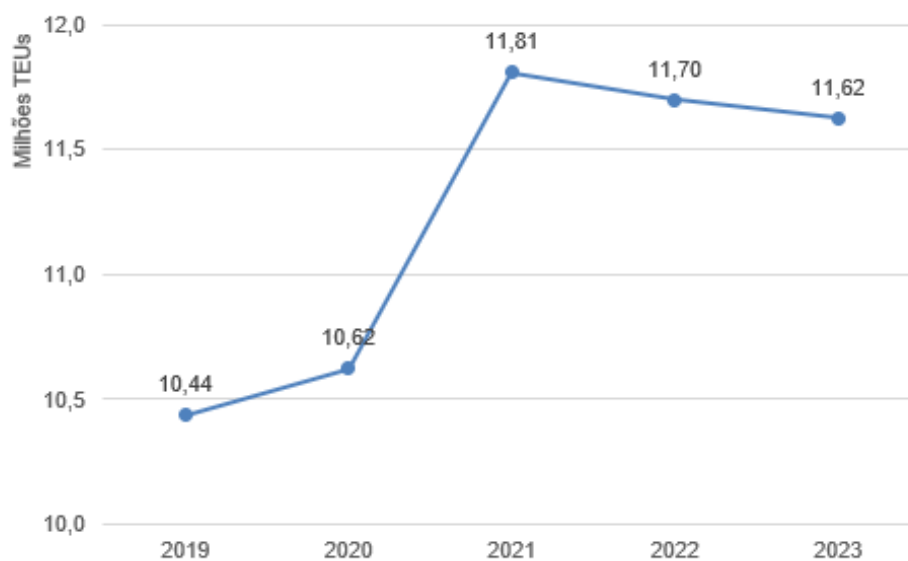
Há uma crescente demanda por transporte marítimo global, seja para o transporte de mercadorias ou pessoas. As vias marítimas são uma forma eficiente de transportar grandes volumes de mercadorias por longas distâncias. Como conclui

(SILVA; LIMA, 2020), a maioria dos meios de transporte utilizados atualmente operam por meio da energia proveniente da queima de combustíveis fósseis, os quais são grandes responsáveis pelas emissões de GEE. Logo, quanto mais esse seguimento prosperar sem que simultaneamente se adapte as medidas que visam brechar o efeito estufa, maiores serão os danos causados ao meio ambiente.

Parte do problema das altas emissões do transporte marítimo se dá por todo ecossistema que envolve um seguimento específico, os contêineres. O invento dessas grandes caixas de metal por Malcom McLean, na década de 1950, revolucionou o transporte de mercadorias em larga escala, iniciando o processo de containerização que alterou a economia mundial. Uma vez que esse recipiente, em comparação com transporte de produtos soltos, proporcionava mais segurança à carga, em virtude de sua estrutura resistente e um processo logístico de transporte no qual pode-se lacrar o contêiner e abri-lo apenas para cliente final. Entre as vantagens mencionáveis da containerização, destaca-se o processo de padronização, que possibilitou a adaptação dos modais de transporte ao uso do contêiner, maior rapidez nas operações de carga e descarga, menores custos de embalagem, menor número de avarias e extravio de cargas (MARTINS; SILVA, 2001).

De acordo com ZHOU et al. (2021), em paralelo com o crescimento do número de embarcações mercantes no mundo, processo consonante da internacionalização da economia, a containerização foi impulsionada, aumentando a produtividade e redução dos custos de transporte, de modo que as movimentações desse setor chegaram a cerca de 181 milhões de TEUs em 2016. Nesse sentido, o próprio histórico de movimentação de contêineres no Brasil mostra o crescimento do setor. A Figura 1 retrata a movimentação brasileira de carga containerizada em TEUs entre 2019 e 2023.

Figura 1 – Histórico da movimentação de carga containerizada no Brasil



Fonte: Adaptado de (ANTAQ, 2024).

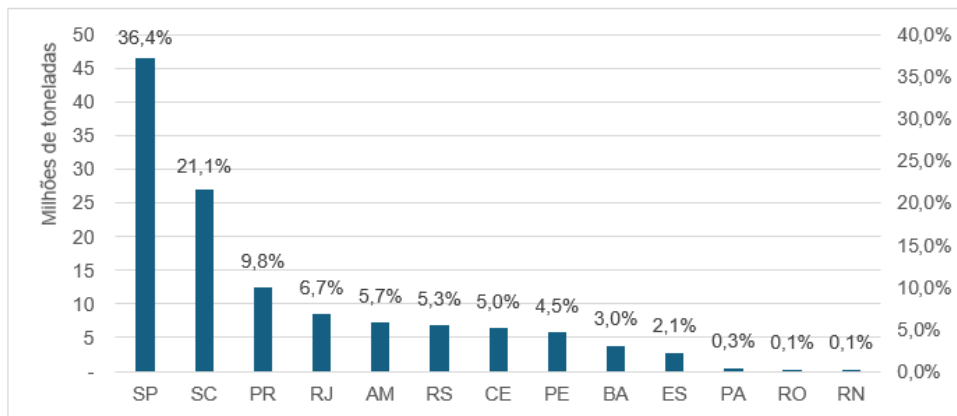
Assim, observa-se uma elevação de 11% entre 2020 e 2021 e, logo após, uma estabilização do crescimento. Ainda assim, até abril de 2024 movimentou-se 4,3 milhões de TEUs, ou seja, 20% a mais do que o mesmo período em 2023 com 3,6 milhões (ANTAQ, 2024). Portanto, pode-se afirmar que a movimentação de carga containerizada tem crescido no Brasil e no mundo, e, dessa forma, o contêiner promoveu um avanço no processo de globalização de forma que uma cadeia logística foi desenvolvida a seu redor. Essa cadeia conta com atores especializados em movimentações de contêineres e envolve não apenas clientes e comerciantes, como também armadores e instalações portuárias (BENEDECTI, 2022).

Nesse contexto, terminais do tipo *depots* surgem como uma forma de evitar congestionamentos portuários causados desbalanceamentos no fluxo de contêineres e, dessa forma, concentram operações relacionadas à gestão de contêineres vazios. Dotados de estruturas bem definidas, os terminais *depots* operam com uma série de atividades fundamentais, incluindo recebimento, retirada, vistoria, manutenção e armazenagem de contêineres vazios. Essas operações são projetadas para serem eficientes e precisas, garantindo um fluxo contínuo de contêineres na cadeia logística e, para isso, são utilizados, além de caminhões, uma série de maquinários que auxiliam na gestão e organização dos contêineres dentro dos terminais (WENG; TAN; RAHMAN, 2020).

Dessa forma, como salienta, tanto o aumento da demanda por porta-contêineres quanto a infraestrutura e outros transportes relacionados ao contêiner incidem diretamente no aumento de GEE na atmosfera. Assim, torna-se importante o estudo acerca das fontes de emissões e as possíveis formas de mitigar os impactos que levam a aceleração do aquecimento inerente ao planeta (MALHEIROS, GABRIEL, 2022).

Dado o contexto determinado anteriormente, o presente trabalho apresenta o estudo das emissões de GEE com base em um terminal *depot* de Santa Catarina. Essa escolha se justifica ao analisar a distribuição da movimentação de contêineres entre os estados brasileiros em 2023 (Figura 2).

Figura 2 – Movimentação de contêineres no Brasil em 2023



Fonte: Adaptado de (ANTAQ, 2024).

Como visto na Figura 2, Santa Catarina é o segundo maior movimentador de contêineres e perde apenas para o estado de São Paulo onde está localizado o maior porto de Santos, o maior da América Latina.

Entretanto, apesar de ter como base um terminal real do estado de SC, é importante ressaltar que são feitas modificações, simplificações e hipóteses no cenário real a fim de trazer um estudo com foco didático que permite uma maior compreensão da atuação dos gases no contexto explicitado.

Como metodologia para obter os resultados desejados, opta-se pela adaptação de um modelo de simulação baseada em agentes que replica a estrutura do terminal e estima tempos e distâncias relacionados a operação interna do *depot*. Esses outputs servem como parâmetros para as equações que resultam nas estimativas de emissões de CO₂ do terminal. Dada a complexidade do problema, torna-se inviável a utilização de métodos de resolução como experimentos, construção de modelos físicos ou a aplicação direta de soluções analíticas, por isso é indicado o uso de simulações computacionais. Os problemas de uma cadeia logística podem, então, ser estudados por meio da simulação baseada em agentes, ou seja, criam-se agentes que representam as partes do objeto de estudo que realizam as funções das quais necessita-se de informações. A simulação permite, portanto, a observação de como cada agente interage com os demais e com o ambiente onde estão inseridos (PINHO et al., 2023).

A fim de seguir com o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada a divisão dos conteúdos entre as seguintes seções: Fundamentação Teórica, que trata dos temas indispensáveis para o desenvolvimento da pesquisa; Metodologia, que descreve a adaptação do modelo existentes e a definição de casos para sua aplicação, além da obtenção dos parâmetros e equações para o cálculo das estimativas de emissões; Resultados e Discussões, que apresenta os resultados obtidos e fazendo os apontamentos necessários para a tradução dos números em informações palpáveis e com relevância; por fim, Conclusões, que resume os principais pontos da pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

Com o propósito de obter estimativas sobre as emissões relacionadas aos terminais *depots* e fomentar discussões relevantes sobre o assunto, são estabelecidos os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estimar as emissões decorrentes do tráfego de caminhões e *reach stackers* na movimentação de contêineres em terminais *depots* aplicando modelos de simulação computacional baseada em agentes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Adaptar o modelo de simulação computacional para a obtenção dos outputs de distância desejados;
- Obter das equações para o cálculo de emissões, fatores de emissão e consumos para as máquinas de interesses;
- Aplicar as saídas do modelo junto aos demais dados nas equações definidas para estimar as emissões;
- Comparar os resultados encontrados entre os diferentes cenários operacionais;
- Identificar operações mais eficientes visando otimizar desempenho ambiental em terminais *depots*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo a seguir apresenta os tópicos de maior relevância para a compreensão e desenvolvimento da pesquisa proposta nesse trabalho. Assim, optou-se por dividi-lo em 3 tópicos que mostram os seguintes temas: acordos climáticos e emissões de GEE; cadeia logística dos contêineres; e simulação computacional.

2.1 ACORDOS CLIMÁTICOS E EMISSÕES DE GEE

A fauna e a flora atuais do planeta apenas existem devido a um conjunto de fatores específicos, para a sobrevivência das espécies, então, é necessário que esses fatores sejam mantidos em equilíbrio. Um dos fenômenos responsáveis pela manutenção do planeta dentro dessas condições é o efeito estufa, esse termo ganhou um cunho negativo nos últimos anos por sua associação a mudanças climáticas e o aquecimento global. No entanto, o efeito estufa nada mais é que a ação responsável por manter as temperaturas médias globais, evitando que haja grande amplitude térmica (ALMEIDA; MARRANGHELLO; DORNELES, 2020).

A atmosfera terrestre consiste em uma mistura de vários gases, sendo o oxigênio e o nitrogênio os predominantes, contudo, outro grupo são os gases de efeito estufa, os responsáveis pela ocorrência e intensidade do fenômeno. O óxido nitroso (N₂O), o metano (CH₄), o ozônio (O₃), o vapor d'água e, principalmente, o dióxido de carbono (CO₂) são os gases responsáveis por reter o calor na superfície da terra, como exemplificado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (MCT, 1999) é algo como os vidros de um carro fechado ou simplesmente o revestimento de uma estufa com a incidência direta do sol.

Apesar de ser um fenômeno natural imprescindível para manter a vida, o efeito estufa está diretamente relacionado ao aquecimento global desenfreado que ocorre nos últimos séculos. Os gases do efeito estufa são encontrados e produzidos de forma natural podendo, inclusive, aumentarem suas concentrações em decorrência de eventos naturais como erupções vulcânicas. Contudo, mesmo esses excessos podem ser processados através do ciclo do carbono, um processo que faz esse elemento seja reciclado naturalmente. O problema se dá com o aumento da intensidade de emissões decorrentes das atividades humanas que desequilibra esse ciclo, isso ocorre porque os organismos fotossintéticos que capturam CO₂ e o convertem em O₂ ficam sobrecarregadas. Permitindo, assim que os gases se acumulem e aumentam as temperaturas terrestres (RODRIGUES, 2012).

Como apontado por Xavier e Kerr (XAVIER; KERR, 2002), após a primeira Revolução Industrial na segunda metade do século 18, é possível notar o aumento da

concentração de gases e ligá-los diretamente a ações antropogênicas. O processo de industrialização e as fabricas em si, com o uso massivo de energia proveniente da queima de combustíveis fósseis, deu início ao acúmulo de gases do efeito estufa dando o primeiro passo em direção a problemática enfrentada pela humanidade atualmente.

Segundo o IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2023), o Relatório Intergovernamental de Mudanças Climáticas, desde o período pré-industrial a temperatura média da terra subiu 1,1 °C e é de urgente importância que até 2030 as emissões caiam pelo menos a metade, para que a média limite de 1,5 °C, estabelecida no Acordo de Paris, não seja alcançada.

As consequências imediatas desse aquecimento já são sentidas no presente, porém com os dados alarmantes dos últimos anos, a lista tende a ser ainda mais negativa. A agricultura e a pecuária mundial também irão sofrer as consequências das mudanças climáticas diretamente. A diminuição do ciclo das chuvas, alteração na temperatura ambiente, desertificação e o surgimento de novas pragas colocarão em risco a soberania e a segurança alimentar da população mundial (BARBOSA, G. A. B.; COSTA, B. G., 2023).

Em 1972 houve a primeira conferência de assuntos climáticos da ONU, conhecida como Conferência de Estocolmo que abriu portas para o início de uma série de outras conferências mundiais referentes ao assunto. Isso porque diversas pesquisas e teses publicadas geraram preocupações nos governos mundiais impulsionando a necessidade da mudança de atitude por parte dos governos que passaram a ver o cuidado com o meio ambiente como fundamental para o desenvolvimento e para o bem-estar geral dos povos (PASSOS, 2009) (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 1972).

Em Berlin, ocorreu de fato a primeira Conferência que trataria de obrigações entre líderes e países, a primeira das Conferências das Partes, em 1995, reuniu 117 países. Trouxe metas e obrigações jurídicas para a redução das emissões de carbono, porém apenas em 1997 ocorreu o acordo oficial, o protocolo de Kyoto. A COP-3 de 1997 estabeleceu em primeiro momento que países industrializados responsáveis por mais de 50% das emissões deveriam reduzir no mínimo 5,2% de suas emissões em relação as medias de 1990 (CENAMO, 2004).

Já 2015 ocorreu um segundo acordo na COP-21, o acordo de Paris, esse que estabeleceu o importante limite no qual a temperatura mundial não deveria superar o 1,5 °C em relação ao período pré-industrial. Foram 195 países os que assinaram o acordo e consentiram com suas metas. O Brasil, que aquele ano já era o sétimo maior emissor de GEE, dessa vez precisaria se posicionar e se comprometeu a uma redução de 37% até 2025 e 43% até 2030, tendo como referência os níveis de 2005 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, s.d.).

O Brasil nos anos que sucedem o acordo de Paris se mostrou incumbido de

honrar as metas caindo para a nona posição entre os maiores emissores. Em 2023, registrou uma queda de 8% em relação ao ano anterior de acordo com o Sistema de Estimativa de Emissões de gases de efeito estufa (ALENCAR et al., 2023). Parte do BRICS5 e um dos países emergentes mais ricos do mundo, o Brasil ainda permanece no ranking dos mais poluentes, com suas indústrias, construção civil, a sexta maior população do mundo e um comércio marítimo em constante expansão. Esse último, que só em 2023 cresceu 41,9%, se mostrando como um dos grandes produtores de GEE (PORTOS E NAVIOS, 2021).

Mundialmente responsável por 3% de todo dióxido de carbono liberado na atmosfera, o comércio marítimo ainda é o mais eficaz dos transportes de grandes cargas, são 840 milhões de toneladas de CO₂ oriundas apenas da navegação. Porém o comércio marítimo não depende unicamente de Navios, existe um ecossistema gigantesco e complexo em sua volta. Portos, transportes auxiliares, logística de contêineres, trabalhadores e a subsistência deles no entorno, todo esse nicho agrava ainda mais o problema das emissões de GEE no ambiente, já que grande parte do que mantém os portos e seus navios funcionando, demanda da queima de combustíveis fósseis (AGUIAR; CARDOSO; GUITARRARI, 2023).

Um importante mercado, nesse contexto de comércio marítimo, é o de movimentação de cargas containerizadas, só no Brasil houve um crescimento de cerca de 20% nos primeiros 4 meses de 2024 (ANTAQ, 2024). O crescimento desse mercado traz consigo diversas fontes de emissões, uma vez que, além das embarcações, existem outros modais que complementam as rotas. Além disso, é preciso considerar as fontes associadas às movimentações internas das cargas em portos e terminais retroportuários (LEAL; AES, 2013).

A cadeia logística formada para o transporte do contêiner colaborou com o avanço do comércio mundial, entretanto deve ser administrada de forma responsável, é neste momento que as práticas ESG ganham relevância. Como forma de aplicar esses conceitos, portos do setor desenvolvem projetos em conjunto com a sociedade e universidades a fim de desenvolver estratégias para aumentar a sustentabilidade de suas operações. O Porto de Itapoá, detentor de um certificado internacional por utilizar energia elétrica 100% de fontes renováveis, serve de exemplo ao desenvolver projetos sociais e uma agenda ambiental que define comitês e ações de preservação ambiental (PORTO ITAPOÁ, c2024).

Existem diversas estratégias para mitigar os altos números de emissões, soluções que não são unicamente aplicadas para o comércio marítimo, mas que podem ajudar em larga escala a alcançar as metas desejadas. Como exemplo a substituição de combustíveis e meios de transporte mais poluentes por fontes mais limpas, sejam motores elétricos, combustíveis sintéticos ou com menores fatores de emissão. Além disso, a aplicação de softwares destinados a aprimorar a eficiência dos portos, novas

propostas e iniciativas de organização dos mesmos e adoção de práticas ESG são facilitadores para as metas. Porém a aplicação dessas mudanças não é sempre fácil e esbarra em diversos limites tecnológicos e orçamentários (ESPÍNDOLA, 2020).

O comércio marítimo brasileiro vem buscando cada vez mais adotar práticas ESG em seu funcionamento, para garantir sustentabilidade e inovação. Em resumo, as práticas ESG, criadas em 2004 pelo Pacto Global, com apoio da ONU e outras organizações, abordam 3 princípios básicos: ambiental, social e governamental. Essas medidas buscam humanizar e tornar uma empresa ou setor mais sustentável, em todos os sentidos. Ao investir em estratégias ESG, as indústrias enfrentam desafios atuais e promovem um futuro com mais bem-estar (RAMBO, 2023).

2.2 CADEIA LOGÍSTICA DOS CONTÊINERES

O termo cadeia logística diz respeito a todos os processos pelos quais um produto passa até chegar a sua versão final e ao consumidor final, mas mais do que isso é um termo usado para descrever uma rede de diversos agentes e seus relacionamentos. Ou seja, a cadeia logística de um produto explica como os agentes que realizam cada uma das operações de produção e distribuição interagem entre si (LAMBERT; COOPER, 2000).

Historicamente, o contêiner criou uma cadeia logística ao seu redor ao fazer com que os demais modais (rodoviário, ferroviário, hidroviário ou aeroviário) se adaptassem ao processo de unitarização da carga, uma vez que esse é caracterizado por ser um equipamento transferível a todos os tipos de transporte de superfície, exceto o dutoviário (BALLOU, 2010).

As facilidades associadas ao contêiner se relacionam com a segurança proporcionada a carga devido a sua estrutura de metal e a padronização do tamanho, existem apenas 2 tamanhos de contêineres que se diferenciam só no comprimento sendo eles os de 20 pés com 6 metros de comprimento e os de 40 pés com 12 metros de comprimento, em altura e largura ambos os tamanhos têm 2,5 metros nas duas dimensões. Apesar dos tamanhos padrões, existem alguns tipos diferentes de contêineres com estruturas adaptadas aos tipos de cargas que podem transportar. Há contêineres ventilados, para cargas de granel e cargas líquidas, mas os 2 tipos principais são os contêineres dos tipos *dry* e *reefer*, ou seja, para cargas secas e para cargas refrigeradas, respectivamente (FAZCOMEX, 2024).

Concomitantemente ao invento do contêiner, surgiram diversos nichos especializados em seu transporte para cada uma das etapas necessárias (LOPES; BELTRAME; BELTANI, 2013). Essa cadeia logística conta com atores que desempenham papéis cruciais para a movimentação do contêiner, saindo do produtor e chegando ao cliente final, e contando com outros elos intermediários que realizam o

transporte. Todos os componentes dessa cadeia precisam estar em sintonia para que o fluxo das cargas aconteça de forma eficiente e orgânica, por isso é comum a criação de alianças entre tais atores (ZAIN, 2011).

A Figura 3 apresenta o fluxo encontrado na cadeia logística portuária, desde as negociações entre vendedores e compradores até o transporte, o qual é dividido no fluxo de importação e exportação (BAALLEN; ZUIDWIJK; NUNEN, 2008).

Figura 3 – Fluxograma da cadeia logística portuária



Fonte: (BENEDECTI, 2022)

Os processos que compõem a cadeia logística portuária se iniciam com as negociações comerciais que geram os fluxos de movimentação de mercadorias. Os fluxos podem ser de importação - quem compra - ou de exportação - quem vende - a depender da visão de cada empresa, mas são essencialmente similares. Dessa forma, após a negociação, a empresa exportadora contrata contêineres que são retirados em terminais *depots* e estufados - carregados - com as mercadorias e enviados aos portos para seguirem viagem em navios porta-contêineres. Chegando ao porto de destino, o contêiner é entregue a empresa cliente que desova - descarrega - a mercadoria e encaminha o contêiner vazio de volta a um terminal *depot*.

Sobre a Figura 3, ressalta-se que os números apresentados significam:

1. Companhias de navegação, responsáveis pelo transporte marítimo do contêiner;
2. Operadores de terminais, responsáveis pela movimentação dos contêineres nos portos e terminais;
3. Companhias terceirizadas de logística;
4. *Depots*, fazem a gestão dos contêineres vazios;
5. Inland Container Terminals (Ict's), terminais de armazenagem de contêineres cheios e vazios fora das zonas portuárias;
6. Importadores;

7. Exportadores.

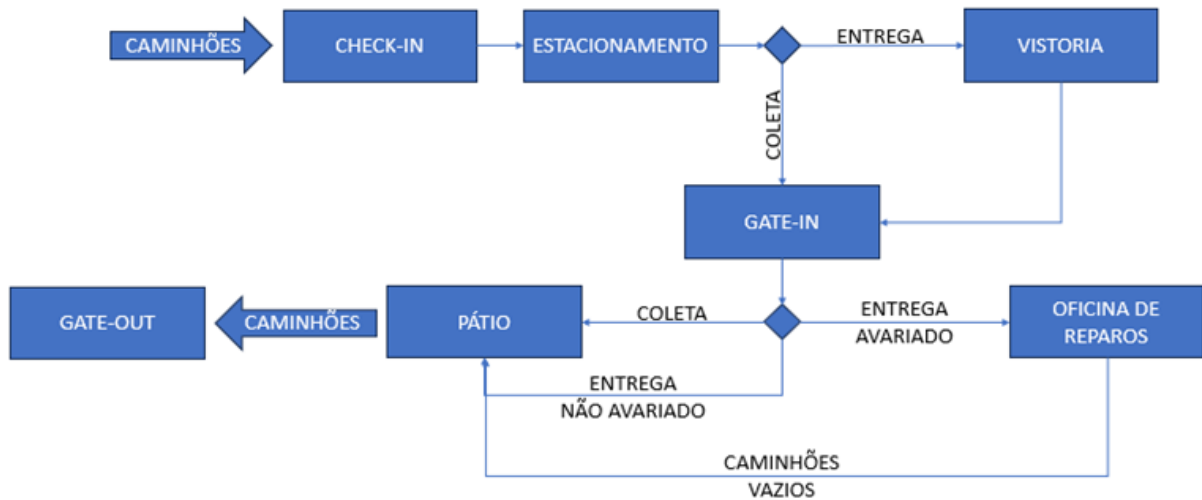
Esses representam os diversos agentes responsáveis por dar suporte nas atividades cotidianas de um terminal portuário. Alguns desses agentes são caracterizados como terminais retroportuários ao realizar tarefas principalmente de armazenagem, estufagem e manutenção ao mesmo tempo que facilitam a conexão com o modal rodoviário (BENEDECTI, 2022).

Dentre os terminais da retroárea, destaca-se os *depots*, esse agente funciona como um depósito para contêineres vazios uma vez que o acúmulo de contêineres em portos gera um grande congestionamento nas operações. Para compreender as operações relacionadas especificamente com o funcionamento de um terminal *depot*, detalha-se primeiro os principais locais e seus respectivos papéis de operação. Posteriormente, define-se também como os caminhões e motoristas transitam nesses locais de operação.

Logo, as principais operações de um terminal *depot* são realizadas em 5 locais, esses são detalhados da seguinte forma:

- Estacionamento, onde os caminhões aguardam atendimento e onde ocorrem as vistorias dos contêineres;
- Check-in, local onde os motoristas vão para se identificar e informar sua chegada;
- O Gate-in é o portão por onde os caminhões entram no terminal e são direcionados ao lugar específico onde deixam ou pegam o contêiner, nesse espaço também funciona o gate-out, por onde ocorre a saída;
- O Pátio é o local onde os contêineres ficam armazenados em pilhas;
- A Oficina realiza as operações de reparo em contêineres determinados pela vistoria.

Tendo os principais pontos de operações definidos, é necessário definir o fluxo seguido por um caminhão ao chegar no terminal que é representado visualmente na Figura 4. Existem 3 operações possíveis a retirada de um contêiner, a devolução de um contêiner não avariado e a devolução de um contêiner avariado, os 3 fluxos dessas operações estão condensados no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 – Fluxos possíveis em um *depot*

Fonte: (PINHO et al., 2023)

É interessante, ainda, detalhar o fluxo apresentado na Figura 4. Inicialmente, todos os caminhões chegam ao estacionamento e seus motoristas devem se encaminhar para o check-in, onde fazem suas identificações. Assim, dividem-se os motoristas entre aqueles que farão retiradas e os que farão uma entrega. No caso de retirada, o processo é simplificado e o caminhão pode se encaminhar para o gate-in e em seguida para o pátio, onde recolhe o contêiner, e, por fim, sai pelo gate-out. Já em casos de entrega, os motoristas aguardam no estacionamento para a vistoria do contêiner, a vistoria determina se o contêiner está avariado e deve ser levado à oficina ou se está íntegro e irá direto para o pátio. Com o resultado da vistoria, os caminhões seguem para o gate-in e depois para o local determinado pelo vistoriador, onde deixam o contêiner e se retiram pelo gate-out.

Essas são as atividades principais do terminal, nota-se que podem haver alterações entre diferentes terminais, mas em suma o processo é essencialmente o mesmo. Além dessas atividades de recebimento e despacho dos contêineres, no *depot* são realizados os reparos da oficina e outras movimentações necessárias para a organização e o bom funcionamento do terminal (ATM TRANSPORTE MULTIMODAL, 2022).

Essas movimentações são realizadas com o uso de máquinas específicas como as *reach stackers* que são empilhadeiras para o manuseio de contêineres. A Figura 5 mostra uma máquina desse gênero realizando a operação do manuseio de um contêiner.

Figura 5 – *Reach Stacker*

Fonte: (WIKIMEDIA COMMONS, 2024)

Como tais máquinas são as principais formas de movimentar um contêiner, são, também, as principais fontes de emissões dentro dos terminais. Dessa forma, torna-se relevante um estudo acerca das emissões relacionadas a esses terminais (FLYNN, M., 2014).

2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A evolução da sociedade e de seus processos promove o surgimento de problemas cada vez mais complexos para serem resolvidos. Uma vez que a complexidade é elevada, é necessário buscar soluções novas e melhores como o desenvolvimento de modelos de simulação computacional. Pode-se afirmar que a aplicação de simulações aumenta a confiabilidade das soluções geradas sem que ocorra desperdícios associados a implementações por tentativa e erro (BORSHCHEV A.; GRIGORYEV, 2015).

A simulação surge nesse contexto, possibilitando a análise de cenários realistas que tendem a prever acontecimentos futuros. No entanto, é importante lembrar que modelos tem graus de abstração, inclusos em virtude das simplificações adotadas na etapa de modelagem, sendo significativamente menos complexos do que os originais, mas ainda servindo como uma forma de auxílio na tomada de decisões conscientes (PEGAS, 2017).

Sabe-se que existem alguns tipos de simulações passíveis de aplicação em

contextos gerenciais e logísticos. Entre esses, pode-se destacar os sistemas dinâmicos, aplicados a gerenciamentos estratégicos com fluxos entre, por exemplo, estoques, eventos discretos, que consideram a operação como uma sequência de tarefas menores e, também, simulação por agentes. Destaca-se que a simulação baseada em agentes descreve um sistema através da interação dos componentes entre si e com o ambiente, podendo ser utilizada para simular processos produtivos ou sistemas complexos (BORSHCHEV A.; GRIGORYEV, 2015).

Afirma-se, entretanto, que existem etapas que antecedem tal construção, além de etapas muito importantes posteriores, as quais podem ser enumeradas na seguintes ordem: 1. definição do problema; 2. modelagem conceitual; 3. coleta de dados; 4. construção do modelo; 5. validação do modelo; 6. execução das simulações; 7. análise dos resultados. Todos os passos descritos servem para garantir confiabilidade e acertividade ao modelo a ser desenvolvido e, por fim, os resultados da execução de uma simulação de nasda servem sem serem aplicados a algum tipo de análise posterior (BORSHCHEV A.; GRIGORYEV, 2015).

Assim, a fim de iniciar o fluxo proposto, é necessário definir qual o problema que se deseja resolver e, em paralelo, para o que se busca uma resposta. A partir de tal questionamento, define-se que uma etapa de elaboração de um mapa conceitual tende a atuar como forma de delineamento da problemática e conseqüente entendimento do modelo, justificando sua posição inicial no fluxo (BORSHCHEV A.; GRIGORYEV, 2015).

Pode-se afirmar, então, que nesse mapa conceitual descrevem-se objetivamente as operações a serem implementadas no modelo e, a partir de tal, coletam-se os dados que servirão de input. Entre esses destacam-se os dados referentes a capacidade, estatísticas disponíveis e limitações sobre as operações realizadas (BORSHCHEV A.; GRIGORYEV, 2015).

Finalizada a etapa precedente de coleta de dados, viabiliza-se o início do desenvolvimento do modelo no software escolhido, acrescenta-se que a escolha do software também é uma etapa relevante já que este deve ser capaz de realizar as operações necessárias para obter a resposta e deve possuir as funcionalidades que permitam a construção da simulação (BALCI, 1990).

Destaca-se que a conclusão da modelagem não implica no fim do fluxo de desenvolvimento da simulação computacional, uma vez que necessita-se realizar testes com cenários reais que possam ter seus dados colhidos e comparados com os outputs do modelo a fim de verificar sua acuracidade (BALCI, 1990).

Essas validações garantem a coerência dos dados obtidos nas rodadas das simulações que buscarão resolver o problema definido anteriormente. Segundo Balci (BALCI, 1990) os resultados ainda precisarão ser interpretados para que possa-se compreender o que eles podem de fato dizer sobre a questão estudada, possibilitando

que o conhecimento gerado possa ser transmitido e aplicado para a tomada de uma decisão.

Delimitando-se as simulações para o ambiente portuário, aponta-se que, no tange às simulações logísticas no setor de transporte marítimo, Medina et al. (MEDINA et al., 2013) e Zhou et al. (ZHOU et al., 2021), afirmam que as abordagens voltam-se principalmente para o dimensionamento e planejamento aplicados em três diferentes processos: operação do terminal portuário, do transporte marítimo e da retroárea.

Dessa forma, observa-se uma possibilidade de aplicação da simulação na compreensão do comportamento das operações envolvidas em um terminal retroportuário. Existe um histórico de simulações na área que confirmam a eficiência da aplicação de modelagens baseadas em agentes para o setor como observado em Benedecti (BENEDECTI, 2022). Para além das simulações aplicadas ao setor naval, observa-se um expressivo histórico de simulações computacionais sendo utilizadas na investigação das emissões de GEE em sistemas logísticos (MARQUES, 2013).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a descrição dos métodos de pesquisa utilizados e as formulações adotadas para estimar as emissões provenientes do tráfego de caminhões e da utilização de maquinários, como *reach stackers*, na movimentação de contêineres em terminais *depots*. Descreve-se, também, a construção do modelo de simulação computacional desenvolvido por meio do *software* Anylogic, o qual permitirá a análise de diversos cenários operacionais e a comparação entre diferentes tipos de combustíveis e maquinários com o objetivo principal de identificar as operações mais eficientes, visando otimizar o desempenho ambiental dos terminais e reduzir a emissão de poluentes.

A Figura 6 apresenta um fluxograma com cada etapa que compõe a metodologia proposta e que são descritas nos 4 subtópicos do capítulo. É definido, primeiramente, o objeto de estudo que contextualiza os temas relevantes a serem aplicados na etapa seguinte de revisão bibliográfica. Posteriormente, é feita a sistematização do problema, ou seja, o desenvolvimento da estratégia aplicada na construção do modelo de simulação incluindo a modelagem conceitual e as premissas adotadas. Por fim, é descrito o processo de modelagem que determina os dados de input e output, a escolha do software e a criação dos layout e agentes, além de algumas considerações finais voltadas para as limitações do modelo e a validação feita a fim de assegurar a coerência da simulação realizada.

Figura 6 – Fluxograma das etapas da metodologia



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O presente estudo propõe o desenvolvimento de um modelo de simulação de agentes para estimar as emissões resultantes do tráfego de caminhões e da utilização de maquinários na movimentação de contêineres em terminais *depots*. Para tal, foram definidos os objetivos gerais e específicos, que são detalhados na Seção 1.1.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa de levantamento bibliográfico deste trabalho abordou temas relacionados à estimativa de emissões de poluentes, simulação computacional e redução de emissões em terminais *depots*. A pesquisa bibliográfica focou em identificar métodos e modelos com simulação de agentes que auxiliem na análise e redução das emissões decorrentes do tráfego de caminhões e da utilização de maquinários, como *reach stackers*, em terminais de *depots*.

Definido o escopo da pesquisa, foram realizadas buscas em trabalhos acadêmicos para avaliar as abordagens existentes na literatura sobre a otimização das operações de transportes de contêineres em *depots* com o intento de melhorar o desempenho ambiental destes. O objetivo desta busca foi identificar estudos que utilizem modelagens baseadas em agentes, aplicadas a cenários de *depots* e terminais de contêineres, especialmente aqueles voltados para a redução de emissões e a otimização de operações logísticas.

Utilizou-se a base de dados Scopus com a combinação das seguintes palavras-chave, incluídas no título, resumo e palavras-chave: "Depot", "Inland terminal", "Emissions", "Simulation" e "AnyLogic". Para garantir a credibilidade das fontes, a busca foi restrita a artigos e conference papers a partir de 2010, resultando na identificação de 82 documentos relevantes.

Após a leitura dos títulos e resumos dos trabalhos pré-selecionados, foram excluídos 70 documentos que, embora tangenciassem o objetivo da pesquisa, não estavam diretamente relacionados ao foco específico do estudo. Dos 12 documentos restantes, 10 artigos abordavam a utilização de modelos de simulação para a resolução de problemas de otimização. Outros 2 artigos aplicavam métodos analíticos de otimização de operações em terminais, focando na redução de emissões.

Por fim, 4 artigos foram identificados como altamente relevantes, pois aplicavam modelos de simulação de agentes com o objetivo de reduzir emissões e otimizar operações internas, ainda que não exclusivamente em *depots*. Estes estudos fornecem uma base sólida para o desenvolvimento da metodologia proposta, uma vez que utilizam técnicas similares de simulação computacional e análises de eficiência ambiental.

A Tabela 1 apresenta os 12 artigos selecionados dentre os 82 encontrados inicialmente. Para esses documentos, foi feita uma análise dos problemas abordados e dos métodos de solução aplicados, tal análise permitiu a seleção final de 4 artigos principais para o desenvolvimento desse trabalho.

Tabela 1 – Revisão bibliográfica

Título	Método	Autores	Ano
A conceptual framework for agent-based modelling of logistics services	Modelagem baseada em agentes	Matthew J. Roorda, Rinaldo Cavalcante, Stephanie McCabe, Helen Kwan	2010
Financial and environmental impacts of hypothetical Finnish dry port structure	Modelo analítico	Ville Henttu, Olli-Pekka Hilmola	2011
An integrated shipment planning and storage capacity decision under uncertainty: A simulation study.	Análises estatísticas	Pujawan, et al.	2015
A simulation-based genetic algorithm approach for reducing emissions from import container pick-up operation at container terminal	Modelo Analítico	Chen, Gang Nielsen, Izabela Do, Ngoc	2016
Simulation study of different yard and crane side operations at a container terminal	Modelagem baseada em agentes	Valls, Xavier.	2018
A systems analysis of empty container logistics a case study of Melbourne, Australia	Modelagem baseada em agentes	Lucille Gusah, Robert Cameron-Rogers, Russel G. Thompson	2019
An intelligent decision support system prototype for hinterland port logistics	Modelo multi agentes de otimização	Elnaz Irannezhad, Carlo G. Prato, Mark Hickman	2020
Avaliação Operacional e Econômica de um Serviço Hidroviário na Cadeia Logística do Porto de Itapoá	Modelagem baseada em agentes	Benedecti, Raiza.	2022
A freight asset choice model for a gent-based simulation models	Modelagem baseada em agentes	Natalia Zuniga-Garcia, Abdelrahman Ismael, Monique Stinson	2023
Assessing the eco-efficiency benefits of empty container repositioning strategies via dry ports	Modelo multi paradigma: baseado em agentes e eventos discretos	Juan Pablo Castellon, Ivan Sanchez-Diaz, Violeta Roso, Ceren Altuntas-Vural, Sara Rogerson, Vendela Santén, Lokesh Kumar Kalahasthi	2023
A Sustainable Port-Hinterland Container Transport System: The Simulation-Based Scenarios for CO2 Emission Reduction	Modelagem baseada em agentes	Shi, Wenming Zhang, Wei Hasan, Rasel	2023
Assessing the eco-efficiency benefits of empty container repositioning strategies via dry ports	Modelagem baseada em agentes e Eventos Discretos	Castrellon, et al.	2023

Fonte: Elaboração própria (2024).

Devido à maior relevância e proximidade com o tema central deste trabalho, os 4 artigos que aplicam diretamente simulações e otimizações em *depots* foram destacados em negrito e serviram como base referencial para o desenvolvimento da

metodologia proposta.

Além dos artigos encontrados durante a revisão bibliográfica aplicada especificamente na base Scopus, o trabalho tem como referencial principal um artigo intitulado “Simulação computacional aplicada a terminais *depot*”. Esse detalha a construção de um modelo de simulação computacional baseada em agentes utilizando o software AnyLogic para o estudo do atendimento de caminhões em um terminal *depot* (PINHO et al., 2023).

3.3 SISTEMATIZAÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO

Ao longo desse tópico, objetiva-se descrever as etapas e processos envolvidos na pré-concepção da modelagem lógica e matemática do problema de estimativa de emissões em terminais *depots*. Foi detalhado o desenvolvimento da modelagem conceitual que guia o modelo de simulação, destacando os fluxogramas que apoiam a estruturação da modelagem e a lógica que fundamenta as expressões matemáticas utilizadas.

Inicialmente, apresenta-se a caracterização do problema alvo do estudo e suas particularidades. Segue-se, então, com a definição da estrutura conceitual do modelo, que inclui a definição dos parâmetros e variáveis relevantes, como tipos de combustíveis, características dos veículos e equipamentos, e cenários operacionais considerados.

Em seguida, define-se as etapas de desenvolvimento do modelo de simulação, que visa detalhar os processos e tarefas. Os fluxogramas apresentados ilustram o processo de desenvolvimento e implementação do modelo de simulação no AnyLogic. Esses diagramas mostram as etapas sequenciais, desde a coleta de dados iniciais e a definição dos cenários, até a execução das simulações e a análise dos resultados.

Por fim, desenvolve-se a modelagem conceitual do problema, discutindo-se a formulação das expressões matemáticas que são utilizadas para estimar as emissões de poluentes com base nas operações simuladas. Adicionalmente, a lógica de otimização empregada no modelo é exposta com base nos fluxos inclusos na simulação.

3.3.1 Etapas de desenvolvimento da simulação

Neste tópico, o objetivo é descrever as etapas e processos envolvidos na pré-concepção da modelagem lógica e matemática do problema de estimativa de emissões em terminais de *depot*.

Propõe-se, então, o desenvolvimento de uma matriz de decisão (MD) que rege a escolha das tarefas desenvolvidas ao longo do projeto. O resultado de tal sub tarefa pode ser observado na Figura 7, sendo que as instruções de preenchimento da matriz

contavam com o preenchimento da matriz de decisão linha por linha, assumindo o valor 1 se o processo vertical precisar ser realizado/determinado antes do processo horizontal.

O preenchimento da matriz de decisão auxiliou o processo de definição da ordem de realização das tarefas gerais e dos processos inclusos no desenvolvimento do modelo de simulação, de modo que os parâmetros com maior somatória devem ser implementados de maneira antecedente aos demais. Além disso, a matriz revela os processos que podem ser implementados em paralelo, facilitando o processo de codificação e criação do modelo.

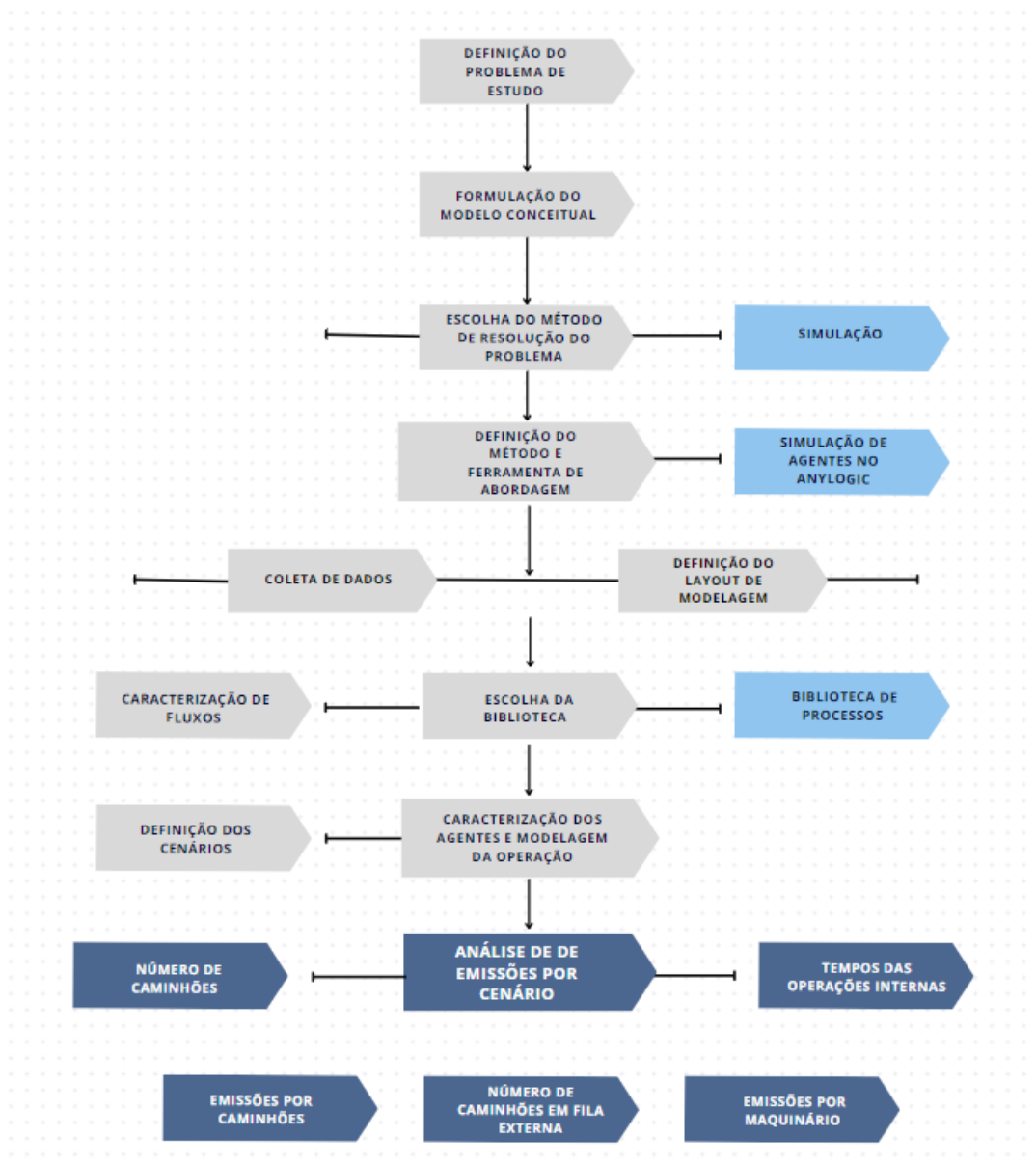
Figura 7 – Matriz de decisão

Matriz de Decisão											
Etapas	Definição do método e software	Modelagem Conceitual	Coleta de Dados	Definição do Layout da operação	Definição de Agentes	Definição de Fluxos	Definição dos cenários alternativos	Equacionamento de emissões	Testes de limitações do Modelo	Testes de custo computacional	Soma
Definição do método e software	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
Modelagem Conceitual	0	X	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Coleta de Dados	0	0	X	0	1	1	1	1	1	1	6
Definição do Layout da operação	0	0	0	X	1	1	1	0	1	1	5
Definição de Agentes	0	0	0	0	X	0	0	0	1	1	2
Definição de Fluxos	0	0	0	0	0	X	0	0	1	1	2
Definição dos cenários alternativos	0	0	0	0	0	0	X	0	1	1	2
Equacionamento de emissões	0	0	0	0	0	0	0	X	1	1	2
Testes de limitações do Modelo	0	0	0	0	0	0	0	0	X	1	1
Análises comparativas de cenários	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a definição e implementação da matriz de decisão, procedeu-se com a elaboração de um fluxograma detalhando as etapas específicas do desenvolvimento do modelo de simulação proposto. Este fluxograma, apresentado na Figura 8, desempenha um papel fundamental ao fornecer uma visão estruturada e visual do processo de desenvolvimento do modelo.

Figura 8 – Fluxograma de desenvolvimento do modelo de simulação



Fonte: Elaboração própria (2024).

No fluxograma, as diferentes fases do desenvolvimento do modelo são delineados os inputs, outputs e os passos essenciais de implementação. Na fase de coleta de dados, são englobados os principais inputs, abrangendo informações cruciais sobre a infraestrutura do terminal *depot*, as características dos veículos e equipamentos e as variações para os cenários operacionais considerados. Em seguida, os passos subsequentes do desenvolvimento do modelo são apresentados de maneira sequencial e lógica, delineando o processo de tomada de decisão que orienta a construção do modelo.

É importante ressaltar que, no fluxograma, as principais decisões na construção do modelo são destacadas nos blocos em azul claro, enquanto os blocos de cor azul escuro representam as saídas e os outputs gerados. Por fim, os blocos em cinza

representam os passos de implementação lógica do modelo criado, completando assim a representação visual das etapas do desenvolvimento do modelo.

Essa representação visual e estruturada das etapas específicas do desenvolvimento do modelo proporciona uma compreensão clara e organizada do processo de implementação, contribuindo significativamente para a eficácia e eficiência da construção do modelo.

3.3.2 Caracterização do problema

A problemática estudada surgiu como proposta de um projeto de iniciação científica, derivado da necessidade de compreensão e melhoria das operações nos *depots* de cargas dry, visando não apenas a eficiência operacional, mas também a redução das emissões de poluentes. Como mencionado anteriormente, os *depots* desempenham um papel crucial na cadeia logística, atuando como pontos de transição para cargas entre diferentes modais de transporte, como rodoviário, ferroviário e marítimo. No entanto, esses enfrentam diversos desafios operacionais que podem afetar sua eficiência e sustentabilidade ambiental.

Para aprofundar a compreensão desses desafios, foram realizadas visitas técnicas ao *Depot* ATM em Itapoá (Figura 9), localizado na região norte de Santa Catarina. Durante essas visitas, observou-se de perto o funcionamento das operações diárias, incluindo a movimentação de cargas e a gestão dos recursos logísticos. As visitas possibilitaram a identificação de áreas críticas e gargalos operacionais, como a constância de filas de veículos na parte externa do *depot*, indicando possíveis ineficiências na entrada e saída de caminhões.

Figura 9 – *Depot* ATM



Fonte: (ATM TRANSPORTE MULTIMODAL, 2022)

Observou-se, ademais, que a operação de movimentação interna de contêineres cria uma necessidade de uso intensivo de maquinários como empilhadeiras, *reach stackers* e guindastes. Esses equipamentos consomem combustíveis fósseis e emitem poluentes atmosféricos, agravando os problemas ambientais e de saúde pública. A análise detalhada das operações no *Depot* ATM revelou que a falta de planejamento adequado pode resultar em congestionamentos e atrasos nas entregas, aumentando os tempos de espera dos caminhões e maquinários e, conseqüentemente, as emissões de poluentes.

Além das visitas técnicas, uma revisão bibliográfica criteriosa foi conduzida para mapear os layouts mais comuns nos *depots*, bem como os equipamentos e maquinários utilizados. A busca na literatura forneceu uma visão ampla de diferentes layouts para *depots* de cargas dry, além de destacar os principais desafios ambientais associados ao uso de equipamentos movidos a combustíveis fósseis.

3.3.3 Cenário propostos

Para este estudo das emissões nos terminais, são considerados o cenário base e 4 cenários alternativos à operação atual do *depot*, cada cenário alternativo possui variações internas para gerar uma distribuição nas análises e maior entendimento dos fatores das emissões. Os parâmetros alterados são o tipo do combustível, que muda sua densidade e fator de emissão, e as máquinas empregadas, o que afeta os consumos de combustíveis destas. A Figura 10 resume os números empregados em cada cenário definido, a escolha e a fonte de cada um é apresentada a seguir.

Figura 10 – Cenários considerados no estudo

Cenário	Base	Alternativo 1	Alternativo 2	Alternativo 3	Alternativo 4
Densidade	0,847	0,847	0,832	0,832	0,74
Fator de emissão	3,86	3,86	3,74	3,74	2,75
Consumo das Reach Stackers	13	12,5	13	12,5	0
Rendimento dos Caminhões	2,09	3,16	2,09	3,16	3,6

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a definição dos cenários na Figura 10, inicia-se o detalhamento dos números selecionados para cada um dos cenários, para isso a Figura 11 apresenta as fontes das grandezas utilizadas.

Figura 11 – Detalhes cenário base

Cenário	Base	Alternativo 1	Alternativo 2	Alternativo 3	Alternativo 4
Densidade	Diesel padrão EUA (SFC, 2023)	Diesel padrão EUA (SFC, 2023)	Diesel padrão Europa (SFC, 2023)	Diesel padrão Europa (SFC, 2023)	GNV para veículos pesados (IPCC, 2006)
Fator de emissão	Diesel padrão EUA (SFC, 2023)	Diesel padrão EUA (SFC, 2023)	Diesel padrão Europa (SFC, 2023)	Diesel padrão Europa (SFC, 2023)	GNV para veículos pesados (IPCC, 2006)
Consumo das Reach Stackers	Liebherr: LRS 545-31 Toplift (LIEBHERR, c2024)	Kalmar: Eco ReachStacker (KALMAR, c2021a)	Liebherr: LRS 545-31 Toplift (LIEBHERR, c2024)	Kalmar: Eco ReachStacker (KALMAR, c2021a)	Kalmar: ReachStacker Eletric (KALMAR, c2021b)
Rendimento dos Caminhões	Mercedes-Benz: Actros (SAVANA, c2024)	Média ANTT (ANTT, 2024)	Mercedes-Benz: Actros (SAVANA, c2024)	Média ANTT (ANTT, 2024)	GNV para veículos pesados (IPCC, 2006)

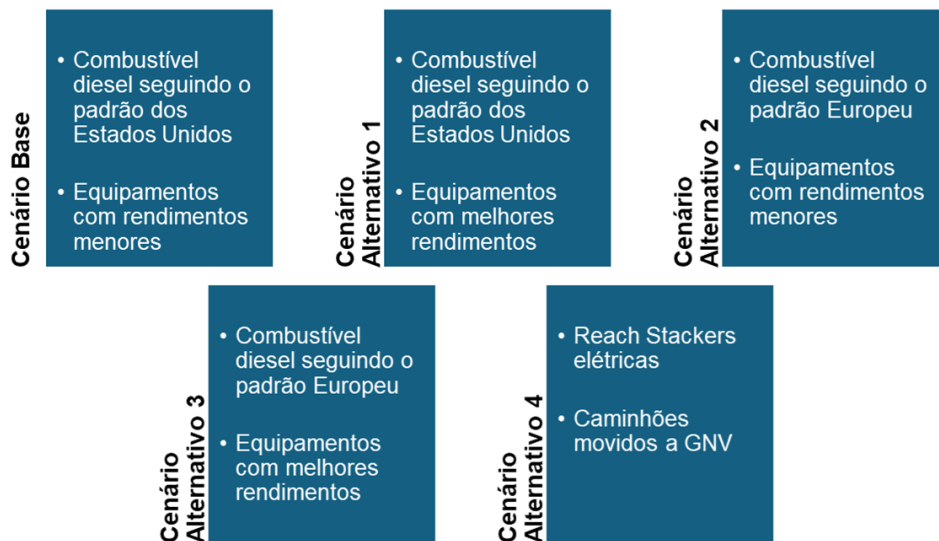
Fonte: Elaboração própria (2024).

A Figura 11 apresenta um detalhamento dos parâmetros de cada cenário para combustíveis, caminhões e *reach stackers*. Para combustíveis são utilizados 2 tipos de diesel, um seguindo os padrões norte americanos e o outro os padrões europeus, e ainda GNV, um combustível menos poluente em comparação ao diesel.

Em questões de veículos, para os caminhões, alternou-se entre rendimentos de um modelo da marca Mercedes-Benz, uma média publicada pela ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestre - para veículos a diesel e uma média do IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - para veículos pesados movidos a gás natural. Já para as máquinas, utilizou-se 3 modelos sendo eles: uma Liebherr LRS 545-31 Toplift a diesel, a Eco ReachStacker da Kalmar a diesel e a ReachStacker Eletric, também da Kalmar.

Abaixo, verifica-se a Figura 12 que representa as principais diferenças entre os cenários base e alternativos.

Figura 12 – Operação atual e cenários alternativos



Fonte: Elaboração própria (2024).

Destaca-se, ademais, que a escolha dos maquinários para substituição no *depot* considera que o investimento não será um impedimento para a troca da frota de *reach stackers* que, por sua vez, são escolhidas de acordo com os padrões de emissões mais reduzidos e até nulos, como no caso de máquinas totalmente elétricas. Ressalta-se, ainda, que as emissões diretas de uma máquina elétrica são nulas uma vez que não há queima de combustíveis, entretanto, em um estudo aprofundado, é necessário considerar a fonte de produção da eletricidade gasta.

3.3.4 Desenvolvimento do modelo conceitual

Uma vez caracterizado o problema de estudo, deu-se início à construção do modelo conceitual a ser utilizado na elaboração do modelo de simulação. Sendo uma versão inicial de representação conceitual, ele independe da linguagem ou do *software* a serem empregados (PEREIRA; L., 2010).

Definem-se aqui, então, o escopo, as premissas e as simplificações a serem considerados. No que tange ao escopo, no modelo de simulação desenvolvido, não foi considerada a operação de transportes de contêineres estufados, focando apenas nos contêineres vazios, enquanto os processos internos dos *depots* e terminais portuários são representados através de tempos genéricos baseados em distribuições estatísticas, conforme dados coletados em visitas técnicas, conversas e entrevistas com profissionais do setor.

Para o modelo, os caminhões e os maquinários seguem um fluxo pré-definido, contendo 3 variações de rotas internas entre cada ponto da operação (estacionamento de maquinários, estacionamento de caminhões, pátio, pátio da oficina e gate-out), refletindo a simplificação da operação atual que não possui rotas definidas para tal movimentação. Além disso, os maquinários são movidos a combustíveis fósseis e seguirão as equações de emissões mencionadas neste trabalho.

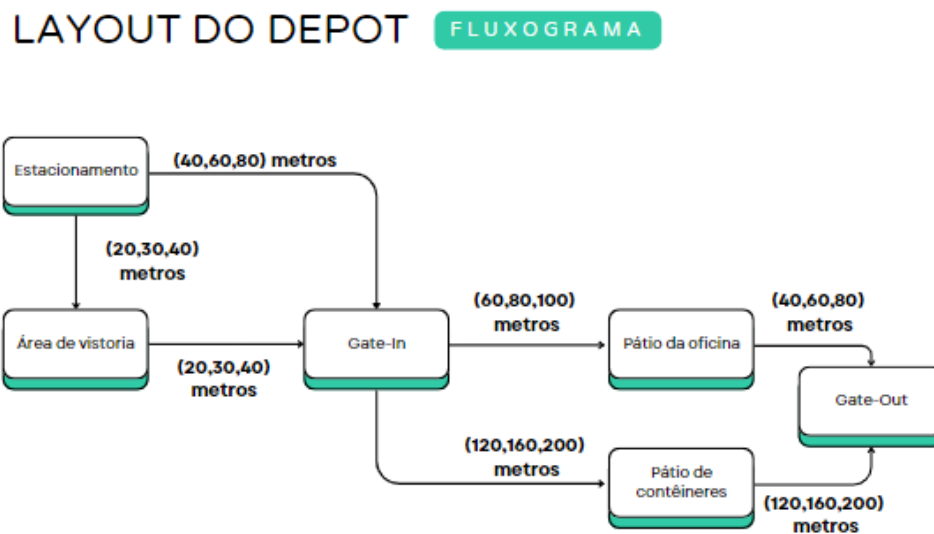
No caso das movimentações das máquinas, o *depot* precisa informar aos operadores de *reach stackers* sobre a necessidade de movimentação de contêineres, e o operador disponível e mais próximo dirige-se para a movimentação, considerando-se um ponto fixo de espera para os maquinários e as três variações internas de rotas anteriormente mencionadas. Além disso, os contêineres são transportados por caminhões que fazem um trajeto com possibilidades de variações internas caso seja necessário realizar manutenções nos contêineres.

Outro aspecto a ser citado é a viabilização de uma operação mais otimizada na oficina de manutenção de contêineres, considerando uma movimentação atrelada ao horário de funcionamento deste local de serviço. Com isso, pode-se adotar um planejamento de pátio que aloque os contêineres ao longo da faixa da oficina, dentro do alcance dos *reach stackers*, com a chegada apenas em horário de funcionamento e

ordem de prioridade.

Com a localização do *depot* definida e as movimentações especificadas, foi realizado seu dimensionamento e layout, levando em consideração parâmetros visualizados na literatura e nas visitas técnicas ao *depot*. A Figura 13 apresenta um resumo dos itens de infraestrutura para seu layout básico.

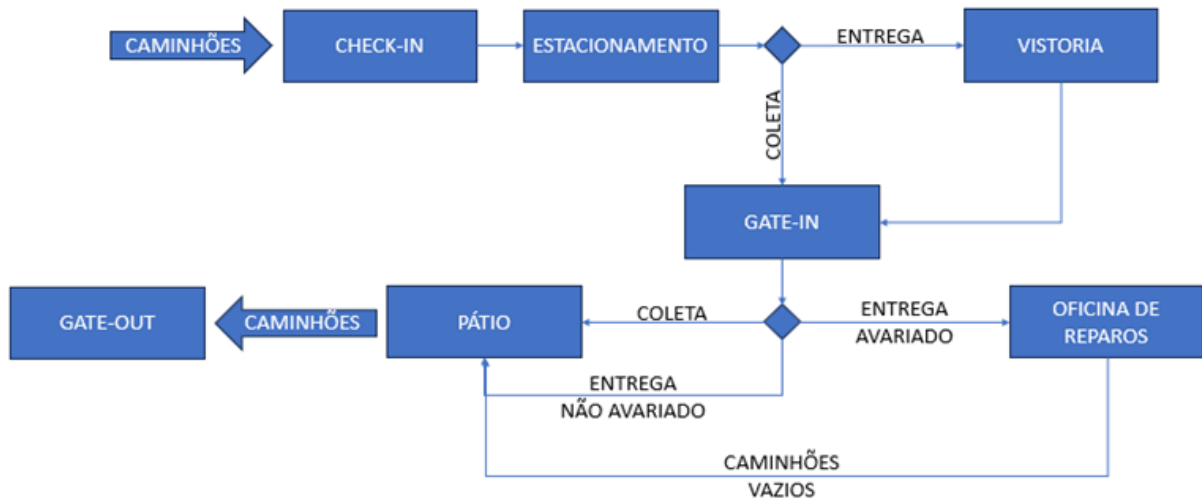
Figura 13 – Layout do *depot*



Fonte: Elaboração própria (2024).

Para proporcionar um melhor entendimento do modelo de simulação, a Figura 14 apresenta o modelo conceitual elaborado por (PINHO et al., 2023) para o estudo desenvolvido anteriormente. O modelo foi inicialmente desenvolvido visando o estudo da eficiência no tempo de atendimento dos caminhões que fazem entrega e coleta de contêineres no *depot*. As saídas do modelo permitem a compreensão dos pontos onde há gargalos que geram atrasos no atendimento.

Figura 14 – Modelo Conceitual



Fonte: (PINHO et al., 2023)

Apesar dos objetivos diferentes, o conceito das operações no terminal não mudam, por isso a modelagem conceitual segue a mesma lógica proposta acima. As principais diferenças estão nos cenários de emissões detalhados a seguir e na implementação de diferentes rotas para caminhões e máquinas na simulação, além de ajustes pontuais que refinaram a modelagem e trouxeram maior coerência para os resultados.

3.3.5 Estratégias e simplificações adotadas

Definidas as condições a serem aplicadas, a fim de desenvolver um modelo de simulação das operações em um *depot* de cargas dry, foram consideradas as seguintes estratégias e simplificações:

- A equação de emissão de CO₂ foi definida de acordo com (BARROS et al., 2018):

$$\text{Emissão}_{CO_2} [kg] = \frac{\text{km}_{rodado} [km]}{\text{rendimento} \left[\frac{km}{L} \right]} \times \text{fator emissão}_{CO_2} \left[\frac{kg}{L} \right] \quad (1)$$

- O fluxo de caminhões e equipamentos segue uma direção única, definida de acordo com os padrões dos *depots* estudados, a fim de minimizar conflitos e melhorar a eficiência.
- Cada caminhão possui uma função pré-concebida (coleta ou entrega), não considerando-se a possibilidade de realizar mais de uma função ao longo da simulação.
- Todas as unidades de carga (contêineres vazios) são de tamanho padronizado. A capacidade máxima de empilhadeiras e *reach stackers* é considerada uniforme, limitando o número de unidades que podem ser movimentadas em uma única operação. Dado que os equipamentos utilizados possuem capacidade para manejar a carga proposta, restrições adicionais de peso não são aplicáveis.

- Após iniciar a operação, cada veículo (por exemplo, caminhão ou empilhadeira) seguirá sua rota pré-definida sem interrupções até completar o ciclo. A duração de cada parada independe da quantidade de carga, assegurando que todas as rotas tenham tempos de operação consistentes.
- A demanda por movimentação de contêineres vazios em cada ponto do *depot* é conhecida e não sofre variações durante o período de estudo. Isso permite uma programação precisa e evita imprevistos operacionais.
- Cada caminhão transporta apenas um contêiner por vez, simplificando o processo de carga e descarga e facilitando a gestão das operações.
- Os caminhões sempre surgem durante o horário programado de funcionamento do *depot* e permanecem em fila até serem atendidos, garantindo um fluxo contínuo de veículos e minimizando tempos ociosos.
- Utiliza-se como premissa que sempre haverá espaço no *depot* para receber um contêiner de entrega e sempre haverá um contêiner para ser recebido pelos caminhões de coleta, assegurando a continuidade e eficiência das operações.
- Os tempos de transporte, deslocamentos e realizações de manutenções foram estimados a partir de distribuições triangulares, utilizando os valores máximo, médio e mínimo indicados na coleta de dados, para representar a variabilidade real das operações.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Esta seção apresenta as etapas desenvolvidas ao longo da criação do modelo de simulação de agentes, visando explicitar os processos de pré-concepção, concepção e validação do modelo proposto.

3.4.1 Inputs e outputs esperados

Para a realização desta etapa, foram coletados dados essenciais junto ao *Depot* ATM (2022), mediante visitas técnicas, conversas e reuniões com gestores e profissionais da área. Essas interações permitiram uma análise aprofundada da operação, um melhor entendimento das funções de cada agente nas movimentações internas do *depot*, bem como a coleta de informações sobre o layout e dados da operação interna necessários para a elaboração da simulação. Adicionalmente, foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre diversos layouts e operações em *depots* de contêineres de carga dry.

A Tabela 2 apresenta as informações aplicadas ao modelo de simulação que será comum a todos os cenários propostos a seguir. Informações como velocidade média dos caminhões, tempo de atendimento no *depot*, tempo de manobra e deslocamento, e manutenção de contêineres foram estimados a partir dos bancos de

dados do *Depot* ATM e das pesquisas bibliográficas realizadas.

Tabela 2 – Inputs para simulação

Parâmetros	Valores	Unidades
Caminhões agendados por hora	20	Caminhões
Capacidade do estacionamento por gate	30	Caminhões
Quantidade de gates	4	Unidades
Tempo de duração da vistoria (curto, normal, longo)	(1, 5, 7)	Minutos
Quantos vistoriadores existem	4	Pessoas
Quantos equipamentos existem para a retirada do contêiner do caminhão	4	Equipamentos
Quanto tempo leva a liberação do caminhão no gate out (curto, normal, longo)	(1, 3, 5)	Minutos
Quais os tempos usuais de reparo (curto, normal, longo)	(1, 3, 5)	Horas
Em quantos contêineres a oficina trabalha simultaneamente	6	Contêineres

Fonte: Elaboração própria (2024).

Conforme mencionado anteriormente, conferiu-se variabilidade aos tempos adotados por meio de distribuições triangulares dos valores coletados, garantindo uma representação mais realista das operações. A precisão desses valores é crucial para o desenvolvimento de um modelo de simulação que represente um cenário calibrado com a operação real do *depot*.

Dado o objetivo da pesquisa, propõe-se cenários diferentes com o intuito de compreender como tais mudanças impactam nos números de emissões encontrados. Para isso são necessários parâmetros de consumo e informações dos combustíveis, estes foram consultados em artigos científicos e manuais de fabricantes. A Tabela 3 sintetiza essas grandezas para o cenário base que considera um diesel padrão Estados Unidos e máquinas com baixos rendimentos.

Tabela 3 – Inputs para o cenário base

Parâmetros	Valores	Unidades
Consumo médio de diesel das <i>reach stackers</i>	13	L/h
Densidade do Diesel	0,847	kg/L
Fator de emissão do CO ₂	3,86	kg de CO ₂ /kg de diesel
Rendimento médio do caminhão	2,09	Km/L de diesel

Fonte: Elaboração própria (2024).

Destaca-se, em virtude das diferenciações entre as unidades da equação de emissões aqui adotada e dos parâmetros de input, a necessidade de realizar algumas conversões. Para as *reach stackers* adotadas no cenário base são realizadas as seguintes conversões a fim de obter a Equação final para o cálculo de emissões

(Equação 5):

$$\text{Consumo total de diesel [L]} = C_{Comb} \cdot T_{Uso} \quad (2)$$

$$\text{Massa de diesel [kg]} = \text{Consumo total de diesel [L]} \cdot D_{Diesel} \quad (3)$$

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = \text{Massa de diesel} \cdot E_{Fator} \quad (4)$$

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = (13 \cdot T_{Uso}) \cdot 0,847 \cdot 3,86 \quad (5)$$

Para os caminhões, utiliza-se um procedimento semelhante para obter a seguinte Equação 6:

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = \frac{Km_{Rodado}}{2,09} \cdot 0,847 \cdot 3,86 \quad (6)$$

Para o cenário alternativo 1, é proposta uma mudança na frota para contemplar veículos menos poluentes, entretanto é mantido o diesel padrão Estados Unidos conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Inputs para o cenário alternativo

Parâmetros	Valores	Unidades
Consumo médio de diesel das <i>reach stackers</i>	12,5	L/h
Densidade do Diesel	0,847	kg/L
Fator de emissão do CO ₂	3,86	kg de CO ₂ /kg de diesel
Rendimento médio do caminhão	3,16	Km/L de diesel

Fonte: Elaboração própria (2024).

De maneira semelhante ao apresentado anteriormente, é possível montar as seguintes Equações de emissão (7 e 8), para *reach stackers* e caminhões, respectivamente.

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = (12,5 \cdot T_{Uso}) \cdot 0,847 \cdot 3,86 \quad (7)$$

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = \frac{Km_{Rodado}}{3,16} \cdot 0,847 \cdot 3,86 \quad (8)$$

No cenário alternativo 2, opta-se por atualizar os dados que dizem respeito ao padrão do diesel, seguindo um padrão europeu menos poluente. Entretanto, são mantidos os consumos de menor eficiência vistos no cenário base (Tabela 5).

Tabela 5 – Inputs para o cenário alternativo 2

Parâmetros	Valores	Unidades
Consumo médio de diesel das <i>reach stackers</i>	13	L/h
Densidade do Diesel	0,832	kg/L
Fator de emissão do CO ₂	3,74	kg de CO ₂ /kg de diesel
Rendimento médio do caminhão	2,09	Km/L de diesel

Fonte: Elaboração própria (2024).

Tais alterações refletem nas equações anteriores resultado nas Equações 9 - para *reach stackers* - e 10 - para caminhões.

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = (13 \cdot T_{Uso}) \cdot 0,832 \cdot 3,74 \quad (9)$$

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = \frac{Km_{Rodado}}{2,09} \cdot 0,832 \cdot 3,74 \quad (10)$$

Para o terceiro cenário alternativo, são combinadas as alterações dos cenários 1 e 2 reduzindo o fator de emissão dos maquinários e melhorando suas relações de consumo de combustível (6).

Tabela 6 – Inputs para o cenário alternativo 3

Parâmetros	Valores	Unidades
Consumo médio de diesel das <i>reach stackers</i>	12,5	L/h
Densidade do Diesel	0,832	kg/L
Fator de emissão do CO ₂	3,74	kg de CO ₂ /kg de diesel
Rendimento médio do caminhão	3,16	Km/L de diesel

Fonte: Elaboração própria (2024).

As mudanças acima resultam, por fim, nas Equações 11 e 12, para *reach stackers* e caminhões, respectivamente.

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = (12,5 \cdot T_{Uso}) \cdot 0,832 \cdot 3,74 \quad (11)$$

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = \frac{Km_{Rodado}}{3,16} \cdot 0,832 \cdot 3,74 \quad (12)$$

Já para o último cenário alternativo, são utilizadas fontes alternativas de energia para as máquinas estudadas implicando em mudanças mais drásticas. Como alternativa para as *reach stackers*, são implementadas máquinas elétricas que, portanto, não possuem emissões durante o funcionamento e não possuem prejuízos em questões de autonomia de bateria e velocidade (KALMAR, c2021). Para os caminhões é assumido o uso de GNV como combustível de acordo com os consumos e fatores de emissão explícitos na Tabela 7.

Tabela 7 – Inputs para o cenário alternativo 4

Parâmetros	Valores	Unidades
Densidade do GNV	0,74	kg/m ³
Fator de emissão do CO ₂	2,75	kg de CO ₂ /kg de GNV
Rendimento médio do caminhão	3,6	Km/m ³ de GNV

Fonte: Elaboração própria (2024).

No caso do cenário alternativo 4, não há emissões relacionadas às *reach stackers*, logo não será necessária uma equação. Entretanto, para os caminhões, a equação empregada anteriormente foi readaptada para considerar os novos parâmetros (13).

$$\text{EmissãoCO}_2 \text{ [kg]} = \frac{Km_{Rodado}}{3,6} \cdot 0,74 \cdot 2,75 \quad (13)$$

Os outputs esperados para todos os cenários incluem o número de caminhões que visitaram o *depot* no período da análise, os tempos entre cada uma das operações, a quantidade de emissões realizadas por cada tipo de veículo e as emissões totais por período. Os outputs detalhados podem ser verificados na Tabela 8.

Tabela 8 – Outputs esperados

Output	Unidades
Emissões totais (Caminhões)	Kg
Emissões totais (<i>reach stackers</i>)	Kg
Emissões totais	Kg
Número de veículos recebidos	Caminhões
Número de veículos atendidos	Caminhões
Distância total percorrida pelos caminhões	Quilômetros
Distância média percorrida pelos caminhões	Quilômetros
Tempo total de uso das <i>reach stackers</i>	Horas
Tempo médio de uso das <i>reach stackers</i>	Horas
Tempo médio de permanência	Minutos
Tempo médio na fila	Minutos
Tempo médio no check-in	Minutos
Tempo médio de vistoria	Minutos
Tempo médio até a entrada	Minutos
Tempo médio no gate-in	Minutos
Tempo médio na oficina	Minutos
Tempo médio no pátio	Minutos
Tempo médio no gate-out	Minutos
Tempo médio de atendimento interno	Minutos

Fonte: Elaboração própria (2024).

3.4.2 Definição da ferramenta de simulação

Durante a etapa de simulação optou-se por utilizar a simulação baseada em agentes para a construção do presente modelo. Tal escolha justifica-se pela flexibilidade deste modelo de simulação, controle de movimentos e possibilidades de parametrizações para representar os agentes dinâmicos inclusos nos processos de um *depot*, como contêineres, caminhões e maquinários.

O *software* escolhido para o desenvolvimento do modelo, por sua vez, foi o Anylogic® (versão 8.8.4), escolha baseada na prévia experiência com as ferramentas e lógicas empregadas neste. Por fim, destaca-se que foram utilizados unicamente elementos da biblioteca de processos do Anylogic para construção do modelo.

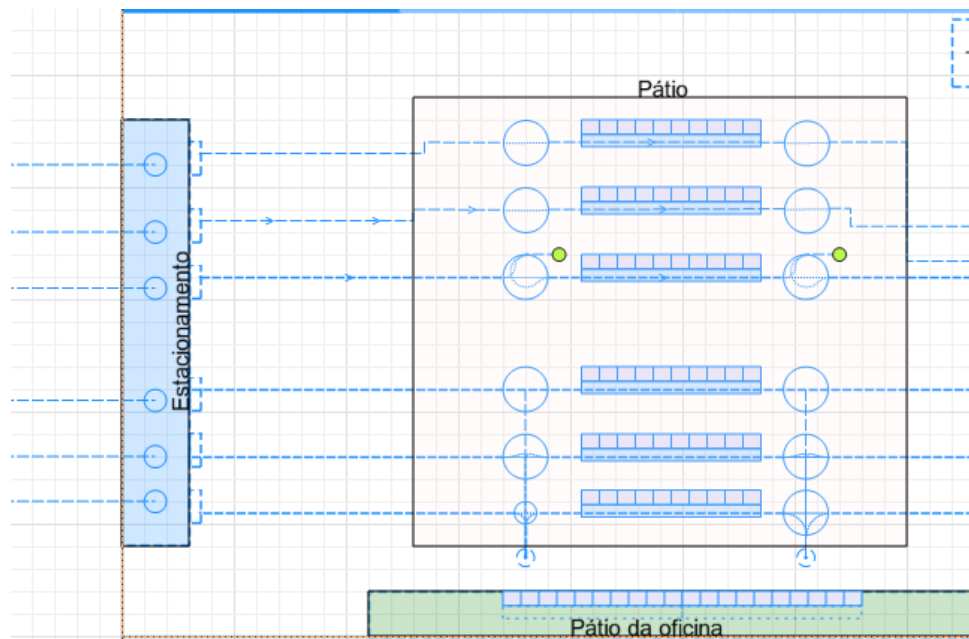
3.4.3 Layout

Em relação à modelagem do layout do *depot* aqui retratado, foram utilizados os seguintes elementos de marcação de espaço da biblioteca *Process Modeling Library* do *software* Anylogic:

- *Paths*: Utilizados para definir as linhas que os caminhões e *reach stackers* utilizarão para se movimentar ao longo do *depot*.
- *Point nodes*: Utilizados para criar os pontos em que os *reach stackers* irão carregar e descarregar os contêineres.
- *Rectangular Node*: Utilizado para criar as zonas que definem onde os caminhões estacionam para carregar ou descarregar os contêineres.
- *Attractors*: Definem a posição dos veículos dentro dos *Rectangular Node*.
- *Pallet Rack*: Utilizado para criar as zonas em que os contêineres serão armazenados.

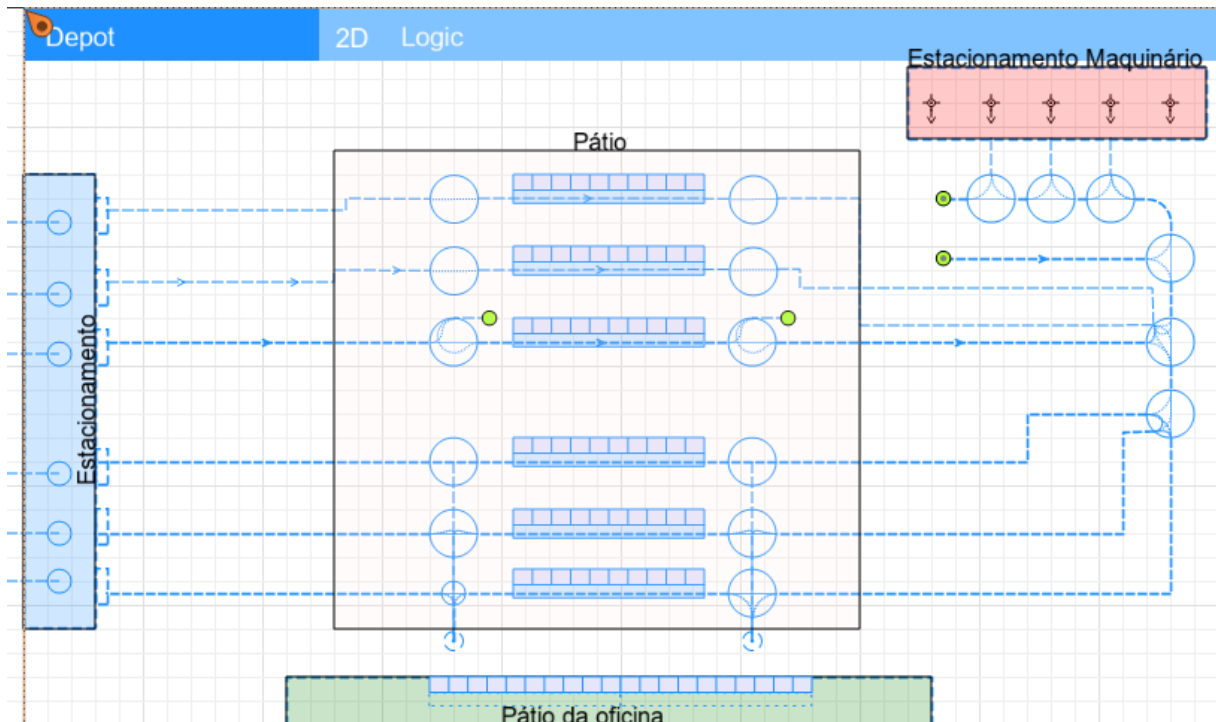
Na Figura 15, as linhas tracejadas azuis definem os caminhos que os veículos usarão para se movimentar pelo ao longo das rotas definidas no *depot*, sendo diferenciadas de acordo com os parâmetros definidos para cada agente. O estacionamento descreve a região onde os caminhões estacionam para carregar e descarregar os contêineres, sendo que dentro deste foram utilizados alguns *attractors* para garantir que os caminhões estacionem com uma determinada ordem. O Pátio define a região onde todos contêineres estão posicionados e, para simplificar o processo de modelagem, as posições de destino e retirada de contêineres permanecerão fixas e serão distribuídas de forma equidistante ao longo do bloco de armazenagem. Há, ainda, pátio de manutenção, onde permanecessem os contêineres da oficina.

Figura 15 – Layout de movimentação de caminhões



Fonte: Elaboração própria (2024).

De forma semelhante, ilustra-se com linhas tracejadas azuis os caminhões que as *reach stackers* usarão para se movimentar. Para essas, define-se o estacionamento maquinário, o qual atua como o local onde os maquinários permanecem quando não estão sendo utilizados. No estacionamento, adicionam-se novos *attractors* para garantir que os *reach stackers* descarreguem em uma determinada ordem. Destaca-se na Figura 16 o layout geral do *depot* aqui retratado.

Figura 16 – Layout geral do *depot*

Fonte: Elaboração própria (2024).

3.4.4 Agentes

Define-se que os agentes atuam como os principais blocos de construção do AnyLogic, aos quais podem ser atribuídas variáveis, eventos, funções e outras funcionalidades. Durante a construção do modelo, foram definidos três agentes para representar as operações realizadas no *depot* de cargas dry: um agente para os caminhões, um para os contêineres, que possuem tamanhos padronizados conforme mencionado anteriormente, e um terceiro agente para representar as *reach stackers*.

O agente que representa os caminhões contém os seguintes parâmetros:

- ID: Utilizados para identificar cada veículo que surge ao longo da simulação de forma única. Além disso, a utilização de um ID único por agente simplifica o processo de análise dos resultados.
- Tipo: Utilizado para definir se o veículo utilizará o *depot* para retirada ou entrega de contêineres.
- Classe de emissão: Utilizado para identificar o fator de emissão de cada caminhão e, conseqüentemente, realizar os cálculos de emissão.
- Posicao_Estacionameto: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para indicar qual posição de estacionamento estará livre para o direcionamento de rota do caminhão.
- DC_percorrida: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para registrar a distância percorrida por cada caminhão.

O agente que representa os contêineres contém os seguintes parâmetros:

- Estado: Utilizados para se o contêiner precisará ou não de manutenção.
- Posicao_Estacionameto_Cntr: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para indicar para qual posição de estacionamento a *reach stacker* deverá se destinar na movimentação do contêiner.
- Posicao_Patio_Coleta: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para indicar para qual posição do pátio está ocupada pelo contêiner a ser retirado.
- Posicao_Patio_Entrega: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para indicar para qual posição do pátio estará livre para o posicionamento do contêiner de entrega.
- Posicao_Oficina_Coleta: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para indicar para qual posição do pátio da oficina está ocupada pelo contêiner a ser retirado.
- Posicao_Oficina_Entrega: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para indicar para qual posição do pátio da oficina estará livre para o posicionamento do contêiner de entrega.
- Tempo_P_1-20: Este parâmetro é utilizado pelo modelo para registrar o tempos de realização de cada subtarefa realizada no *depot* (Entrada do Caminhão, Check-In, Saída do Check-in, Deslocamento até o estacionamento, Chegada no estacionamento, Saída do estacionamento, Deslocamento ao Gate-In, Chegada no Gate-In, Início da vistoria, Fim da vistoria, Deslocamento para o pátio, Chegada no pátio, Deslocamento ao pátio da oficina, Saída do pátio da oficina, Início do Descarregamento do contêiner, Fim do descarregamento do contêiner, Início do carregamento do contêiner, Fim do carregamento do contêiner, Deslocamento para o Gate-Out, Saída do Gate-Out).

O agente que representa as *reach stackers* possui um único parâmetro agregado (DR_percorrida, utilizado para registrar as distâncias percorridas por cada maquinário), sendo utilizado apenas por meio de uma solicitação com um *resource pool* para realizar as movimentações dos contêineres.

3.4.5 Fluxos e processos

Para definir a chegada dos caminhões e, conseqüentemente, dos contêineres, utiliza-se um bloco Source. Esses agentes são gerados a partir de uma base de dados definida com os dados obtidos na etapa de coleta de dados. Dados reais dos processos de descarga e carga foram utilizados durante todo o desenho e validação do modelo, assegurando que esses tempos sejam equivalentes aos aplicados no *Depot ATM*. Além disso, graças a este bloco Source, o contêiner também obtém todos os valores dos diferentes parâmetros atrelados à base de dados.

Após a geração de um caminhão, ele passa por um bloco SelectOutput, que indica a respectiva função do caminhão (coleta ou entrega). Em seguida, utilizam-se

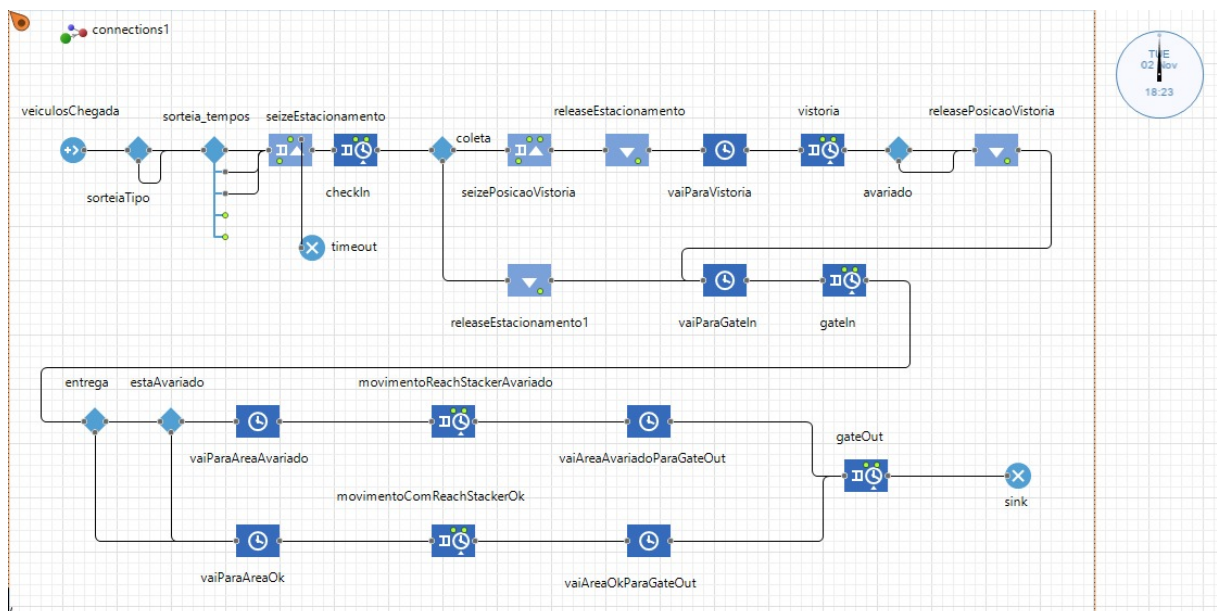
blocos Service para representar as etapas de check-in e a ocupação do estacionamento.

Após o check-in, novos blocos de SelectOutput, atrelados a blocos MoveTo, direcionam o caminhão de acordo com sua função. Se o caminhão for de coleta, ele é encaminhado para uma posição no estacionamento, onde a vaga é liberada (bloco Release). Blocos de Delay e Service indicam os tempos de movimentação e a realização de serviços no gate in. Segue-se o mesmo padrão para definir a solicitação das *reach stackers* e sua movimentação (MoveTo, Service, Delay) para posicionar os contêineres nos caminhões de coleta. Finalmente, realizam-se os serviços no gate-out, liberando o caminhão para sair do *depot*.

Caso o caminhão seja de entrega, novos blocos de Service representam a realização da vistoria. Se o contêiner estiver danificado (bloco SelectOutput), ele é direcionado para a oficina. A movimentação das *reach stackers* e as verificações nos caminhões seguem a mesma lógica anteriormente mencionada.

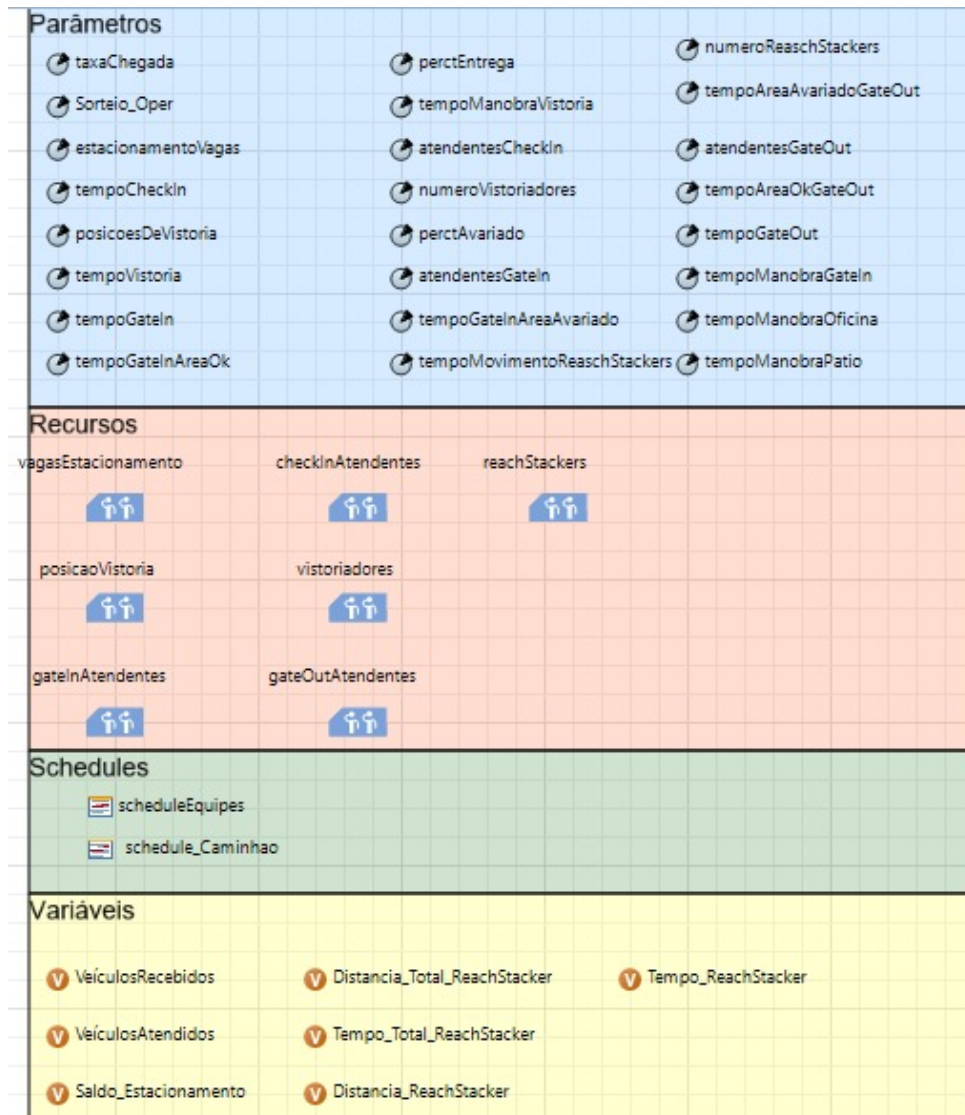
Este processo detalhado de modelagem permite a representação das operações no *depot*, considerando todas as etapas essenciais, desde a chegada dos caminhões até a saída após a conclusão das atividades de coleta ou entrega dos contêineres. Na Figura 17 é possível observar como o layout definido anteriormente foi traduzido dentro dos blocos disponíveis no software para a construção do modelo. Os blocos formam um fluxo composto pelas operações do *depot* pelas quais os caminhões, contêineres e *reach stackers* transitam.

Figura 17 – Modelo de um *depot* de cargas dry



Fonte: (PINHO et al., 2023)

Além do fluxo implementado, a Figura 18 mostra as definições feitas para que o modelo performance da forma desejada. São definidos parâmetros, recursos, *schedules* e variáveis.

Figura 18 – Parâmetros do modelo de um *depot* de cargas dry

Fonte: (PINHO et al., 2023)

Em azul estão os parâmetros nos quais são definidas as grandezas necessárias para os cálculos da simulação, os dados dos parâmetros vêm dos inputs ou de distribuições previamente definidas. No bloco vermelho estão os recursos disponíveis nas operações, nesse caso os recursos são números de funcionários e máquinas. Os *schedules*, em verde, definem horários de funcionamento e, por fim, em amarelo, as variáveis que definem os cálculos dos outputs definidos para a simulação.

A combinação das informações definidas acima e a construção do fluxo com os blocos gera o modelo de simulação do terminal *depot*.

3.4.6 Limitações do modelo

Nesta seção, são apresentadas as limitações do modelo criado, a fim de esclarecer os pontos em que o modelo não consegue acompanhar a operação real do

depot.

Uma das principais limitações do modelo reside na não diferenciação entre os tamanhos dos contêineres que estão sendo movimentados, especificamente entre os de 20 e 40 pés. No ambiente real do *depot*, os contêineres variam em tamanho e, conseqüentemente, em peso e volume, o que afeta a logística e as operações de movimentação. A simplificação adotada no modelo, ao padronizar o tamanho dos contêineres, pode levar a uma subestimação ou superestimação de tempos e recursos necessários para as operações.

Outra limitação significativa é a não limitação das posições disponíveis nos pátios. Na operação real do *depot*, é de extrema importância o acompanhamento de quantos contêineres entram e saem, de modo que seja evitada uma superlotação dos pátios.

Além disso, o modelo assume que não há limitações orçamentárias para a troca da frota de *reach stackers*, o que não condiz com a realidade prática. A substituição de maquinário, especialmente para versões mais modernas e menos poluentes, envolve considerações financeiras significativas. A omissão dessa variável no modelo significa que as simulações não levam em conta restrições de custo que poderiam afetar a viabilidade de implementação das melhorias propostas.

Ademais, os caminhões modelados fogem ao controle interno dos terminais, uma vez que são autônomos ou fazem parte de empresas de transporte, portanto, não há controle nem padronização da frota que faz a entrega e retirada dos contêineres. Assim, tem-se um cenário real no qual muitas vezes os veículos podem possuir emissões elevadas por se tratarem de motores mais antigos do que os pensados neste estudo.

Estas limitações destacam áreas onde o modelo poderia ser melhorado para proporcionar uma representação mais precisa e útil da operação do *depot*. Reconhecê-las é essencial para interpretar os resultados do modelo com a devida cautela e para orientar futuros desenvolvimentos na modelagem e simulação das operações do *depot* de cargas dry.

3.4.7 Validações do modelo

Durante o desenvolvimento do modelo retratado, realizaram-se diversas validações e verificações através de testes e avaliações do comportamento da lógica construída. Foi necessário, em várias ocasiões, reavaliar a lógica implementada, revisar os dados coletados e analisar o funcionamento de certas ferramentas do AnyLogic.

O modelo foi desenvolvido de forma sequencial e modular, começando pela modelagem conceitual e aprimorando cada bloco de processos até que o conjunto final representasse as operações reais do *depot* com a devida fidelidade. A verificação do modelo envolveu a análise dos outputs gerados a partir dos dados de input,

comparando-os com o comportamento esperado em um cenário base simplificado.

Para garantir a precisão do modelo, utilizou-se uma base de dados que incluiu 10 caminhões e 3 de maquinários para rodar a simulação e realizar a validação. Os tempos registrados por cada um dos agentes que representam os veículos foram somados, e montou-se uma tabela de médias temporais para cada uma das subtarefas realizadas ao longo da operação do *depot*.

Compararam-se as médias registradas na simulação com os dados coletados no *Depot* ATM, assegurando que o modelo final de simulação fosse uma representação fiel do processo real. Este processo de verificação e validação é crucial para garantir que o modelo simule com precisão as operações do *depot*, fornecendo resultados confiáveis para a análise e otimização das operações.

3.4.8 Limitações no Estudo de Emissões

O presente trabalho tem como proposta fomentar discussões sobre as emissões no setor de transporte de cargas marítimas, considerando a crescente importância desse tema. Para tanto, desenvolveu-se uma metodologia para calcular as emissões associadas a um terminal retroportuário. Entretanto, para que tais cálculos possam ser aplicados de forma independente, é necessário adotar diversas premissas e simplificações. Nesse contexto, destaca-se a existência de várias outras fontes de emissões dentro dos terminais em questão que devem ser levadas em consideração em um inventário de emissões.

Essas emissões decorrem do uso de diversos maquinários, como pórticos, geradores, transtêineres e caminhões de pátio, entre outros e, ainda, da realização de reparos nas oficinas. Além das fontes mencionadas, é importante considerar também as emissões provenientes de sistemas de climatização, iluminação e outras infraestruturas de apoio que operam continuamente nos terminais.

Outra fonte de emissões a ser considerada é a gestão de resíduos. Os resíduos gerados nas operações diárias do terminal, se não forem corretamente geridos, podem resultar em emissões adicionais de gases de efeito estufa. A implementação de programas de reciclagem e a adoção de práticas de gestão de resíduos sólidos mais eficientes são medidas que podem mitigar esse impacto.

Portanto, os próprios terminais podem realizar os inventários de emissões de suas instalações, isso aumenta a confiabilidade dos dados, uma vez que as medições serão mais precisas e adequadas às fontes de emissões específicas de cada terminal e aos tipos de maquinário utilizados. Dessa forma, os terminais poderão desenvolver estratégias mais eficazes para a redução das emissões.

Existem as diversas formas de mitigar emissões em terminais *depot*, utilizando estratégias diretas e indiretas. Uma estratégia direta é a utilização de máquinas com motores adaptados para combustíveis mais sustentáveis, como HVO (óleo vegetal

hidrotratado), GNV (gás natural veicular) e biocombustíveis, além da adoção de máquinas híbridas e totalmente elétricas. A utilização de fontes de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas, pode suprir parte da demanda energética do terminal produzindo insumo tanto para máquinas elétricas quanto para os serviços de apoio. Essas tecnologias permitem uma significativa redução nas emissões de gases poluentes e contribuem para a sustentabilidade ambiental.

Outro ponto de atenção é o uso de motores e máquinas tecnologicamente atualizados. As novas tecnologias são desenvolvidas com foco na redução de emissões, mesmo em motores que utilizam combustíveis convencionais, melhorando inclusive o rendimento e o consumo. Máquinas mais modernas tendem a cumprir os acordos climáticos e seguir as normas de emissões mais recentes, como a Euro 6. Segundo o ICCT (INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION, 2016), essa é a versão mais atual das normas europeias acerca dos limites de emissões e, ao ser seguida corretamente, permite diminuições de até 99% de alguns poluentes. A modernização da frota de equipamentos é, portanto, uma medida essencial.

Além disso, é importante que empresas e governos adotem medidas que incentivem a redução de emissões, como a publicação de normas que limitem as emissões e exijam que os novos motores se enquadrem nessas regulamentações. O aumento da porcentagem de biocombustíveis nas misturas de combustíveis convencionais também é uma medida eficaz. Um exemplo no Brasil é a atuação do Proconve - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - que determinou uma agenda com fases que progressivamente diminuem os níveis de emissões permitidos em veículos. Recentemente, em 2022, o programa chegou a sua última fase e apresentou resultados de redução de até 90% em relação aos números de emissões iniciais como anunciado pelo próprio IBAMA (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2022).

Outra política que auxilia na redução das emissões é a exigência de transparência das emissões por parte das empresas públicas e privadas. Para isso, mais pesquisas, como a desenvolvida neste trabalho, são necessárias e devem ser aplicadas com maior precisão para divulgar informações ao público e prestar contas de maneira adequada. A divulgação dessas informações conscientiza a população, que pode fazer escolhas de consumo mais conscientes e apoiar empresas comprometidas com a sustentabilidade. Isso está relacionado ao índice ESG, que tem crescente importância para as empresas e abrange temas ambientais, sociais e de governança.

Ademais, uma forma de encontrar soluções eficazes para problemas operacionais, sendo eles gargalos ou elevadas emissões, é o desenvolvimento de modelos de simulação e otimização. Estes são capazes de encontrar respostas para os mais diversos problemas com custos reduzidos uma vez que a implementação só é feita após encontrar um resultado razoável. A aplicação de tecnologias avançadas

de monitoramento e a integração de práticas de gestão ambiental no planejamento estratégico dos terminais são passos essenciais para alcançar uma operação mais sustentável e reduzir a pegada de carbono global.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo tem como objetivos, primeiramente, apresentar os resultados obtidos com a aplicação da metodologia previamente descrita e, posteriormente, promover debates pertinentes aos resultados encontrados. Com base nos resultados e nas discussões, propõe-se também a consideração de tópicos para o aprofundamento da pesquisa e a proposição de alternativas que proporcionem maior sustentabilidade às operações realizadas nos terminais retroportuários em questão.

4.1 RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE EMISSÕES

O primeiro subtópico deste capítulo aborda os resultados obtidos diretamente a partir da metodologia aplicada. São apresentados os outputs do modelo de simulação e os resultados dos cálculos de emissões para cada um dos três cenários propostos. A partir da apresentação dos resultados, é possível compará-los para definir o cenário mais favorável em termos de emissões de CO₂.

A prática da metodologia se inicia, portanto, com a rodada de simulação do modelo construído. Os outputs encontrados geram informações de distância e tempo para a aplicação nas equações de estimativa de emissões. Além disso, existem outras saídas como o número de veículos atendidos e outros tempos que compõem o tempo de permanência dos veículos no sistema. Esses números são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Outputs da simulação

Output	Resultados	Unidades
Número de veículos recebidos	8640	Caminhões
Número de veículos atendidos	7632	Caminhões
Distância total percorrida pelos caminhões	2940,06	Quilômetros
Distância média percorrida pelos caminhões	0,39	Quilômetros
Tempo total de uso das reach stackers	605,92	Horas
Tempo médio de uso das reach stackers	151,48	Horas
Tempo médio de permanência	2989,64	Minutos
Tempo médio na fila	2827,09	Minutos
Tempo médio no check-in	172,70	Minutos
Tempo médio de vistoria	9,80	Minutos
Tempo médio até a entrada	2961,60	Minutos
Tempo médio no gate-in	8,57	Minutos
Tempo médio na oficina	6,46	Minutos
Tempo médio no pátio	6,46	Minutos
Tempo médio no gate-out	7,77	Minutos
Tempo médio de atendimento interno	24,68	Minutos

Fonte: Elaboração própria (2024).

O ponto de maior atenção dentro dessas saídas é a discrepância entre o número de caminhões recebidos e atendidos sendo superior a mil veículos. Essa diferença é justificada ao observar o tempo de permanência médio dos caminhões no sistema que chega a 2989,64 min ou 49,83 h. O tempo elevado ocorre ainda que seja determinada uma restrição fazendo com que os caminhões deixem a fila após 72h de espera. Caso tal restrição não existisse, o número de caminhões não atendidos e o tempo em fila iriam sofrer um aumento. Com a verificação de tais ocorrências, foi realizada uma breve pesquisa na qual foram encontrados comentários de avaliação do terminal citando a demora no atendimento e o atraso nos horários agendados, o que ratifica a hipótese da existência de ineficiências nessa operação (GOOGLE MAPS, 2024).

As saídas da simulação subdividem o tempo de forma a possibilitar a identificação da causa principal para o tempo de permanência elevado. Dessa forma, os componentes de tempo com maiores médias denunciam os pontos onde há a presença de gargalos na operação e que devem ser resolvidos, a fim de melhorar o desempenho no atendimento e na operação do *depot*. Entende-se, então, que os dois maiores tempos são o tempo em fila e o tempo na etapa de check-in. Por isso, conclui-se duas necessidades: uma ampliação dos estacionamentos como forma de comportar mais veículos em fila de espera para atendimento; e, a principal, um aumento expressivo do número de funcionários disponíveis para o atendimento de check-in. O aumento no número de funcionários na etapa de check-in impacta não só no tempo de atendimento e espera da própria etapa, como também diminui o número de veículos que aguardam

em fila.

Apesar de tais discussões acerca dos tempos acima serem de extrema relevância quando sendo debatida a operação do terminal, esses tempos não impactam o cálculo de emissões proposto aqui, visto que são consideradas apenas as emissões internas ao *depot*. Portanto, são contabilizadas apenas emissões após a passagem pelo gate-in, desconsiderando possibilidades como caminhões ligados durante o tempo em fila e as emissões associadas ao abandono da fila.

Prosseguindo com a implementação da metodologia, são calculadas as emissões para cada cenário. A Figura 19 retoma os números aplicados a cada um dos cenários.

Figura 19 – Síntese dos cenários propostos

Cenário	Base	Alternativo 1	Alternativo 2	Alternativo 3	Alternativo 4
Densidade	0,847	0,847	0,832	0,832	0,74
Fator de emissão	3,86	3,86	3,74	3,74	2,75
Consumo das Reach Stackers	13	12,5	13	12,5	0
Rendimento dos Caminhões	2,09	3,16	2,09	3,16	3,6

Fonte: Elaboração própria (2024).

Aplicando os parâmetros acima nas equações expostas na metodologia, obtém-se resultados explanados na Tabela 10.

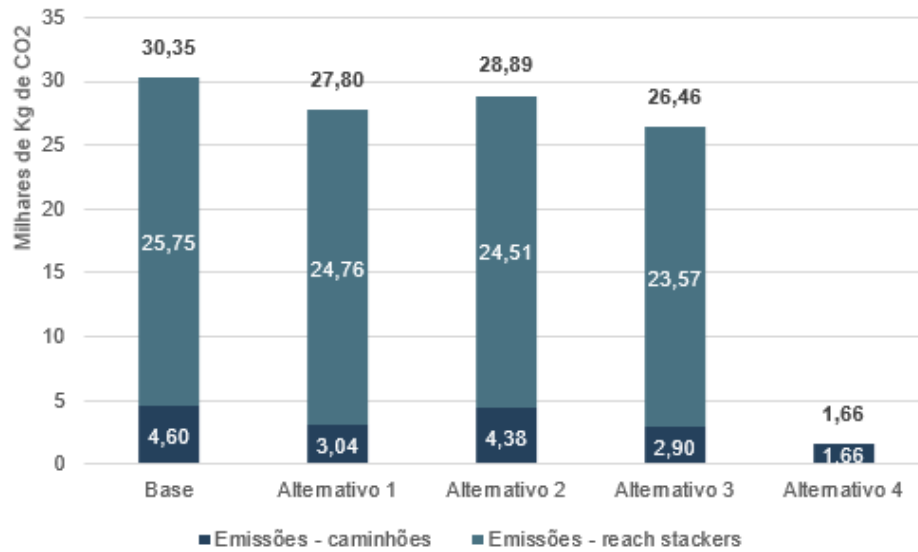
Tabela 10 – Resultados de emissões

Cenário	Totais	<i>Reach Stackers</i>	<i>Caminhões</i>
Base	30352,07	25752,88	4899,18
Alternativo 1	27804,25	24762,39	3041,86
Alternativo 2	28887,67	24510,38	4377,29
Alternativo 3	26462,78	23567,68	2895,10
Alternativo 4	1661,95	0,00	1661,95

Fonte: Elaboração própria (2024).

Essa tabela sintetiza o objetivo principal da pesquisa desenvolvida e deixa explícitos os impactos das melhorias propostas em cada cenário. O gráfico a seguir (Figura 20) melhora a visualização dos números de emissões encontrados e facilita as comparações.

Figura 20 – Emissões por cenário



Fonte: Elaboração própria (2024).

Inicialmente, é notório que a principal fonte de emissões são as movimentações das *reach stackers*. Visto que, dos 30,36 mil kg de CO₂, apenas 4,6 mil kg - 15% - correspondem aos caminhões, enquanto esses equipamentos são responsáveis por 25,75 mil kg - 85%. O que segue a lógica, dado que os caminhões têm rotas de poucos metros para percorrer dentro do terminal, já as *reach stackers* queimam combustível não apenas para se deslocar, mas também para movimentar os contêineres.

A partir da Tabela 10 e da Figura 20, observa-se, ainda, que os cenários alternativos 1 e 2 alcançaram, respectivamente, diminuições de 2,56 e 1,47 mil kg de CO₂ nas emissões totais em relação ao cenário base, ou seja, diminuições de 8% no primeiro cenário e de 5% no segundo. Apesar da maior redução no alternativo 1, é importante analisar separadamente os caminhões e as *reach stackers*. No caso dos caminhões, entre os cenários 1 e 2 há uma melhora de 50% no rendimento - 2,09 km/l no cenário 1 e 3,16 km/l no cenário 2 -, o que traz um resultado mais eficiente com a alteração do rendimento do que com a mudança na qualidade do diesel considerado. Já para as máquinas *reach stackers* a melhora no consumo é de apenas 4% - 12,5 l/h no cenário 1 e 13 l/h no cenário 2 -, essa baixa mudança faz com que a mudança no diesel seja mais expressiva. Considerando os cenários por completo, o rendimento teve maior influência nos resultados do que uma melhoria na qualidade do diesel empregado. Dessa forma, destaca-se a importância do emprego de máquinas atuais nas quais a tecnologia promove melhorias de consumo capazes de diminuir emissões e gastos excessivos em combustível.

Ainda que os cenários anteriores já apresentem quedas nas emissões, o ideal reside na combinação de um diesel menos poluente e de máquinas com menores consumos, como visto no cenário 3 que resulta numa queda de 3,9 mil kg, ou 13%, das

emissões iniciais.

De toda forma, os cálculos não fogem do esperado inicialmente, comprovando que o uso de fontes de energia mais limpas comparadas ao diesel - como o GNV e a eletricidade - reduzem drasticamente as emissões associadas a operação, tendo uma redução de 28,7 mil kg de CO₂ - 95% - no cenário 4. No entanto, trata-se de um investimento irreal a substituição de todas as *reach stackers*, sendo necessário ainda uma comparação entre os gastos no consumo de energia elétrica e de diesel. Outro ponto é a inviabilidade de assumir todos os caminhões utilizando GNV, uma vez que não só representa um custo para a substituição da frota, mas também foge do controle das decisões do *depot*, visto que as entregas e coletas são feitas por transportadoras terceirizadas ou pelos clientes locatários e proprietários dos contêineres.

Conclui-se, por fim, que, como esperado, o cenário 4 performa melhor em questões das emissões totais, seguido pelo cenário 3 o qual apresenta uma possibilidade mais realista de operação.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo fomentar discussões sobre as emissões no setor de transporte marítimo, aplicando uma metodologia para mensuração dessas emissões em um terminal *depot*. Esse objetivo foi alcançado através da adaptação de um modelo de simulação computacional baseada em agentes, permitindo o cálculo dos tempos e distâncias necessários para a aplicação das fórmulas de emissões e a obtenção dos resultados finais.

Os resultados da simulação revelaram ineficiências nas operações, especialmente nas etapas anteriores à entrada dos caminhões. Tais ineficiências indicam a necessidade de uma revisão nos processos de agendamento e no número de funcionários disponíveis para essas etapas, visando minimizar os tempos de espera e, conseqüentemente, as emissões associadas. Em relação às emissões estimadas, verificou-se que a maior parte delas está associada à movimentação das máquinas internas do terminal. Isso sugere que intervenções direcionadas à modernização e à eficiência energética dessas máquinas poderiam ter um impacto significativo na redução das emissões totais. A inclusão de outros tipos de máquinas e a consideração das movimentações de realocação dos contêineres também são entendidas como fatores que podem aumentar significativamente as emissões. Dessa forma, estratégias para otimizar essas movimentações, possivelmente através do uso de tecnologias avançadas de logística e automação, são essenciais.

Além disso, concluiu-se que o cenário 4, que apresentou os melhores níveis de emissões, não será necessariamente o mais vantajoso quando os custos forem considerados. Embora a inserção de máquinas elétricas tenha demonstrado uma melhoria expressiva no cenário, a análise de custo-benefício deve ser aprofundada para avaliar a viabilidade econômica de tais investimentos. É necessário considerar o custo inicial de aquisição, os custos operacionais e de manutenção, bem como os benefícios de longo prazo em termos de redução de emissões e possíveis incentivos fiscais ou subsídios para tecnologias verdes.

É igualmente importante destacar as limitações do modelo e as possibilidades de melhorias futuras. Para realizar a simulação, foram adotadas premissas que distanciam os resultados da realidade. A replicação da metodologia em um estudo de caso em um terminal real permitirá a coleta de mais informações e a redução das discrepâncias entre o modelo e a realidade. Além disso, é crucial considerar a integração de variáveis adicionais que possam impactar as emissões, como o tipo de carga, as condições climáticas e a eficiência dos combustíveis utilizados.

Com os objetivos alcançados, este trabalho aborda temáticas de grande

relevância contemporânea e oferece oportunidades para futuras melhorias. A replicação da metodologia para outros terminais permitiria a comparação de dados e a identificação de melhores práticas operacionais. Adicionalmente, a consideração de questões de custos e lucros é fundamental para a implementação de estratégias de mitigação de emissões que sejam tanto ambientalmente quanto economicamente sustentáveis. Finalmente, a aplicação de um modelo de otimização, em vez de simulação, poderia fornecer soluções mais eficientes e robustas para a gestão das operações do terminal, visando a minimização das emissões.

Este trabalho, portanto, contribui significativamente para o entendimento das emissões no setor de transporte marítimo e abre caminho para futuras pesquisas que visem a melhoria contínua da eficiência operacional e a redução do impacto ambiental desse setor crucial para a economia global.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. B.; CARDOSO, J. V. M.; GUITARRARI, L. Transição energética no transporte marítimo. jun. 2023. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/631151f4-752a-4ce8-ad88-7f944549773c/content>. Acesso em: 17 abr. 2024.
- ALENCAR, A. et al. **Estimativa de emissões de gases de efeito estufa dos sistemas alimentares no Brasil**. Brasil: SEEG, 2023.
- ALMEIDA; MARRANGHELLO; DORNELES. **Mudanças Climáticas: Efeito Estufa**. 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=ScyFJGS_ogl&t=22s. Acesso em: 16 abr. 2024.
- ANTAQ. **Estatístico Aquaviário**. 2024. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/transptku.html#pt>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- ATM TRANSPORTE MULTIMODAL. 2022. Disponível em: <https://www.atmmodal.com.br/>.
- BAALEN, P. J. V.; ZUIDWIJK, R.; NUNEN, J. V. Port inter-organizational information systems: Capabilities to service global supply chains. **Technology, Information and Operations Management**, v. 2, n. 2, p. 27–45, 2008.
- BALCI, O. Guidelines for successful simulation studies. In: **Proceedings of WINTER SIMULATION CONFERENCE**. New Orleans: [s.n.], 1990. p. 432–438. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/129482?signout=success>. Acesso em: 30 maio 2024.
- BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. São Paulo: Atlas, 2010.
- BARBOSA, G. A. B.; COSTA, B. G. **Mudanças climáticas: o que são e o que esperar para o futuro?** 2023. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2023/03/26/mudancas-climaticas-o-que-sao-e-o-que-esperar-para-o-futuro>. Acesso em: 17 abr. 2024.
- BARROS, B. R. C. et al. Comparação de emissão de co2 entre os modos rodoviário e hidroviário: ensaio sobre o corredor norte/eixo tocantins. In: **Proceedings of the 32º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET**. Gramado: [s.n.], 2018. Disponível em: http://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Aspectos%20Economicos%20Sociais%20Politicos%20e%20Ambientais%20do%20Transporte/Transporte%20e%20Meio%20Ambiente%20I/5_81_AC.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.
- BENEDECTI, R. C. **Avaliação operacional e econômica de um serviço hidroviário na cadeia logística do porto de Itapoá**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes e Logística) — Centro Tecnológico de Joinville — Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

BNDES. Entregas associadas à Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). 2023. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas>. Acesso em: 03 abr. 2024.

BORSHCHEV A.; GRIGORYEV, I. The big book of simulation modeling: multimethod modelling with anylogic. 6. ed. Oakbrook Terrace, Illinois: Anylogic North America, 2015.

CENAMO, M. C. Mudanças climáticas, o protocolo de quioto e mercado de carbono. fev. 2004. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/cenamo_mc.pdf. Acesso em: 16 abr. 2024.

CNN BRASIL. 2023 deve ser o ano mais quente em 125 mil anos, dizem cientistas da UE. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/2023-deve-ser-o-ano-mais-quente-em-125-mil-anos-dizem-cientistas-da-ue/>. Acesso em: 03 abr. 2024.

COPERNICUS. Copernicus: 2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit. 2024. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2023-hottest-year-record>. Acesso em: 03 abr. 2024.

ESPÍNDOLA, G. L. Redução das emissões de CO2 do setor de transportes brasileiro aplicando a metodologia de Diagrama de Fontes de Carbono. Projeto de final de curso (Grau de engenheiro químico) — Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

FAZCOMEX. Tipos de contêineres: saiba quais são os principais. 2024. Disponível em: <https://www.fazcomex.com.br/comex/conheca-os-tipos-de-containers/>. Acesso em: 29 jun. 2024.

FLYNN, M. A ATIVIDADE PORTUÁRIA E O REGISTRO DE EMISSÕES E TRANSFERÊNCIA DE POLUENTES (RETP). 2014. Disponível em: <https://br.lisam.com/pt-br/lisam/news/a-atividade-portu%C3%A1ria-e-o-registro-de-emiss%C3%B5es-e-transfer%C3%A2ncia-de-poluentes-retp/#:~:text=Os%20portos%20s%C3%A3o%20fontes%20de,%20entre%20outros%20poluentes%20RETP>. Acesso em: 15 maio 2024.

GOOGLE MAPS. 2024. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/MAERSK+CARGO+SERVICE+ITAPOA%C3%81/@-26.1540313,-48.6262664,339m/data=!3m1!1e3!4m2!1m2!2m1!1sdepot+maersk+itapoa!3m8!1s0x94d951a88d8416f7:0x975e25fd1d4f41a5!8m2!3d-26.1540313!4d-48.6240133!9m1!1b1!15sChNkZXBvdCBtYWVyc2sgaXRhcG9hlgOIAQGSARFsb2dpc3RpY3Nfc2VydmljZeABAA!16s%2Fg%2F11sdpzlybl?entry=ttu>. Acesso em: 15 maio 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 29 jun. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Urgent climate action can secure a liveable future for all. 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syn/>

[//www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2023/03/IPCC_AR6_SYR_PressRelease_en.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2023/03/IPCC_AR6_SYR_PressRelease_en.pdf). Acesso em: 16 abr. 2024.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards**. 2016. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_Euro6-VI_briefing_june2016.pdf. Acesso em: 29 jun. 2024.

KALMAR. **Kalmar Reachstacker Electric ERG420-450 Brochure**. c2021. Disponível em: https://www.kalmarglobal.com/4a53da/globalassets/media/268853/268853_Kalmar-Electric-Reachstacker-brochure.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

LAMBERT, D. M.; COOPER, M. C. Issues in supply chain management. **Industrial Marketing Management**, v. 29, n. 65-83, p. 40–47, 2000.

LEAL, I. C.; GUIMARÃES, V. A. Análise da ecoeficiência nas operações de terminais portuários com a aplicação de técnica de auxílio multicritério à decisão. **Transportes**, v. 21, n. 3, p. 40–47, 2013.

LOPES, E. S.; BELTRAME, M. H.; BELTANI, J. M. A importância do contêiner na logística. **Lins**, v. 1, n. 3, p. 1–17, 2013.

MALHEIROS, GABRIEL. **Demanda por Navios Porta-Contêineres Cresce a Contra Mão da Economia**. 2022. Disponível em: <https://www.datamarnews.com/pt/noticias/demanda-por-navios-portaconteneres-cresce-a-contramao-da-economia/>. Acesso em: 08 abr. 2024.

MARQUES, A. C. A. C. **SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES EM SISTEMAS LOGÍSTICOS**. Dissertação para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO — Engenharia de Produção — Universidade Candido Mendes, 2013.

MARTINS, M. J.; SILVA, R. L. C. d. **Aspectos atuais da movimentação de contêineres**: Análises e perspectivas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Escola Politécnica — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

MEDINA, A. et al. A distributed simulation model of the maritime logistics in an iron ore supply chain management. In: **Proceedings of the 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIMULATION AND MODELING METHODOLOGIES, TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS**. Reykjavík, Iceland: [s.n.], 2013. p. 432–438. Disponível em: <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0004488504530460>. Acesso em: 30 maio 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **EFEITO ESTUFA E A CONVENÇÃO SOBRE MUDANÇA DO CLIMA**. BRASIL, 1999. 38 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. s.d. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas.html>. Acesso em: 03 abr. 2024.

MONDO, L. et al. O setor portuário e a descarbonização no transporte marítimo. **Waycarbon**, v. 1, p. 1, 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração da Conferência da ONU no Ambiente Humano**. 1972. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/33/2016/09/Declaracao-de-Estocolmo-5-16-de-junho-de-1972-Declaracao-da-Conferencia-da-ONU-no-Ambie.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2024.

PASSOS, P. N. C. A conferência de estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente. **Revista Direitos Fundamentais e Democracia**, v. 6, 2009.

PEGAS, P. H. **Simulação baseada em agentes para uma cadeia de suprimentos com impressão 3D**: uma análise comparativa utilizando anylogic. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) — Departamento de Engenharia de Produção — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

PEREIRA, W. I.; L., C. Especificação do modelo conceitual em simulação de eventos discretos: Aplicação em um caso real. In: **Proceedings of the XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. São Carlos: [s.n.], 2010. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_118_772_16587.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

PINHO, L. M. L. et al. Simulação computacional aplicada a terminais depot. In: **Proceedings X CIDESPORT - Congresso Internacional de Desempenho Portuário**. Florianópolis: [s.n.], 2023. p. 418–436. Disponível em: https://2023.cidesport.com/wp-content/uploads/2023/11/Anais_2023.pdf. Acesso em: 08 abr. 2024.

PORTO ITAPOÁ. c2024. Disponível em: <https://www.portoitapoa.com/sustentabilidade/>. Acesso em: 28 jun. 2024.

PORTOS E NAVIOS. **Balança comercial por via marítima cresceu 41,9%** Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/balanca-comercial-por-via-maritima-cresceu-41-9-em-2023#:~:text=A%20balan%C3%A7a%20comercial%20por%20via,compa%C3%A7%C3%A3o%20com%20o%20ano%20anterior>. Acesso em: 17 abr. 2024.

RAMBO, M. A. **Estratégias ESG na Indústria Catarinense: desvendando Impactos, Indicadores de Desempenho e Contribuições para os ODS**. 2023. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/estrat%C3%A9gias-esg-na-ind%C3%BAstria-catarinense-desvendando-de-maur%C3%ADcio-3jkbe/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

RODRIGUES, D. R. e. a. Impacto do aumento da concentração de dióxido de carbono sobre o oídio da videira. In: **Proceedings WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente: [s.n.], 2012. p. 01–08. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/945744/impacto-do-aumento-da-concentracao-de-dioxido-de-carbono-sobre-o-oidio-da-videira>. Acesso em: 16 abr. 2024.

SILVA, R.; LIMA, B. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terræ Didática**, v. 5, n. 1, p. 42–49, 2009.

SILVA, R.; LIMA, B. Métodos de eficiência energética e de mitigação de emissões de gases poluentes para navios e os impactos no setor de transporte marítimo. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. esp., p. 776–792, abr. 2020.

WENG, D. T. K.; TAN, R.; RAHMAN, M. H. b. A. Review on container depot operations. **Critical Reviews**, v. 7, n. 8, ago. 2020.

WIKIMEDIA COMMONS. **File:Kalmar Peinemann reach stacker.jpg**. 2024. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kalmar_Peinemann_reach_stacker.jpg. Acesso em: 29 jun. 2024.

XAVIER, M. E. R.; KERR, A. A. F. S. O efeito estufa e as mudanças climáticas globais. 2002.

ZAIN, M. e. a. Understanding of empty container movement: a study on a bottleneck at an off-dock depot. In: **Proceedings XX CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011. p. 432–438.

ZHOU, C. et al. Classification and literature review on the integration of simulation and optimization in maritime logistics studies. **IISE Transactions**, v. 53, n. 10, p. 1157–1176, 2021.