

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

JÚLIA BEATRIZ DIAS DA SILVA

MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE
RETIRADAS DE CONTÊINERES: UMA ABORDAGEM PARA A REDUÇÃO DE
CUSTOS DE ARMAZENAGEM E CUSTOS DE *DEMURRAGE* EM UMA MONTADORA
AUTOMOTIVA

Joinville

2025

JÚLIA BEATRIZ DIAS DA SILVA

MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE
RETIRADAS DE CONTÊINERES: UMA ABORDAGEM PARA A REDUÇÃO DE
CUSTOS DE ARMAZENAGEM E CUSTOS DE *DEMURRAGE* EM UMA MONTADORA
AUTOMOTIVA

Trabalho apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Transportes e Logística, no
Curso de Engenharia de Transportes e
Logística, do Centro Tecnológico de Joinville,
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Silvia Lopes de Sena
Tagliarenha.

Joinville

2025

Silva, Júlia Beatriz Dias da

Métodos de otimização para o problema de retiradas de contêineres: uma abordagem para a redução de custos de armazenagem e custos de demurrage em uma montadora automotiva / Júlia Beatriz Dias da Silva ; orientadora, Sílvia Lopes de Sena Tagliarenha, 2025.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia de Transportes e Logística, Joinville, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Logística. 2. Otimização de custos logísticos portuários. 3. Custos de demurrage. 4. Custo de armazenagem portuária. 5. Heurísticas. I. Tagliarenha, Sílvia Lopes de Sena . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Transportes e Logística. III. Título.

JÚLIA BEATRIZ DIAS DA SILVA

MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE
RETIRADAS DE CONTÊINERES: UMA ABORDAGEM PARA A REDUÇÃO DE
CUSTOS DE ARMAZENAGEM E CUSTOS DE *DEMURRAGE* EM UMA MONTADORA
AUTOMOTIVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, no Curso de Engenharia de Transportes e Logística, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 28 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Dra. Silvia Lopes de Sena Tagliailenha
Orientadora
Presidente

Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

José Luis da Silva
Membro
BMW Group do Brasil / Técnico de Logística

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Os primeiros agradecimentos são dedicados às pessoas mais importantes do mundo para mim, que sempre foram meus maiores incentivadores e me deram amor e força para realizar este sonho. À minha mãe, meu pai, ao meu irmão e à minha avó, deixo minha gratidão por todo incentivo e pelas palavras de afeto durante a graduação, mesmo estando longe de vocês.

Quero agradecer à minha família por ser a estrutura emocional que precisei. Mesmo morando em outro estado, sempre me fizeram sentir acolhida, fazendo com que a distância se tornasse apenas um detalhe. Afinal, mudar da Bahia para Joinville e ver minha família e amigos apenas uma vez no ano foi quase um intercâmbio. Um desafio pessoal que consegui enfrentar porque vocês e meus amigos estiveram ao meu lado.

Agradeço também aos amigos que conquistei na UFSC, Azaliáh, Daiane, Romano, Gab, Maysa, Zuco, João, Patric, Lídia e Anna, por estarem presentes sempre que precisei, pelos conselhos nos momentos certos e por serem meu apoio emocional em toda as duas graduações. Tornaram minha jornada universitária mais leve e feliz. Em especial a Karen, que me acompanha desde a escola, sem sua amizade e companheirismo, nada disso seria possível.

A minha orientadora, Silvia, que aceitou o desafio proposto para este trabalho, sempre compreendendo os desafios que tive ao longo do caminho e me dando o suporte necessário para que este estudo fosse desenvolvido e concluído.

Por fim, agradeço à Bateria Nota Cem, por terem feito meus dias na universidade mais felizes.

RESUMO

A crescente necessidade de redução de custos logísticos e de aumento da eficiência operacional torna essencial o uso de métodos quantitativos no planejamento das operações de importação industrial. Em montadoras automotivas, o planejamento inadequado da retirada e devolução de contêineres pode gerar custos adicionais de armazenagem portuária e de *demurrage*, cobrança aplicada quando o tempo de uso do contêiner excede o período de isenção concedido pelo armador, afetando o fluxo produtivo e a competitividade. Este estudo apresenta uma metodologia de otimização para a programação de retiradas de contêineres em uma montadora que importa insumos via portos localizados no estado de Santa Catarina, com o objetivo de reduzir custos e automatizar a tomada de decisão. Para isso, desenvolveu-se um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e a heurística construtiva *Heuristic for Sequencing of Container Retrieval* (HSCR) implementada em linguagem Python, considerando restrições portuárias e produtivas. A aplicação prática resultou na redução total dos custos de *demurrage* e na redução de 58,8% dos custos de armazenagem, representando uma economia direta de R\$ 40.632,00 no período analisado. Observou-se que a integração entre modelagem matemática e heurísticas computacionais é uma alternativa eficaz para o planejamento logístico e para a melhoria da eficiência operacional em operações de importação.

Palavras-chave: otimização de custos logísticos portuários; custos de *demurrage*; custo de armazenagem portuária; programação linear inteira mista; heurísticas.

ABSTRACT

The growing need to reduce logistics costs and increase operational efficiency makes the use of quantitative methods essential in planning industrial import operations. In automotive manufactures, inadequate planning of container withdrawal and return can generate additional port storage and demurrage, a fee charged when the container remains in use beyond the free time granted by the shipping line, affecting the production flow and competitiveness. This study presents an optimization methodology for scheduling container withdrawals in an automotive manufacturer that imports materials through the ports located in the state of Santa Catarina, aiming to reduce costs and automate decision-making. For this purpose, a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model and the constructive heuristic Heuristic for Sequencing of Container Retrieval (HSCR) were developed and implemented in Python, considering port and production constraints. The practical application resulted in the total elimination of demurrage costs and a 58.8% reduction in storage costs, representing a direct saving of R\$ 40,632.00 during the analyzed period. It was observed that the integration of mathematical modeling and computational heuristics is an effective alternative for logistics planning and for improving operational efficiency in import operations.

Keywords: optimization of port logistics costs; demurrage costs; port storage cost; mixed-integer linear programming; heuristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma Prisma	26
Figura 2 – Um sistema de descarga de navios em uma usina siderúrgica.....	33
Figura 3 – Etapas Metodológicas	40
Figura 4 – Processo de importação da montadora automotiva.....	41
Figura 5 – Distribuição das datas de retiradas do cenário real	55
Figura 6 – Custos totais do cenário real	56
Figura 7 – Distribuição das datas de retiradas com o modelo PLIM	56
Figura 8 – Custos totais do modelo PLIM proposto.....	57
Figura 9 – Distribuição das retiradas com a heurística HSCR	58
Figura 10 – Custos totais com a heurística HSCR	59
Figura 11 – Comparativo entre os cenários	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese dos artigos selecionados na revisão sistemática PRISMA.....	28
Quadro 2 – Estrutura de dados fornecida pela montadora automotiva.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices, parâmetros e variáveis do modelo de descarregamento de navios.....	34
Tabela 2 – Índices, parâmetros e variáveis do modelo PLIM proposto	44
Tabela 3 – Índices e variáveis considerados na heurística HSCR.....	48
Tabela 4 – Parâmetros considerados na heurística HSCR.....	49
Tabela 5 – Indicadores de desempenho dos métodos propostos	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AMPL – *A Mathematical Programming Language*
- ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários
- API – *Application Programming Interface*
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- DI – Declaração de Importação
- EOQ – Quantidade Económica de Pedido
- ETA – *Estimated Time of Arrival*
- ETD – *Estimated Time of Departure*
- GAMS – *General Algebraic Modeling System*
- HSCR – *Heuristic for Sequencing of Container Retrieval*
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IOA – Itapoá
- MRP – *Material Requirement Planning*
- NAV – Navegantes
- PD – Programação Dinâmica
- PI – Programação Inteira
- PIB – Produto Interno Bruto
- PL – Programação Linear
- PLI – Programação Linear Inteira
- PLIM – Programação Linear Inteira Mista
- PNL – Programação Não Linear
- PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*
- PO – Pesquisa Operacional
- Siscomex – Sistema Integrado de Comércio Exterior
- SUSP – *Ship-Unloading Scheduling Problem*
- VND – *Variable Neighborhood Descent*
- VS Code – *Visual Studio Code*
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
1.2. METODOLOGIA	17
1.2.1. Caracterização da pesquisa	18
1.2.2. Estratégia metodológica	18
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. LOGÍSTICA E CADEIA DE SUPRIMENTOS NO SETOR AUTOMOTIVO	20
2.2. COMÉRCIO EXTERIOR E PROCESSOS ADUANEIROS NO CONTEXTO PORTUÁRIO BRASILEIRO	22
2.3. <i>DEMURRAGE</i> : CONCEITO, REGULAMENTAÇÃO E IMPACTOS	23
2.4. REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE <i>DEMURRAGE</i>	24
2.5. PESQUISA OPERACIONAL APLICADA Á LOGÍSTICA	29
2.5.1. Métodos Exatos: Programação Linear e Inteira Mista	29
2.5.2. Heurísticas e Meta-heurísticas	30
2.5.3. Aplicações em logística portuária e transporte marítimo	31
2.5.4. Modelos de otimização	31
2.6. MÉTODOS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE <i>DEMURRAGE</i> E CUSTOS DE ARMAZENAGEM PORTUÁRIA	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. REVISÃO SISTEMÁTICA	40
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	40
3.2.1. Coleta e Tratamento de Dados	42
3.3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO PROPOSTOS	43
3.3.1. Método Exato: Modelo PLIM	43
3.3.2. Método aproximado: Heurística HSCR	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1. SITUAÇÃO REAL DA EMPRESA	54
4.2. RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO PLIM	56

4.3. RESULTADOS DA HEURÍSTICA HSCR	58
4.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CENÁRIOS	59
5. CONCLUSÃO.....	63

1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva é parte fundamental na economia brasileira, representando mais de 20% do Produto Interno Bruto (PIB) da indústria e transformação do país. O setor enfrenta desafios logísticos e uma carga tributária elevada e complexa (BNDES, 2018). Em locais onde a produção depende significativamente da importação de materiais, há um procedimento complexo envolvendo diversas etapas que pode resultar em custos extras caso ocorram atrasos na nacionalização da carga (CHRISTOPHER, 2011).

Assim que a carga chega ao Brasil, dá-se início ao processo de nacionalização, com a sua apresentação à Receita Federal para que ocorra o despacho aduaneiro. Diversas etapas são cumpridas até que a carga seja liberada. A etapa principal consiste no registro da Declaração de Importação (DI), na qual são fornecidas as informações sobre a mercadoria, segundo o Decreto nº 6.759 (Brasil, 2009). A partir disso, são definidos e classificados os canais de liberação das mercadorias.

Segundo o Decreto nº 6.780, para classificar o tipo e amplitude do controle a ser realizado, foram estabelecidos os seguintes canais de seleção: canal verde, laranja e vermelho. O canal que pode levar ao aumento de dias de bloqueio da carga é o vermelho, onde a mercadoria será entregue somente após a realização da análise documental e física. Isso impacta diretamente o prazo de liberação da carga, que pode ocorrer entre cinco e 20 dias, podendo se estender em casos excepcionais devido a complexidade do processo e à atuação dos diferentes órgãos envolvidos (Brasil, 2009).

A partir do momento que a carga é recepcionada no porto, inicia-se a contagem dos dias de utilização do contêiner, caso a devolução do contêiner vazio não ocorra dentro do *free time* estabelecido, é cobrada a taxa de sobrestadia (CABRAL, 2013). Essa sobrestadia, conhecida como *demurrage*, refere-se ao valor diário cobrado pelo uso do contêiner além do período contratado, segundo a Resolução Normativa nº 18 da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2017).

Ainda assim, segundo Paura (2012), o modal marítimo é amplamente usado em operações do comércio exterior para movimentação de volumes maiores de mercadorias, contribuindo na economia nos custos de transportes de cargas. Contudo, o transporte por esse modal pode enfrentar dificuldades imprevistas como condições climáticas adversas e paralisações das operações, em que aumentam significativamente os custos de armazenagem, resultando em grandes variações nos valores totais pagos (ALVARENGA, 1994).

Dessa forma, os custos logísticos para a operação podem aumentar, visto que a taxa *demurrage* é um valor adicional decorrente do atraso da devolução do contêiner. Assim, uma indústria que importa seus suprimentos via modal marítimo enfrenta dificuldades no planejamento do sequenciamento de solicitação de retiradas das cargas devido a diversos fatores como problemas aduaneiros, congestionamento, fatores climáticos e greves. Sendo assim, de acordo com Tubino (2009) a dinâmica da logística atual possui um desafio de gerenciar os custos logísticos e o nível de serviço desejado.

De acordo com Ballou (2006) deve-se administrar de forma atenciosa os estoques para um bom desempenho de qualquer empresa. Sendo necessário atender suas restrições de capacidades, data de início da produção para atender a demanda, limitações físicas nas desovas e evitar custos da produção parada, alcançando o máximo de redução de custos e consequentemente a maximização dos lucros (BALLOU, 2008).

Dessa forma, Ballou (2008) afirma que é para fazer o melhor sequenciamento da produção com lotes é através da minimização dos custos de produção e estocagem. Ou seja, para a realização de um planejamento eficiente e eficaz é importante uma programação otimizada do recebimento dos contêineres respeitando as datas de recebimento na planta e retiradas dos materiais dos portos de destino atendendo suas restrições de capacidade e planejamento de produção.

O planejamento adequado da retirada de contêineres é fundamental para reduzir os custos logísticos e evitar cobranças de *demurrage* que oneram a operação. Segundo Song e Panayides (2012), o planejamento eficiente das retiradas garante maior sincronização entre portos e fábricas, evitando acúmulos e atrasos que resultam em custos adicionais. Da mesma forma, Christopher (2011) aponta que a falta de coordenação na programação logística compromete o cumprimento dos prazos contratuais, elevando gastos e reduzindo a competitividade das indústrias.

A ausência de uma estratégia de programação otimizada de contêineres afeta não apenas os custos financeiros imediatos, mas também a confiabilidade do abastecimento industrial. De acordo com Simchi-Levi et al. (2010), atrasos e falhas no sequenciamento da retirada podem gerar paradas de produção, aumentando os riscos de ruptura na cadeia de suprimentos. Christopher (2011) reforça que a otimização da programação logística contribui para reduzir variabilidades, elevar o nível de serviço e assegurar maior resiliência frente às incertezas operacionais.

Na indústria automotiva, caracterizada por elevados volumes de importação e prazos produtivos rígidos, a programação eficiente da retirada de contêineres constitui-se em um

diferencial competitivo. Segundo Wanke (2012), a sincronização entre fluxos logísticos e demandas produtivas reduz a probabilidade de paradas de linha, garantindo maior confiabilidade na operação. Nesse mesmo sentido, Ballou (2006) destaca que a gestão otimizada do transporte e dos estoques contribui não apenas para a minimização de custos como a *demurrage*, mas também para a criação de valor estratégico ao melhorar a flexibilidade e a capacidade de resposta da cadeia de suprimentos.

De forma complementar, Ivanov (2021) argumenta que cadeias de suprimentos modernas exigem modelos decisórios quantitativos capazes de integrar custos logísticos, riscos operacionais e níveis de serviço, reforçando que o uso de ferramentas analíticas e de otimização é fundamental para reduzir ineficiências e mitigar custos como o *demurrage*.

Nesse sentido, Song (2021) aborda diversos métodos de otimização e modelos estocásticos aplicados a cadeia de suprimentos, como Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira Mista (PLIM), heurísticas e meta-heurísticas, teoria de grafos, programação estocásticas e cadeia de Markov, vistas na Pesquisa Operacional (PO). Já Kobayashi e Tamaki (2017) utilizaram um modelo matemático baseado em PL para otimizar o agendamento de navios e gerenciamento de estoques que minimizam os custos totais da operação, incluindo o de *demurrage*.

Segundo Hillier e Lieberman (2013), o avanço computacional, com o desenvolvimento de computadores capazes de realizar cálculos em alta velocidade, possibilitou o tratamento eficiente de problemas complexos, cuja resolução manual seria inviável. Atualmente algumas montadoras enfrentam o problema de realização de ajustes manuais na alocação e definição da programação de recebimento de materiais para a produção automobilísticas, colocando em risco a realização da operação devido a falha humana devido à complexidade de análises repetitivas de muitas variáveis, ocasionando em uma tomada de decisão que não pode ser a solução ótima.

Nessa perspectiva, neste trabalho apresenta-se a modelagem do sequenciamento das retiradas de cargas utilizando princípios da PO, como solução para o problema de retirada e devolução de contêineres, em uma montadora multinacional do setor automotivo que importa peças de outros países via transporte marítimo. Dessa forma, o objetivo é minimizar, de forma sistematizada, os custos da taxa *demurrage* e custos de armazenagem portuária em uma montadora automobilística, utilizando um modelo exato PLIM e uma heurística gulosa construtiva denominada de *Heuristic for Sequencing of Container Retrieval* (HSCR).

1.1. OBJETIVOS

Neste trabalho propõe-se os objetivos a seguir.

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver métodos de otimização para reduzir custos de demurrage e armazenagem portuária nas retiradas e devoluções de contêineres em uma montadora multinacional do setor automotivo.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Revisar a literatura sobre logística, custos de *demurrage* e métodos de otimização aplicados ao setor automotivo;
- Caracterizar o processo logístico de importação de materiais da montadora, identificando restrições de capacidade, prazos e custos envolvidos;
- Modelar matematicamente o problema de programação de retiradas e devoluções de contêineres, considerando custos de armazenagem portuária e *demurrage*;
- Implementar o modelo proposto em linguagem Python para obtenção da solução ótima;
- Implementar a heurística construtiva HSCR para o problema de sequenciamento de contêineres, com o objetivo de obter soluções factíveis;
- Validar os resultados dos modelos por meio de um estudo de caso em uma montadora automotiva, comparando os cenários otimizados com as práticas atuais.

1.2. METODOLOGIA

Nessa seção será apresentado a metodologia utilizada nesse trabalho.

1.2.1. Caracterização da pesquisa

Este trabalho possui natureza aplicada, pois busca resolver um problema prático enfrentado por uma montadora automotiva por meio de ferramentas científicas. Quanto aos objetivos, caracteriza-se como uma pesquisa exploratória e descritiva, visto que busca compreender o problema da *demurrage* e propor uma solução matemática/heurística. Em relação à abordagem, a pesquisa é quantitativa, uma vez que utiliza modelagem matemática e métodos computacionais para análise de dados e experimentação.

1.2.2. Estratégia metodológica

A condução do trabalho seguiu três etapas principais:

1. Fundamentação teórica e revisão bibliográfica sistemática realizada conforme a metodologia *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), adotada por oferecer um procedimento estruturado e transparente para identificar, selecionar e analisar estudos relacionados a *demurrage*, custos logísticos, técnicas de otimização e modelos de programação de operações aplicáveis ao contexto;
2. Modelagem do problema, a formulação matemática do problema de programação de retiradas e devoluções de contêineres, considerando restrições logísticas, capacidade, prazos, custos de *demurrage* e de armazenagem portuária;
3. Proposição de método heurístico, desenvolvimento de uma heurística baseada em técnicas de sequenciamento de tarefas, com o objetivo de encontrar soluções viáveis.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, incluindo esta introdução.

No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica para os conceitos necessários para a compreensão do problema abordado e síntese da aplicação do método de revisão sistemática PRISMA.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia para o desenvolvimento do trabalho, indicando as etapas necessárias para a obtenção, análise e apresentação dos resultados. Além disso, detalha os modelos propostos para resolver o problema de sequenciamento de contêineres.

Os resultados obtidos com a aplicação dos modelos propostos são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

No Capítulo 5 tem-se a conclusão do trabalho e recomendação para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se conceitos essenciais para a compreensão do tema deste trabalho, tais como logística e cadeia de suprimentos no setor automotivo, comércio exterior e processos aduaneiros no Brasil, além dos conceitos de *demurrage*, suas regulamentações e impactos na indústria. Também é apresentada a revisão sistemática da literatura sobre o tema, realizada com base na metodologia PRISMA, por meio da qual foram selecionados os estudos mais relevantes para a compreensão do problema analisado.

Além disso, apresenta-se a PO aplicada a logística e modelagens matemáticas para a minimização de custos, apresentando conceitos e métodos de solução.

2.1. LOGÍSTICA E CADEIA DE SUPRIMENTOS NO SETOR AUTOMOTIVO

A logística desempenha papel decisivo no desempenho da indústria automotiva, pois sincroniza fluxos de materiais, informações e capacidade produtiva ao longo de múltiplos elos, do fornecedor ao cliente final. Em cadeias complexas e globalizadas, a coordenação interfuncional e interorganizacional é determinante para reduzir variabilidade, elevar o nível de serviço e sustentar a competitividade (CHRISTOPHER, 2011; CHOPRA; MEINDL, 2016). No contexto brasileiro, o setor automotivo possui elevada relevância econômica, representando parcela significativa do PIB da indústria de transformação, além de exercer efeito multiplicador sobre outros segmentos produtivos e de serviços (BNDES, 2018).

A participação do setor automotivo na economia nacional também reflete sua dependência de cadeias de suprimentos globais. A importação de insumos e componentes torna a indústria especialmente sensível a atrasos logísticos, variações cambiais e entraves aduaneiros. Segundo Ballou (2006), a gestão de estoques e fluxos de transporte em contextos de incerteza exige planejamento detalhado, pois longos *lead times* e falhas de coordenação impactam diretamente os custos operacionais. Tubino (2009) reforça que, em cadeias produtivas contínuas como a automotiva, o planejamento e controle da produção devem estar alinhados à disponibilidade de materiais, de forma a evitar rupturas e paradas de linha.

Os desafios logísticos são acentuados no caso da importação de insumos via transporte marítimo. Song (2021) observa que a utilização de contêineres transformou o comércio internacional ao viabilizar o transporte intermodal de mercadorias em grandes volumes e longas distâncias, mas também trouxe maior complexidade ao gerenciamento dos fluxos. A logística

de frete marítimo envolve múltiplos agentes, armadores, terminais portuários, operadores terrestres e clientes finais, exigindo coordenação rigorosa para evitar custos adicionais como armazenagem prolongada ou cobrança de sobrestadia (*demurrage*). Nesse sentido, a aplicação de modelos quantitativos e métodos de otimização, como a programação linear e inteira mista, é destacada por Song (2021) como recurso fundamental para reduzir ineficiências no transporte e minimizar custos logísticos.

A cadeia de suprimentos automotiva, portanto, deve ser compreendida como um conjunto de processos integrados que envolvem fluxos físicos, financeiros e informacionais desde os fornecedores até o consumidor final. De acordo com Christopher (2011), o gerenciamento eficiente da cadeia busca reduzir custos e, ao mesmo tempo, aumentar o valor percebido pelo cliente, enquanto Ballou (2006) reforça que a logística funciona como elo central de conexão entre produção, transporte e distribuição. Em mercados dinâmicos, Chopra e Meindl (2016) apontam que a coordenação entre diferentes atores é decisiva para sustentar a competitividade, sendo complementada pela visão de Bowersox et al. (2014), que destacam a importância da informação em tempo real para elevar o nível de serviço prestado.

Nesse contexto, os custos logísticos representam uma dimensão estratégica do desempenho da cadeia automotiva. Conforme Ballou (2006), decisões sobre transporte, armazenagem e estoques configuram *trade-offs* que afetam tanto a estrutura de custos quanto a confiabilidade do serviço. Christopher (2011) acrescenta que a criação de valor logístico depende de equilibrar eficiência e resposta rápida à demanda, enquanto Tubino (2009) salienta que falhas no planejamento de suprimentos podem comprometer a continuidade da produção e gerar custos adicionais, como paradas de linha ou pagamento de *demurrage*. Assim, a gestão logística no setor automotivo deve buscar o equilíbrio entre custo e nível de serviço, assegurando que as restrições operacionais e as exigências do mercado sejam atendidas de forma eficiente.

Com o avanço da globalização, as cadeias automotivas passaram a operar em ambientes de alta complexidade, caracterizados por múltiplos fornecedores em diferentes regiões do mundo. Simchi-Levi et al. (2010) destacam que a competitividade organizacional está diretamente relacionada à capacidade de estruturar cadeias ágeis e resilientes, aptas a responder a imprevistos. Ivanov et al. (2019) complementam que a vulnerabilidade a eventos disruptivos, como crises econômicas e pandemias, exige resiliência estrutural para manter a continuidade da produção e o abastecimento de componentes críticos.

Outro aspecto relevante está ligado ao uso de tecnologias digitais e conceitos da Indústria 4.0, que ampliam a visibilidade e o controle sobre os fluxos logísticos. Queiroz et al.

(2019) apontam que ferramentas como *big data analytics* e internet das coisas permitem maior integração entre os elos da cadeia, acelerando respostas às variações de demanda. Já Büyüközkan e Göçer (2018) ressaltam que a digitalização contribui para práticas logísticas mais sustentáveis e inovadoras, ao reduzir desperdícios e aprimorar a coordenação de recursos. No setor automotivo, tais ferramentas têm potencial para reduzir custos logísticos, otimizar o uso de contêineres e mitigar riscos de sobrestadia.

2.2. COMÉRCIO EXTERIOR E PROCESSOS ADUANEIROS NO CONTEXTO PORTUÁRIO BRASILEIRO

O processo de nacionalização de cargas no Brasil inicia-se com o registro da DI no Sistema Integrado de Comércio Exterior (Siscomex), conforme previsto no Decreto nº 6.759/2009, que regulamenta a administração aduaneira. De acordo com o Decreto nº 6.780/2009, a carga pode ser direcionada para os canais verde, laranja ou vermelho, sendo que o canal vermelho demanda conferência documental e física, aumentando significativamente o tempo de liberação (BRASIL, 2009). Em complemento, Costa e Silva (2015) explicam que a parametrização é fator decisivo para os prazos de desembaraço, podendo variar de horas, no canal verde, a semanas, no canal vermelho.

Os prazos de liberação têm impacto direto nos custos logísticos e operacionais, especialmente quando há cobrança de armazenagem e sobrestadia de contêineres. Segundo Kume et al. (2003), atrasos aduaneiros elevam o custo final de importação, pois ampliam a permanência das cargas em zonas alfandegadas. Da mesma forma, Moreira (2011) aponta que a ineficiência nos processos aduaneiros repercute em aumento do custo Brasil, reduzindo a competitividade das indústrias que dependem de insumos importados.

Entre os principais gargalos do comércio exterior brasileiro, a literatura destaca a excessiva burocracia e a falta de integração entre órgãos intervenientes. Para Amaral e Guedes (2017), o excesso de exigências documentais e a multiplicidade de verificações criam entraves que prolongam o tempo médio de despacho. Já Silva e Rocha (2012) ressaltam que fatores como greves de auditores fiscais e paralisações de categorias portuárias afetam diretamente a previsibilidade do processo de importação.

Além da burocracia institucional, condições operacionais e externas também configuram gargalos relevantes. Alvarenga (1994) observa que congestionamentos nos portos e terminais impactam o fluxo de mercadorias, prolongando o tempo de permanência das cargas. Além disso, Paura (2012) enfatiza que fatores climáticos adversos, como chuvas intensas e

ressacas marítimas, são recorrentes no contexto logístico brasileiro, ocasionando atrasos em atracções, descargas e transportes terrestres.

2.3. *DEMURRAGE*: CONCEITO, REGULAMENTAÇÃO E IMPACTOS

A *demurrage*, conhecida em português como sobrestadia de contêiner, corresponde à cobrança adicional aplicada quando o prazo de utilização do equipamento excede o período de isenção, ou *free time*, concedido pelo armador. De acordo com Cabral (2013), essa taxa é estabelecida em contrato de transporte e tem como objetivo compensar o uso prolongado do contêiner pelo importador. Nesse sentido, a *demurrage* constitui um mecanismo regulador do fluxo de contêineres na cadeia logística internacional, incentivando a devolução tempestiva dos equipamentos para que retornem ao ciclo operacional.

No Brasil, a regulamentação sobre a *demurrage* é atribuída à ANTAQ. A Resolução Normativa nº 18/2017 (ANTAQ, 2017) define critérios de transparência e publicidade na cobrança, exigindo que os valores e prazos sejam informados previamente ao contratante. De acordo com a ANTAQ (2017), o descumprimento dessas regras configura infração passível de penalidade administrativa, reforçando a necessidade de previsibilidade e segurança jurídica nas operações. Esse marco regulatório busca reduzir conflitos entre armadores, agentes de carga e importadores, conferindo maior equilíbrio às relações contratuais.

Os custos de *demurrage* podem ser classificados em diretos e indiretos. Como custos diretos, incluem-se os valores diários cobrados pelo uso excedente do contêiner, que variam conforme o tipo e o tempo de permanência. Segundo Kobayashi e Tamaki (2017), esse encargo tem impacto significativo no custo total da operação logística, podendo comprometer a viabilidade econômica da importação quando não há planejamento adequado. Já os custos indiretos estão associados a atrasos no abastecimento das linhas de produção, à imobilização de capital em estoques e ao aumento dos gastos com armazenagem portuária, como apontam Simchi-Levi et al. (2010).

A importância do planejamento logístico na mitigação da *demurrage* é destacada em diversos estudos. Christopher (2011) observa que a sincronização entre os fluxos de transporte, desembarço aduaneiro e produção é determinante para reduzir riscos de sobrestadia. Da mesma forma, Tubino (2009) enfatiza que a integração entre programação da produção e suprimentos garante maior confiabilidade ao processo, evitando custos adicionais decorrentes de falhas no sequenciamento das retiradas. A ausência de planejamento estruturado, portanto,

amplia a probabilidade de atrasos, reprogramações e impactos negativos sobre o nível de serviço.

Outro aspecto relevante é a relação entre a *demurrage* e os gargalos estruturais dos portos brasileiros. Song (2021) ressalta que congestionamentos em terminais, limitações operacionais e atrasos em atracções contribuem para aumentar o tempo de permanência dos contêineres, elevando a incidência da taxa. Ivanov et al. (2019) destacam que eventos disruptivos, como crises econômicas ou greves portuárias, intensificam os custos logísticos, exigindo estratégias de resiliência e adaptabilidade das cadeias de suprimentos.

Por fim, a *demurrage* deve ser compreendida não apenas como uma penalidade contratual, mas como um fator estratégico de gestão logística. Ballou (2006) aponta que a tomada de decisão sobre estoques e transportes deve considerar o equilíbrio entre custos e nível de serviço, sendo a sobrestadia um dos elementos que ampliam a complexidade dessa equação. Bowersox et al. (2014) reforçam que práticas de planejamento avançado e coordenação interorganizacional reduzem significativamente o risco de incidência da taxa, ao alinhar os elos da cadeia de suprimentos em torno de objetivos comuns de eficiência e redução de custos.

2.4. REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE *DEMURRAGE*

A metodologia PRISMA constitui um dos principais referenciais para a condução de revisões sistemáticas, pois fornece um conjunto de diretrizes padronizadas que orientam desde a formulação da questão de pesquisa até a síntese dos resultados encontrados. De acordo com Liberati et al. (2009), o uso do PRISMA contribui para aumentar a transparência e a reprodutibilidade dos estudos, permitindo que outros pesquisadores compreendam e repliquem o processo adotado. Moher et al. (2009) complementam que a padronização metodológica é essencial para reduzir vieses, assegurando maior rigor científico na seleção e análise das publicações incluídas.

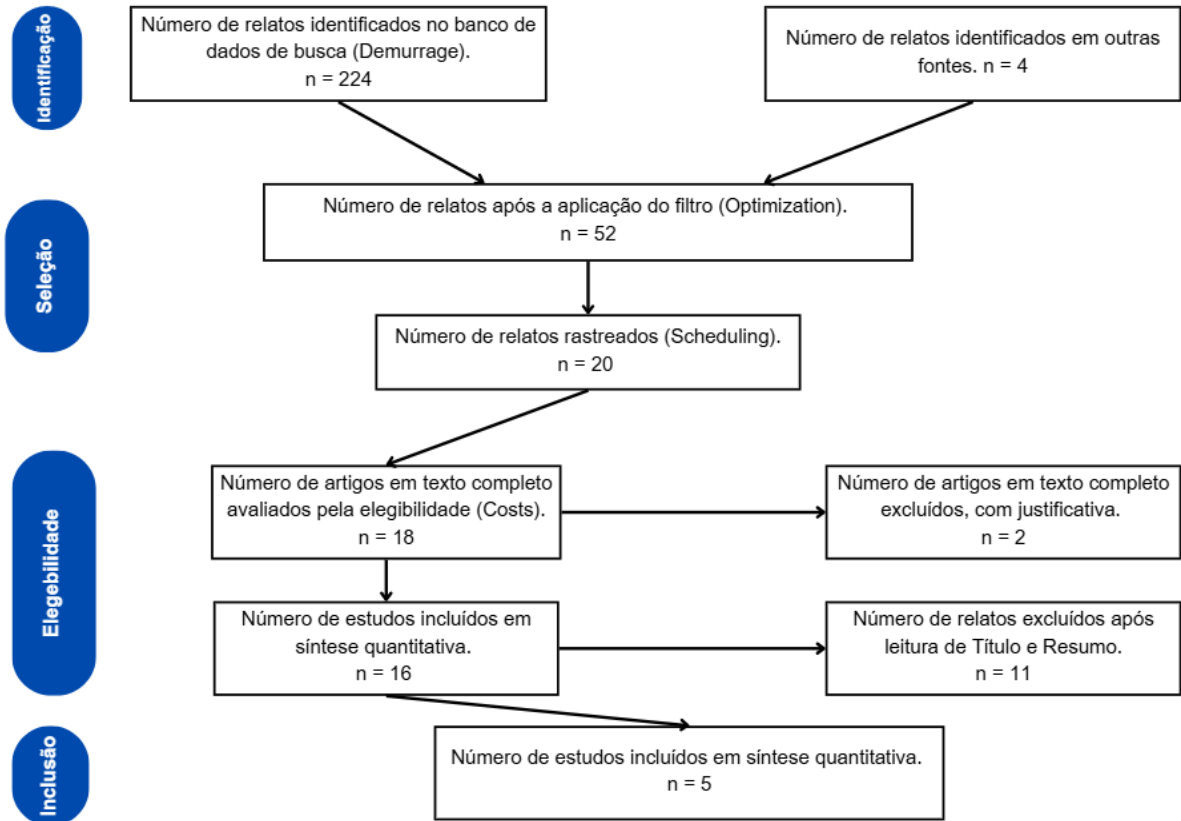
Além disso, a aplicação do PRISMA auxilia na clareza da comunicação científica, uma vez que define critérios explícitos de inclusão e exclusão de artigos, além de exigir a apresentação de fluxogramas que detalham o processo de triagem das fontes. Segundo Page et al. (2021), a utilização desse protocolo favorece a consistência na condução de revisões em diferentes áreas do conhecimento, tornando os resultados mais confiáveis. Para Siddaway et al. (2019), essa abordagem contribui para o avanço da ciência ao reunir, avaliar criticamente e sintetizar evidências dispersas em um corpo de conhecimento consolidado.

De acordo com Page et al. (2021), a recomendação PRISMA tem como objetivo assegurar que todas as informações relevantes sejam contempladas no planejamento e na execução de uma revisão sistemática. Na versão mais recente, denominada PRISMA 2020, os autores apresentam um checklist composto por 27 itens e subitens, acompanhado de um fluxograma que orienta o processo de identificação, seleção e inclusão dos estudos.

A pesquisa foi conduzida no banco de dados Scopus com ampla cobertura de literaturas científicas, técnicas e estudos realizados por outros autores. Inicialmente, a pesquisa foi realizada através de filtros em português, porém não foram encontrados resultados relevantes. A definição dessa combinação de termos foi necessária para direcionar a revisão exclusivamente aos estudos que tratam *demurrage* sob uma perspectiva analítica. O termo “*demurrage*” permitiu identificar a literatura geral sobre sobrestadia; “*optimization*” restringiu a busca aos trabalhos que empregam métodos quantitativos; “*scheduling*” delimitou o foco aos estudos de programação e sequenciamento, que se aproximam do problema enfrentado por montadoras; e “*costs*” garantiu a seleção apenas de pesquisas que analisam impactos econômicos mensuráveis. Esse encadeamento progressivo de filtros assegurou que os estudos recuperados fossem diretamente relacionados ao objetivo deste trabalho, evitando resultados genéricos que não apresentassem técnicas de otimização aplicáveis ao contexto.

A metodologia PRISMA possui uma estratégia dividida em quatro partes principais sendo a identificação, seleção, elegibilidade e inclusão (Page et al., 2021). O objetivo destas etapas é demonstrar a quantidade de estudos encontrados em cada etapa de busca da seleção sistemática até a seleção final que será utilizada no estudo, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma Prisma



Fonte: Autoria Própria (2025).

Dessa forma, os seguintes passos foram seguidos no processo de seleção descrito acima:

1. Palavra-chave *Demurrage*: Nesta etapa foram encontrados 228 registros, sendo 224 na base de dados *Scopus* e quatro no repositório da UFSC. Apresentando todos os estudos relacionados a custos de *demurrage*, porém ainda assim estava muito genérico;
2. Palavra-chave *Optimization*: Esta etapa apresentou 52 registros somente na base de dados *Scopus* reduzindo o campo de busca. Apresentando trabalhos que tratavam a taxa *demurrage* em modelos de otimização;
3. Palavra-chave *Scheduling*: Após adicionar esta palavra como critério de seleção foram encontrados 20 registros na base. Apresentando métodos de sequenciamento em modelos de otimização com a tratativa dos custos de *demurrage*;
4. Palavra-chave *Costs*: Com a aplicação deste filtro, dois registros foram removidos do sistema, pois o tema e o escopo desses trabalhos não estavam alinhados com o que será abordado neste estudo, resultando em 16 registros.

Assim, após a aplicação dos filtros abordados no fluxograma foram selecionados 16 estudos para a última etapa de análise, a triagem de ler os títulos e os resumos dos artigos para verificar se os trabalhos apresentam características semelhantes com o tema deste trabalho. Dessa forma, 11 trabalhos foram descartados, por apresentarem um escopo incompatível. Ao final, cinco estudos foram incluídos na base de análise deste trabalho.

Esses artigos apresentam contribuições relevantes para a compreensão da *demurrage* e das estratégias de otimização. Gao et al. (2021) propõem um modelo PLIM para otimizar o agendamento de descarregamento de navios em uma planta siderúrgica, destacando ganhos na redução do tempo de espera e dos custos de sobrestadia. Kobayashi e Tamaki (2017) utilizam um modelo de PL acoplado à gestão de inventário, mostrando que a coordenação entre o agendamento de navios e a política de estoques pode reduzir simultaneamente custos de frete e de *demurrage*.

Wang et al. (2014) empregam técnicas de otimização combinatória para realizar a coordenação simultânea de cronogramas e alocação de cargas em redes de transporte marítimo, demonstrando que a sincronização entre navios e terminais contribui para minimizar gargalos logísticos e custos de armazenagem. Já Rahman et al. (2010) aplicam a programação por metas (*goal programming*) para equilibrar *trade-offs* entre tempo e custo nas operações de movimentação portuária de contêineres, reforçando a utilidade de modelos quantitativos em ambientes de múltiplas restrições.

Por fim, Zhang et al. (2020) desenvolvem um modelo de otimização baseada em custos, no qual a função objetivo contempla não apenas o custo operacional do transporte, mas também penalidades por atrasos e custos de *demurrage*. Dessa forma, o estudo evidencia a relevância de incorporar diferentes dimensões econômicas em modelos de agendamento de embarques, aproximando-se da realidade das operações logísticas internacionais.

A síntese dos artigos selecionados por meio da metodologia PRISMA é apresentada no Quadro 1, contemplando seus respectivos objetivos, métodos de solução empregados e principais contribuições para a compreensão da *demurrage* no contexto logístico.

Quadro 1 – Síntese dos artigos selecionados na revisão sistemática PRISMA

Autor(es) / Ano	Título	Objetivo do estudo	Método utilizado	Principais contribuições
Gao; Sun; Zhao; Dong (2020)	<i>Ship-unloading scheduling optimization for a steel plant</i>	Otimizar o agendamento de descarregamento de navios em uma planta siderúrgica, reduzindo espera e penalidades de <i>demurrage</i> .	Modelo PLIM resolvido com o <i>solver</i> CPLEX.	Redução do tempo de espera e custos de sobrestadia (<i>demurrage</i>) por meio de programação do descarregamento e uso de recursos; estudo de caso industrial.
Kobayashi; Tamaki (2017)	<i>A method of ship scheduling and inventory management problem for reducing demurrage and freight</i>	Integrar programação de navios e gestão de estoques para reduzir custos logísticos (frete, estoque e <i>demurrage</i>).	PL com restrições de inventário; enfoque de integração envio-estoque	Minimização conjunta de custos de frete, estoque e <i>demurrage</i> via modelo integrado; abordagem prática para coordenação porto-planta.
Wang; Wang; Meng (2014)	<i>Simultaneous optimization of schedule coordination and cargo allocation for liner container shipping networks</i>	Coordenar simultaneamente cronogramas e alocação de cargas em redes de contêineres.	PLIM, modelo transformado em formulação linear inteira equivalente.	Melhor sincronização entre navios/terminais e redução de custos portuários, inclui custos de armazenagem e <i>demurrage</i> na função objetivo.
Rahman; Sarno; Effendi (2018)	<i>Goal Programming to Optimize Time and Cost for each Activity in Port Container Handlig</i>	Equilibrar tempo e custo nas operações portuárias de movimentação de contêineres.	Programação por Metas (<i>Goal Programming</i>) implementada no LINGO.	Tratamento eficiente de <i>trade-offs</i> entre tempo de operação e custos logísticos; identificação de atividades críticas que elevam atrasos e <i>demurrage</i> .
Lam; Englert (2009)	<i>Cost-based optimization of shipment scheduling</i>	Minimizar o custo total de embarques (envio, armazenagem, <i>demurrage</i> e transporte terrestre).	Otimização não linear determinística (modelo de custo).	Formulação que incorpora penalidades por atrasos/ <i>demurrage</i> e custos logísticos completos, aumentando a aderência à operação real.

Fonte: Autoria Própria (2025).

2.5. PESQUISA OPERACIONAL APLICADA Á LOGÍSTICA

A PO constitui um campo de conhecimento essencial para a logística, pois possibilita o tratamento de problemas complexos de alocação de recursos e planejamento de operações. Sua origem remonta à Segunda Guerra Mundial, quando técnicas matemáticas foram aplicadas a operações militares, mas rapidamente expandiu-se para os setores industriais e de serviços. De acordo com Hillier e Lieberman (2013), a PO fornece instrumentos analíticos que permitem formular problemas reais de forma estruturada, considerando múltiplas restrições e objetivos conflitantes. Para Taha (2011), trata-se de uma abordagem científica para a tomada de decisão, oferecendo suporte à escolha da melhor utilização de recursos em ambientes de elevada complexidade.

2.5.1. Métodos Exatos: Programação Linear e Inteira Mista

Entre os métodos mais consolidados da PO, a PL destaca-se por permitir a formulação de problemas de transporte, estoques e produção a partir de variáveis de decisão contínuas e restrições lineares. Hillier e Lieberman (2013) salientam que a PL garante soluções ótimas em tempo computacional reduzido, desde que aplicada a problemas de porte moderado. No contexto logístico, Song (2021) reforça que a PL tem ampla aplicação no planejamento de rotas e na alocação de recursos, incluindo a redução de custos de transporte e armazenagem.

Entretanto, muitas situações logísticas requerem variáveis discretas, como datas de retirada de contêineres ou número de veículos. Para esses casos, a PLIM constitui uma extensão natural da PL, pois combina variáveis inteiras e contínuas em um mesmo modelo. Wolsey (1998) afirma que a PLIM é adequada para problemas combinatórios de transporte e produção, enquanto Bertsimas e Tsitsiklis (1997) ressaltam que essa técnica amplia a capacidade de representação da realidade. Apesar de sua robustez, Nemhauser e Wolsey (1999) alertam que modelos de grande porte em PLIM podem tornar-se intratáveis, exigindo técnicas complementares para viabilizar soluções.

Nessa linha, Pinedo (2008) e Baker (2018) destacam que, embora a PLIM seja teoricamente adequada para problemas de sequenciamento, muitas vezes a utilização de heurísticas é necessária para garantir soluções em tempo hábil.

2.5.2. Heurísticas e Meta-heurísticas

Diante das limitações dos métodos exatos em problemas de grande escala, heurísticas e meta-heurísticas surgem como alternativas viáveis. As heurísticas são métodos aproximados que buscam soluções factíveis em tempo reduzido, ainda que não garantam a otimalidade global. Glover e Kochenberger (2003) apontam que essas técnicas são úteis em cenários nos quais o espaço de busca é muito amplo para ser explorado exaustivamente. Já Reeves (1993) reforça que a principal vantagem das heurísticas é sua simplicidade e velocidade na obtenção de soluções aceitáveis.

As meta-heurísticas, por sua vez, representam uma evolução das heurísticas, explorando o espaço de soluções de forma mais abrangente e estruturada. Segundo Talbi (2009), algoritmos como busca tabu, *simulated annealing* e algoritmos genéticos são amplamente aplicados em problemas de logística e produção. Osman e Laporte (1996) destacam que a capacidade de escapar de ótimos locais é a principal característica das meta-heurísticas, permitindo que soluções de melhor qualidade sejam alcançadas. De acordo com Blum e Roli (2003), sua flexibilidade garante aplicação em diferentes contextos, desde o planejamento de transportes até a alocação de recursos em cadeias de suprimentos.

2.5.2.1. Heurísticas Construtivas

Entre as heurísticas, as construtivas têm especial relevância em problemas de sequenciamento, pois constroem soluções de forma incremental até alcançar um resultado viável. Martello e Toth (1990) destacam que esse método é eficiente em problemas combinatórios nos quais os modelos exatos são inviáveis devido ao grande número de variáveis. Feo e Resende (1995) complementam que, pela sua rapidez, as heurísticas construtivas são particularmente úteis em problemas de roteamento, escalonamento e logística portuária.

Resende e Ribeiro (2003) ressaltam que, embora as heurísticas construtivas forneçam soluções iniciais, estas podem ser aprimoradas posteriormente por técnicas de melhoria local ou meta-heurísticas, aumentando sua qualidade. Pinedo (2016) e Baker e Trietsch (2009) reforçam que sua aplicação em ambientes industriais garante a continuidade operacional, mesmo em cenários com múltiplas restrições de capacidade e tempo. Pinedo (2016) e Zhang e Gen (2005) observam que, ao serem associadas a meta-heurísticas, essas técnicas elevam significativamente o desempenho da solução final, consolidando-se como ferramentas pragmáticas para problemas reais.

2.5.3. Aplicações em logística portuária e transporte marítimo

A PO tem mostrado grande impacto na logística portuária, onde custos como *demurrage* podem comprometer a competitividade de empresas importadoras. Kobayashi e Tamaki (2017) aplicaram PL ao agendamento de navios e controle de estoques, obtendo reduções significativas em custos logísticos. Song (2021) complementa que a integração de modelos matemáticos à gestão portuária possibilita minimizar tempos de espera e coordenar fluxos intermodais, aumentando a eficiência das cadeias globais. Esses estudos demonstram como a PO é fundamental para o setor automotivo, em que a dependência de insumos importados é elevada.

2.5.4. Modelos de otimização

Os artigos selecionados pela revisão PRISMA reforçam a diversidade de métodos aplicados à mitigação da *demurrage*. Gao et al. (2010) modelaram o descarregamento de navios em uma siderúrgica utilizando PLIM, reduzindo tempos de espera. Wu et al. (2013) aplicaram programação por metas para equilibrar custo e tempo nas operações de contêineres. Kobayashi e Tamaki (2017) propuseram PL para integrar o gerenciamento de estoques e minimizar custos de *demurrage* e frete. Li et al. (2012) desenvolveram um modelo de otimização baseado em custos para agendamento portuário, enquanto Song (2021) apresentou técnicas de coordenação de cronogramas e alocação de cargas em redes de transporte marítimo. Em conjunto, esses trabalhos evidenciam a importância de modelos exatos e híbridos para enfrentar os desafios logísticos de grande escala.

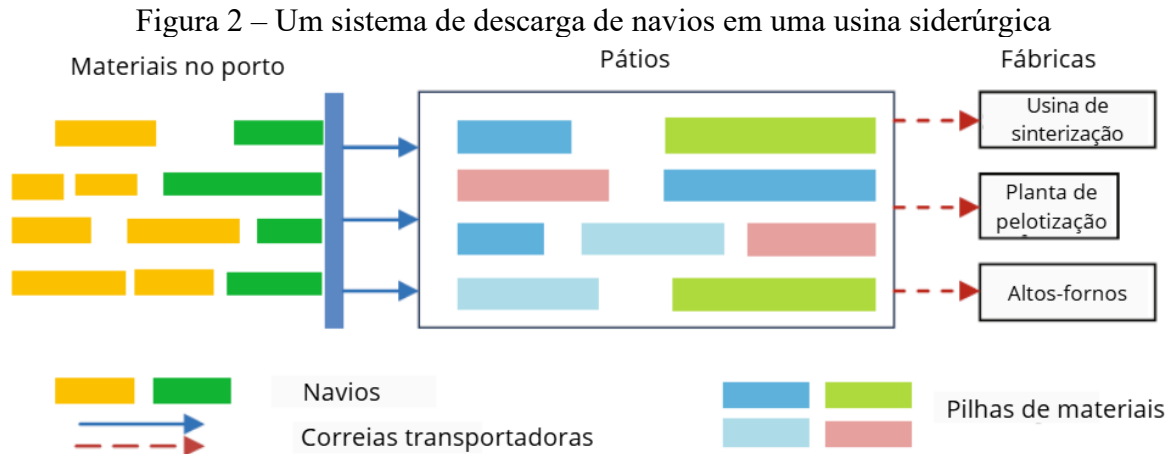
Assim, a PO aplicada à logística abrange desde métodos exatos, como a PL e a PLIM, até heurísticas, meta-heurísticas e modelos estocásticos, cada qual adequado a diferentes dimensões e níveis de complexidade dos problemas. As aplicações na literatura portuária e nos artigos selecionados confirmam que a integração dessas abordagens é essencial para reduzir custos logísticos e, em especial, a *demurrage*. No contexto deste trabalho, a adoção de uma heurística construtiva em Python busca atender a essa necessidade prática, propondo um modelo de sequenciamento de retiradas de contêineres capaz de equilibrar restrições operacionais e minimizar penalidades financeiras associadas ao atraso na devolução.

2.6. MÉTODOS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE *DEMURRAGE* E CUSTOS DE ARMAZENAGEM PORTUÁRIA

A modelagem matemática desempenha papel central na tomada de decisão logística, pois possibilita a tradução de problemas reais em representações formais compostas por variáveis, parâmetros, restrições e funções objetivo. Hillier e Lieberman (2013) ressaltam que essa abordagem permite analisar cenários complexos de forma estruturada, viabilizando soluções ótimas ou próximas do ótimo. Em ambientes com múltiplas restrições de tempo, capacidade e custo, como o sequenciamento de contêineres e o agendamento de operações portuárias, o formalismo matemático é decisivo para identificar soluções ótimas ou próximas do ótimo (TAHA, 2011).

O uso de softwares especializados, como *A Mathematical Programming Language* (AMPL), *General Algebraic Modeling System* (GAMS) e CPLEX, tem ampliado a aplicabilidade prática da modelagem matemática, permitindo lidar com problemas de grande porte de forma eficiente. Wolsey (1998) observa que a integração entre formulações matemáticas e solucionadores comerciais possibilita enfrentar problemas de PLIM com milhares de variáveis e restrições, reduzindo significativamente o tempo de processamento. Esse aspecto também é ressaltado por Bertsimas e Tsitsiklis (1997), ao afirmarem que a utilização de ambientes computacionais avançados representa um recurso indispensável para tornar a otimização factível no contexto logístico.

Entre os trabalhos selecionados com o PRISMA, Gao et al. (2021) estudaram o *Ship-Unloading Scheduling Problem* (SUSP) em uma usina siderúrgica. Navios transportando matérias-primas como minério de ferro, carvão e calcário devem ser descarregados respeitando janelas de chegada e partidas contratuais; se a descarga não termina a tempo, incidem custos de sobrestadia (*demurrage*). O objetivo é otimizar a programação de atracação e descarregamento para minimizar o custo total de *demurrage*. O sistema físico considerado envolve berços de atracação, descarregadores, três correias transportadoras e pátios de estocagem com capacidade limitada. A Figura 2, ilustra esse sistema típico de descarga em uma planta siderúrgica.



Gao et al. (2021) estruturaram o problema como PLIM, tratando navios como “tarefas” e correias como “máquinas”, caracterizando um *job-shop* flexível com acoplamento via estoques do pátio. Para representar o problema, os autores definiram índices, parâmetros e variáveis de decisão. Os índices contemplam navios (i), correias transportadoras (j), matérias-primas (k) e períodos de tempo (t). Os parâmetros incluem, por exemplo, a quantidade de material transportada por cada navio, a velocidade de cada correia, a capacidade de estocagem do pátio e os custos de *demurrage*. As variáveis de decisão indicam a alocação de navios às correias em cada período, além dos tempos de início e término das operações e dos níveis de estoque de cada material. A Tabela 1, sintetiza as notações utilizadas no modelo.

Tabela 1 – Índices, parâmetros e variáveis do modelo de descarregamento de navios

Notação	Descrição
<i>Índices</i>	
i	Navio
j	Correia Transportadora
k	Matéria-Prima
t	Período de Tempo
<i>Definição</i>	
I	Navios
J	Correias Transportadoras
K	Matérias-Primas
T	Períodos de Tempo
I_k	Navios que transportam matéria $k, k \in K$
J_i	Transportadores de correia que podem ser usados para descarregar navios $i, i \in I$
<i>Parâmetros</i>	
b_{ik}	Quantidade de material k que o navio i transportou, $i \in I, k \in K$
V_j	Velocidade de transferência da correia transportadora $j, j \in J$
T_i^D	Hora prevista de partida do navio $i, i \in I$
T_i^R	Hora de chegada do navio $i, i \in I$
H_c	Capacidade de armazenamento do pátio de estocagem
h_{k0}	Estoque de material k no início do horizonte $k \in K$
d_{kt}	Demanda do material k no período $t, k \in K, t \in T$
C_i	Custo de sobrestadia do navio i (por hora), $i \in I$
P_{ij}	Tempo de descarga do navio i usando a correia transportadora j ,
	$p_{ij} = \sum_k \frac{b_{ik}}{V_j}, i \in I, j \in J$
M	Um número positivo suficiente grande
<i>Variáveis</i>	
y_{ijt}	Variável binária: 1 se no período de tempo t , o navio i começa a ser descarregado e conectado ao transportador de correia j , 0, caso contrário, $i \in I, j \in J, t \in T$
t_i^B	Hora de início de descarregamento do navio $i, i \in I$
t_i^E	Hora final de descarregamento do navio $i, i \in I$
h_{kt}	Estoque de matéria-prima k no final do período $t, k \in K, t \in T$

Fonte: Adaptado Gao et al. (2021).

Considerando-se os elementos definidos na Tabela 1, Gao et al. (2021) formularam a função objetivo do modelo que minimiza o custo total de *demurrage*, conforme a Equação (1), para todos os navios que chegam dentro do horizonte de planejamento T.

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} C_i * (t_i^E - T_i^D) \quad (1)$$

Em que:

- C_i : custo de *demurrage* do navio i ;
- t_i^E : tempo final de descarregamento do navio i ;
- T_i^D : tempo de partida esperado do navio i

Sujeito às Restrições (2) a (13), como detalhado a seguir:

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} y_{ijt} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i' \in I} \sum_{t'=t}^{t+P_{ij}-1} y_{ij't'} - 1 \leq M(1 - y_{ijt}) \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_i y_{ijt} \leq 1 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ijt} \leq |J| \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t=1}^{T_i^R-1} y_{ijt} = 0 \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$t_i^B = \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} t y_{ijt} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$t_i^E = t_i^B + \sum_j \sum_t p_{ij} y_{ijt} - 1 \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$h_{k,t-1} + \sum_{i \in I_k} \sum_{j \in J_i} b_{ik} y_{ij,t-p_{ij}} = h_{kt} + d_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} h_{kt} \leq H_c \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$y_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (11)$$

$$t_i^B, t_i^E \in [T_i^R, T] \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$h_{kt} > 0 \quad \forall k \in K, t \in T \quad (13)$$

A Equação (2) assegura que cada navio seja designado a uma e apenas uma correia transportadora durante o período de agendamento. A Equação (3) estabelece que, uma vez que uma correia tenha sido alocada a determinado navio, ela permanecerá ocupada até que a operação de descarga tenha sido concluída, impedindo sua utilização por outros navios nesse período de tempo. A Equação (4) define que, em qualquer instante de tempo, uma correia transportadora pode atender no máximo a um navio, garantindo a exclusividade operacional do equipamento. A Equação (5) limita o número máximo de correias que podem operar simultaneamente, representado por $|J|$.

A Equação (6) impõe que a atribuição de uma correia a um navio só pode ocorrer após a chegada efetiva deste ao porto, respeitando a sequência temporal das operações. Já as Equações (7) e (8) calculam, respectivamente, o tempo de início e de término do descarregamento de cada navio, considerando a duração de operação associada à correia designada. A Equação (9) expressa o balanço de estoques das matérias-primas ao longo dos períodos, relacionando as entradas provenientes do descarregamento e as saídas destinadas à produção. Além disso, a Equação (10) impõe o limite de capacidade de armazenamento do pátio de estocagem, assegurando que o volume acumulado em cada período não ultrapasse a capacidade máxima instalada.

As Equações (11) - (13) complementam o modelo ao garantir a consistência e a viabilidade das decisões representadas. A Equação (11) estabelece que as variáveis y_{ijt} assumem exclusivamente valores binários, assegurando a correta interpretação da decisão de início de descarregamento no período t . A Equação (12) define os limites temporais permitidos para o início e o término das operações de cada navio, mantendo a coerência do modelo em relação ao horizonte de planejamento e impedindo atribuições fora das janelas operacionais previstas. Por fim, a Equação (13) impõe a não negatividade dos níveis de estoque, garantindo que o pátio opere apenas com quantidades fisicamente possíveis e evitando resultados inviáveis para o volume acumulado ao longo do tempo.

Em termos operacionais, as restrições garantem que cada correia atenda a um único navio por vez, que nenhuma decisão viole chegada/partida, que estoques não ultrapassem a capacidade e que a demanda seja atendida ao longo do horizonte.

Essa formulação, resolvida inicialmente via *solver* CPLEX e aprimorada com técnicas de geração de colunas, permitiu obter soluções eficientes mesmo em cenários de grande escala, nos quais métodos exatos tradicionais apresentavam dificuldade em convergir em tempo hábil. Os resultados empíricos mostraram que a aplicação do modelo possibilitou à usina siderúrgica reduzir em aproximadamente 20 milhões de CNY/ano os custos de *demurrage*, evidenciando o

potencial da modelagem matemática como ferramenta estratégica para a minimização de custos logísticos.

Outros estudos identificados também exploram diferentes formulações matemáticas para problemas logísticos e portuários. Kobayashi e Tamaki (2009) propuseram um modelo de PLIM integrado à gestão de estoques e agendamento de navios, visando à redução simultânea dos custos de frete e *demurrage*. Lam e Englert (2009), por sua vez, desenvolveram um modelo de otimização baseada em custos aplicado ao agendamento de embarques, incorporando penalidades por atrasos e restrições de capacidade, de modo a gerar cronogramas mais realistas.

Já Rahman et. al (2018) aplicaram Programação por Metas (*Goal Programming*) para otimizar o tempo e o custo de cada atividade no manuseio portuário de contêineres, destacando a relevância de modelos multicritério para balancear desempenho operacional e despesas logísticas. Wang et. al (2014) também desenvolveram uma formulação de PLIM voltada à coordenação simultânea de cronogramas e alocação de cargas em redes de navegação de contêineres, demonstrando ganhos de eficiência e sincronização entre terminais e embarcações.

Outros estudos reforçam a importância da modelagem matemática para decisões em transporte marítimo. Li et al. (2012) desenvolveram um modelo de otimização baseada em custos para cronogramas de embarque, integrando restrições operacionais de janelas de tempo e capacidade de transporte. Song (2021), por sua vez, apresentou um modelo de PLIM para coordenação de cronogramas e alocação de carga em redes de contêineres, destacando que a integração entre agendamento e transporte é decisiva para reduzir atrasos e custos logísticos. Esses trabalhos demonstram que, embora modelos exatos sejam predominantes, heurísticas ou métodos híbridos frequentemente se tornam necessários em cenários de grande escala.

De acordo com a literatura recente, a opção por uma heurística construtiva mostra-se apropriada para o problema em estudo, dado o seu porte e a natureza combinatória das restrições operacionais. Em particular, Gao et al. (2021) modelam o escalonamento de descarga em planta siderúrgica via PLIM e ressaltam que, apesar do rigor da formulação, a busca por soluções exatas pode tornar-se onerosa em instâncias realistas, justificando o emprego de procedimentos heurísticos para obter soluções factíveis em tempo operacional. De modo convergente, Kobayashi e Tamaki (2012) indicam que modelos de programação para agendamento de navios e gestão de estoques tendem a crescer rapidamente em variáveis e restrições, o que demanda estratégias aproximativas ou híbridas para manter a viabilidade computacional sem perder aderência às regras do processo (KOBAYASHI; TAMAKI, 2012).

Essas abordagens demonstram que, embora os modelos exatos como PLIM e *Goal Programming* permitam representar detalhadamente as restrições do sistema, seu custo

computacional pode ser elevado em casos reais, justificando o uso de heurísticas construtivas ou híbridas. Assim, observa-se que a modelagem matemática constitui não apenas um recurso analítico, mas também uma base metodológica para a proposição de soluções inovadoras. Os estudos analisados evidenciam que a minimização dos custos logísticos, em especial os de *demurrage*, está intrinsecamente ligada ao uso de modelos de otimização apoiados por softwares especializados.

Nesse sentido, o presente trabalho alinha-se às práticas descritas na literatura ao desenvolver um modelo PLIM proposto e adotar uma heurística construtiva implementada em Python, baseada em regras de prioridade e restrições operacionais, capaz de gerar soluções factíveis em tempo hábil para o problema de sequenciamento de contêineres e minimização de custos de *demurrage*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Primeiramente, apresentam-se o contexto e os dados empregados no estudo de caso, contemplando informações sobre o processo logístico da montadora automotiva analisada e os custos envolvidos na operação. Em seguida, detalha-se a modelagem matemática do problema, concebido como um problema de sequenciamento de tarefas com restrições de capacidade, prazos e custos associados.

Na sequência, expõe-se a heurística HSCR proposta, desenvolvido para apoiar a tomada de decisão no planejamento das retiradas e devoluções de contêineres, tendo como objetivo a minimização dos custos de *demurrage* e de armazenagem portuária.

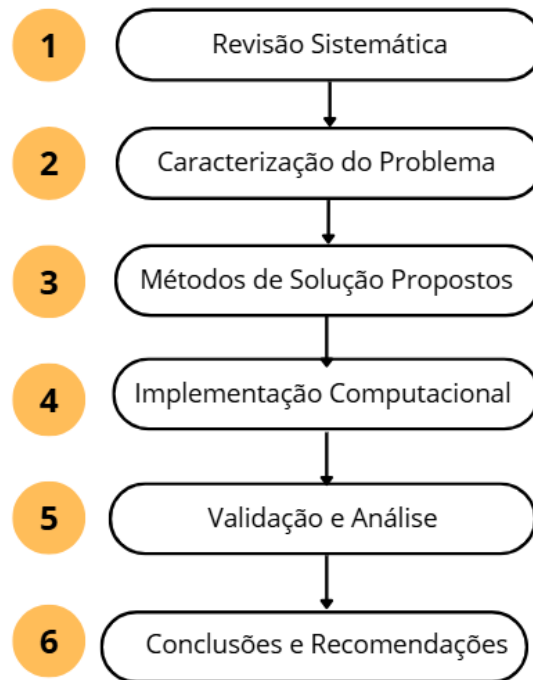
Por fim, são descritos os procedimentos de implementação computacional e os critérios de validação das soluções, que permitem comparar os resultados obtidos com as práticas atualmente adotadas pela empresa.

Segundo Gil (2017), a definição do caminho metodológico é fundamental para assegurar a coerência do estudo e possibilitar que ele seja replicado em outros contextos.

Com base nisso, esta pesquisa foi dividida em seis etapas principais:

- (i) Revisão Sistemática, que busca identificar os principais estudos e práticas relacionadas ao tema;
- (ii) Caracterização do Problema, em que se estabelecem a definição do problema, as condições que delimitam o estudo, a coleta de dados, voltada ao levantamento das informações necessárias para a análise;
- (iii) Métodos de Solução Propostos, no qual são apresentados os métodos realizados;
- (iv) Implementação Computacional, em que é apresentado as condições das implementações;
- (v) Validação e Análise, em que são apresentados e analisados os resultados obtidos para as instâncias propostas que consiste em avaliar o desempenho da solução proposta e compará-la com a situação atual; e
- (vi) Conclusões e Recomendações, no qual são apresentadas as conclusões finais e recomendações futuras, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Etapas Metodológicas



Fonte: Autoria Própria (2025).

3.1. REVISÃO SISTEMÁTICA

Essa primeira etapa consiste na realização de uma revisão sistemática da literatura em relação ao *demurrage* e custos de armazenagem, apresentada na seção 2.4 e fundamentada na metodologia PRISMA. Nessa etapa, foram identificados, analisados e selecionados os principais estudos que abordam a minimização dos custos logísticos em operações portuárias e marítimas, com ênfase em modelos de otimização e planejamento de descarga de navios. A sistematização permitiu mapear as abordagens mais relevantes empregadas na literatura, destacando lacunas teóricas e metodológicas que justificam o desenvolvimento do presente estudo.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A definição do problema abordado nesse trabalho foi desenvolvida a partir da análise das demandas operacionais de uma montadora automotiva que importa seus suprimentos da Alemanha e dos Estados Unidos. É recebido mensalmente uma base de dados em uma planilha que contém as informações dos materiais que serão enviados via modal marítimo para dois portos brasileiros, Porto Itapoá e Porto de Navegantes, onde é feita a programação de retirada de contêineres manualmente em uma planilha eletrônica.

Na Figura 4 apresenta-se, de maneira esquemática, os países de origem dos materiais importados pela montadora e o destino final no Brasil. O mapa tem caráter exclusivamente ilustrativo, evidenciando os elos internacionais que compõem o fluxo de suprimentos analisado, sem a finalidade de representar rotas marítimas exatas ou trajetos logísticos específicos.

Figura 4 – Processo de importação da montadora automotiva



Fonte: Autoria Própria (2025).

A base de dados contém as seguintes informações: os navios que serão utilizados, o país de origem, o porto de destino, a data estimada de saída do porto de origem, a data estimada de chegada no porto de destino, a identificação dos contêineres, a qual lote pertencem, em qual linha serão produzidos e a data de início de produção na montadora.

A montadora possui acordos em contrato com os dois portos em questão. Com relação ao *demurrage* é contratual que o contêiner deve ser devolvido ao porto dentro de 36 dias, sendo contabilizado a partir do dia de chegada do contêiner no porto de destino. Com relação ao custo de armazenagem nos portos, em contrato eles possuem fixados um valor para ser retirado em um período específico de cada porto, sendo eles: dez dias em Itapoá e seis dias em Navegantes. Após esse período é pago um valor extra por dia de uso.

Dessa forma, é necessário realizar um plano de retirada de contêineres com base nas informações recebidas e nas restrições de devolução do contêiner e minimização dos custos de armazenagem nos portos de destino. Além disso, é necessário respeitar as limitações da montadora. Para isso, é importante destacar que a mesma possui duas linhas de produção, que são executadas por lotes. O abastecimento ocorre por meio de docas, que possuem capacidades diferentes por conta de ser um processo feito manualmente pelos operadores. As docas que recebem os insumos da linha 1 possui restrição de operação de recebimento de dois lotes completos por dia e a doca que recebe a linha 2 possui restrição de recebimento de um lote completo.

Além disso, dentro da programação de recebimento existem contêineres que são de lotes compartilhados, ou seja, no mesmo contêiner possui materiais de lotes diferentes, sendo necessário que a retirada do porto desses lotes ocorra no mesmo dia ou em dias próximos, devido ao processamento de armazenagem dos materiais na planta, evitando gargalos e falhas no processo de descarregamento e armazenagem dentro da planta.

3.2.1. Coleta e Tratamento de Dados

Os dados foram obtidos através de uma planilha fornecida pela empresa do estudo de caso, contendo as informações dos contêineres que estavam sendo importados no período de junho a julho de 2024. As informações que são enviadas para o Brasil incluem navio, origem, porto de destino, contêiner, código de reserva (*Booking*), lote de produção, a data estimada de saída do contêiner chamada de *Estimated Time of Departure* (ETD), a data estimada de chegada chamada de *Estimated Time of Arrival* (ETA).

Além disso foi fornecida uma planilha contendo as informações extras sobre os lotes, das linhas em que serão produzidos e as datas de início de produção, chamado de f_0 . Totalizando as informações de 295 contêineres movimentados dos portos para a montadora. Dessa forma, foi necessário agrupar essas informações em uma base de dados unificada, contendo as principais informações que serão utilizadas, conforme ilustrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Estrutura de dados fornecida pela montadora automotiva

Navio	Porto de Destino	Contêiner	Lote	F0	ETD	ETA
Navio 1	IOA	CNTR 1	LOTE 1	09/08/2024	29/05/2024	28/06/2024

Fonte: Elaborado pela autora com base na planilha de dados fornecidas (2025).

3.3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO PROPOSTOS

A formulação matemática constitui a base da abordagem proposta, permitindo representar de forma estruturada as decisões logísticas relacionadas à retirada de contêineres dos portos e ao recebimento na montadora automotiva. Assim como em estudos anteriores, como o de Gao et al. (2021), que modelaram o descarregamento de navios em uma usina siderúrgica por meio de PLIM, o presente trabalho define variáveis de decisão, parâmetros e restrições que descrevem o fluxo logístico desde a chegada dos contêineres até a entrega na linha de produção. A formulação aqui apresentada busca garantir o atendimento às janelas operacionais de recebimento, respeitando simultaneamente as restrições de capacidade de descarga, *demurrage* e disponibilidade de dias úteis, com o objetivo de minimizar o custo total associado à operação.

Entretanto, em razão da elevada quantidade de variáveis (contêineres, lotes, dias úteis e linhas de produção) e da natureza combinatória do problema, a obtenção de soluções exatas pode ser computacionalmente inviável em tempo hábil. Por esse motivo, optou-se pela utilização de uma heurística construtiva, capaz de gerar soluções factíveis de forma eficiente, ainda que não necessariamente ótimas. Por essa razão, serão apresentados dois tipos de modelagem matemática, abordados a seguir.

3.3.1. Método Exato: Modelo PLIM

A modelagem proposta tem como finalidade minimizar os custos totais de operação logística, em especial os custos de *demurrage*, associados à retirada de contêineres dos portos de Itapoá e Navegantes, considerando as restrições operacionais da montadora automotiva, como datas de início de produção (f_0) e as capacidade máximas diárias de recebimento das linhas de montagem.

De forma semelhante à formulação apresentada por Gao et al. (2021), os contêineres são tratados como tarefas que devem programados ao longo dos dias úteis disponíveis, observando os limites de tempo de *free time* portuário, além das restrições de *demurrage* e prazos produtivos. O modelo é estrutura como um problema de PLIM, em que algumas variáveis são contínuas (como dias de atraso) e outras binárias (como decisão de retirada), asseguram a viabilidade logística e o cumprimento dos prazos de produção.

A definição dos índices, parâmetros e variáveis de decisão consideradas para a formulação do PLIM (14) – (23) é descrita na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices, parâmetros e variáveis do modelo PLIM proposto

Notação	Descrição
<i>Índices</i>	
i	Contêiner
j	Lote (cada lote pode conter um ou mais contêineres, inclusive compartilhados)
l	Linha de produção
p	Porto de destino
t	Dia útil dentro do horizonte de planejamento
<i>Definição e Conjuntos</i>	
I	Contêineres
J	Lotes
L	Linhas de produção $\{L1, L2\}$
P	Portos $\{IOA, NAV\}$
T	Dias úteis do horizonte de planejamento
I_j	Contêineres que pertencem ao lote j
J_i	Conjunto de lotes aos quais o contêiner i está associado
l_j	Linha de produção do lote j
p_i	Porto do destino do contêiner i
<i>Parâmetros</i>	
ETA_i	Data estimada de chegada do contêiner i ao porto, $i \in I$
$F0_j$	Data de início de produção do lote j
F_p	<i>Free time</i> do porto p em dias úteis (IOA = 10; NAV = 6)
$DemMax$	Limite máximo de <i>demurrage</i> (36 dias corridos após o ETA_i)
Cap_l	Capacidade diária máxima de recebimento da linha l em lotes por dia útil ($Cap_1 = 2, Cap_2 = 1$), $l \in L$
$Disp_i$	Parâmetro binário de disponibilidade: 1 se o contêiner i está liberado para retirada; 0 caso contrário
C_i	Custo diário de <i>demurrage</i> por dia atraso do contêiner i
S_p	Custo diário de armazenagem portuária após o limite de <i>free time</i>
<i>Variáveis</i>	
$y_{i,j,t}$	Variável binária em que, $y_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{se o contêiner } i \text{ que pertence ao lote } j \text{ é retirado no dia útil } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
$x_{i,t}$	Variável binária em que, $x_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{se o contêiner } i \text{ é está no porto no dia útil } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
Ret_i	Dia útil de retirada do contêiner i
D_i	Variável contínua representando os dias de <i>demurrage</i> incorridos pelo contêiner i

Considerando-se os elementos definidos na Tabela 2, a função objetivo formulada para o modelo busca minimizar o custo total de *demurrage*, composto pela soma dos custos diários de estadia de cada contêiner que ultrapassar o período do *free time* nos portos. Assim, o modelo prioriza a programação de retiradas de modo a atender às janelas de tempo disponíveis nos portos e às restrições de capacidade das linhas de produção, conforme a Equação (14).

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} (C_i + D_i + S_{p_i} * \max(0, Ret_i - (ETA_i + F_p))) \quad (14)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{t \in T} y_{ijt} = 1 \quad \forall i \in I \quad (15)$$

$$y_{ijt} = 0 \quad \forall t < ETA_i \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{i \in I_j} y_{ijt} \geq Cap_l \quad \forall l \in L, t \in T \quad (17)$$

$$Ret_i \leq F0_j \quad \forall i \in I_j, j \in J \quad (18)$$

$$Ret_i - ETA_i \leq F_p + D_i \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$Ret_i - ETA_i \leq DemMax \quad \forall i \in I \quad (20)$$

$$y_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, t \quad (21)$$

$$x_{i,t} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (22)$$

$$D_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (23)$$

A formulação da função objetivo (14) garante que a programação da retirada seja feita de modo a reduzir atrasos e custos associados à sobrestadia, mantendo a fluidez do fluxo logístico entre o porto e a montadora. Além disso, a formulação é composta por um conjunto de restrições (15) a (21), que asseguram a viabilidade prática da programação e o cumprimento das condições operacionais reais.

A Equação (15) garante que cada contêiner seja retirado exatamente uma vez dentro do horizonte de planejamento. A Equação (16) impede que o modelo programe a retirada de um contêiner antes da sua chegada efetiva ao porto.

A Equação (17) limita o número de lotes que podem ser recebidos em cada linha de produção por dia útil, essa restrição reflete o limite operacional diário das linhas da montadora. A Equação (18) assegura que todos os contêineres necessários a um determinado lote estejam disponíveis antes da data de início de produção, evitando paradas de linha por falta de material. A Equação (19) controla o tempo máximo de estadia “gratuita” no porto, caso o contêiner ultrapasse o período F_p a variável D_i contabiliza os dias excedentes. A Equação (20) impede que o contêiner ultrapasse o limite contratual de 36 dias corridos entre a chegada e devolução.

As Equações (21) e (22) definem o domínio das variáveis, assegurando que assumam apenas valores binários e a Equação (23) assegura que o número de dias de *demurrage* seja sempre não negativo.

Dessa forma, o modelo PLIM proposto reflete com precisão as condições operacionais enfrentadas pela montadora automotiva, integrando aspectos portuários (ETA, *free time*, *demurrage*) e industriais (capacidade e f_0). Ao minimizar os custos de *demurrage* e impor restrições que garantem a chegada dos contêineres antes do início da produção, o modelo promove uma sincronização eficiente entre o abastecimento portuário e o planejamento fabril.

Essa estrutura permite que o modelo seja resolvido por solucionadores comerciais como Gurobi, produzindo cronogramas otimizados de retirada de contêineres. Foi implementado um algoritmo em Python utilizando uma licença acadêmica do Gurobi. Os resultados obtidos servirão como base comparativa para a heurística construtiva implementada também em Python, apresentada na seção 3.3.2, que visa alcançar soluções próximas do ótimo com menor esforço computacional.

3.3.1.1. Implementação computacional

A formulação do modelo PLIM foi elaborada conforme descrito na seção 3.3.1, representando matematicamente o problema de sequenciamento da retirada de contêineres dos portos de Itapoá e Navegantes até a planta da montadora automotiva. O objetivo é minimizar os custos totais de *demurrage* e de armazenagem portuária, programando as retiradas de modo a respeitar os ETA's, as capacidades diárias por linha de produção e datas de início de produção (f_0) dos respectivos lotes.

O modelo PLIM foi desenvolvido na linguagem Python 3.13.7, utilizando o ambiente *Visual Studio Code* (VS Code), em um computador Lenovo Ideapad 3i, equipado com processador Intel® Core™ i7-10510U (1.80 GHz, até 2.30 GHz), 12 GB de memória RAM, SSD PCIe de 256 GB e placa de vídeo dedicada NVIDIA® GeForce MX330 (2 GB), operando

com o sistema Windows 11 Pro (versão 24H2, 64 bits). Esse ambiente computacional provê recursos suficientes para a construção e solução de problemas de PLIM, viabilizando a geração de cronogramas.

A implementação computacional utilizou o Gurobi Optimizer como solver de PLIM, em conjunto com as bibliotecas *pandas*, *numpy*, *openxml*, *datetime*, *os* e *re*. O Gurobi foi empregado sob licença acadêmica, necessária devido à natureza inteira mista. Assim, os dados de entrada, contendo as informações dos 295 contêineres, foram lidos a partir de um arquivo TXT tabulado, contendo as seguintes colunas: Porto de destino, contêiner, lote, linha de produção, f_0 e ETA, retornando à programação de retirada de contêineres.

3.3.2. Método aproximado: Heurística HSCR

Devido à elevada complexidade combinatória do problema e ao grande número de variáveis envolvidas, a resolução do modelo PLIM por métodos exatos torna-se computacionalmente dispendiosa para instâncias maiores em casos de programações anuais, especialmente quando há múltiplos portos, linhas de produção e lotes compartilhados. Nesse contexto, optou-se pelo desenvolvimento de uma heurística construtiva gulosa, implementada em Python, com o objetivo de gerar uma solução inicial viável eficiente que respeite as restrições operacionais da montadora e minimize indiretamente os custos de *demurrage*.

A heurística HSCR opera de maneira iterativa sobre uma base de dados real, armazenada em planilha Excel, o que possibilita a leitura direta das informações operacionais, como ETA, porto de destino, lote, linha de produção e data de início de produção (f_0). O processo inicia-se com uma etapa de pré-processamento, responsável por converter campos de texto em formatos de data padronizados, mapear automaticamente as linhas de produção e identificar lotes compartilhados entre contêineres. Essa etapa garante integridade e consistência nos dados, permitindo que a lógica de programação diária seja aplicada de forma confiável e eficiente.

Dessa forma, a heurística HSCR foi desenvolvida para equilibrar simplicidade operacional e coerência com as restrições do sistema logístico real da montadora. A Tabela 3 apresenta os índices e variáveis que foram considerados no desenvolvimento da heurística HSCR, sendo eles os mesmos vistos no método exato.

Tabela 3 – Índices e variáveis considerados na heurística HSCR

Notação	Descrição
<i>Índices</i>	
i	Contêiner
j	Lote (cada lote pode conter um ou mais contêiners, inclusive compartilhados)
l	Linha de produção
p	Porto de destino
t	Dia útil dentro do horizonte de planejamento
<i>Definição e Conjuntos</i>	
I	Contêineres
J	Lotes
L	Linhas de produção {L1, L2}
P	Portos {IOA, NAV}
T	Dias úteis do horizonte de planejamento
I_j	Contêineres que pertencem ao lote j
J_i	Conjunto de lotes aos quais o contêiner i está associado
l_j	Linha de produção do lote j
p_i	Porto do destino do contêiner i

Fonte: Autoria Própria (2025).

E a Tabela 4 sintetiza os parâmetros considerados na formulação, que orientam o processo de decisão e garantem que a solução obtida seja factível dentro dos limites contratuais e produtivos apresentados.

Tabela 4 – Parâmetros considerados na heurística HSCR

<i>Parâmetros</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor ou Condição Aplicada</i>
Cap_l	Número máximo de lotes completos que podem ser recebidos por dia útil em cada linha de produção	Linha 1: 2 lotes/dia Linha 2: 1 lote/dia
Cap_t^{alm}	Capacidade total diária de movimentação/armazenagem interna da planta	Máximo de contêineres que podem ser recebidos no dia
F_p	Período máximo de permanência do contêiner no porto sem cobrança de armazenagem	IOA: 10 dias úteis NAV: 6 dias úteis
$DemMax$	Limite máximo de estadia do contêiner, após o qual há cobrança de <i>demurrage</i>	36 dias corridos
ETA_i	Data em que o contêiner i chega ao porto e torna-se elegível para retirada	Variável por contêiner
$F0_j$	Data limite em que o lote j deve estar disponível na planta para início da produção	Respeitada como restrição temporal
p	Identificação do porto ao qual o contêiner está associado	IOA (Itapoá) ou NAV (Navegantes)
Lotes Compartilhados	Lotes que possuem contêineres comuns entre diferentes linhas de produção	Retirados em dias consecutivos ou no mesmo dia
T	Conjunto de dias disponíveis para planejamento, desconsiderando fins de semana e feriados	Período de ETA mínimo até o f_0 máximo
Critério de Prioridade	Define a ordem de seleção dos lotes elegíveis no algoritmo	1º – Proximidade da <i>demurrage</i> ; 2º – Proximidade do <i>free time</i> ; 3º – Maior número de contêineres disponíveis

Fonte: Autoria Própria (2025).

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i \in l_t} y_{it} \leq Cap_l \quad \forall l \in L, t \in T \quad (24)$$

$$ETA_i \leq Ret_i \leq F0_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (25)$$

$$Ret_i - ETA_i \leq F_p \quad \forall i \in I_p \quad (26)$$

$$Ret_i - ETA_i \leq DemMax \quad \forall i \in I \quad (27)$$

$$|Ret_i - Ret_j| \leq 1 \quad \forall i, j \in L_{comp} \quad (28)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it} \leq Cap_t^{alm} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (29)$$

Em que a Equação (24) estabelece o limite diário de recebimentos por linha de produção, garantindo que o número total de contêineres descarregados em um dia útil não ultrapasse a capacidade operacional disponível. A Equação (25) define a janela de elegibilidade para retirada de cada contêiner, assegurando que a programação seja realizada apenas após a sua chegada efetiva ao porto (ETA) e antes da respectiva data de início de produção do lote ao qual pertence (f_0).

A Equação (26) modela o limite preferencial de permanência no porto, estabelecido pelo *free time* de cada porto de destino. Essa restrição busca que os contêineres sejam programados para retirada dentro do prazo, evitando custos adicionais sempre que possível. Embora represente uma condição desejável, trata-se de uma restrição que pode ser relaxada mediante penalização, caso o *free time* seja ultrapassado. A Equação (27) incorpora o limite contratual de 36 dias corridos para permanência dos contêineres no porto antes da devolução, evitando o acúmulo de custos de *demurrage* além do permitido contratualmente.

A Equação (28) garante a coerência no sequenciamento dos lotes compartilhados, impondo contêineres de um mesmo lote vinculado sejam retirados no mesmo dia ou em dias consecutivos. Essa restrição evita a fragmentação de lotes no processo de descarregamento, melhorando o fluxo de abastecimento e reduzindo riscos de falta de componentes. Já a Equação (29) assegura que a capacidade de armazenagem interna diária da montadora não seja ultrapassada, representando o limite físico de descarregamento e movimentação interna realizado pela equipe de recebimento, evitando sobrecarga dos operadores e gargalos na área de logística interna.

Dessa forma, o algoritmo adota uma estratégia gulosa, em que as decisões são tomadas localmente com base em critérios de prioridade definidos, conforme apresentados na Tabela 4. Em cada dia útil do horizonte de planejamento, o código busca preencher a capacidade máxima

de recebimento das linhas, priorizando os lotes mais urgentes de acordo com o f_0 . A prioridade é definida a partir de três fatores:

- Menor folga de *demurrage*; contêineres mais próximos do limite de 36 dias;
- Menor folga de *free time* portuário: seis dias úteis para Navegantes e dez dias úteis para Itapoá;
- Maior número de contêineres elegíveis no dia: para otimizar o uso da viagem.

Quando um lote é selecionado, todos os contêineres elegíveis pertencentes a esse lote são programados para retirada no mesmo dia, respeitando a capacidade máxima da linha. A heurística HSCR considera apenas dias úteis, desconsiderando tempos de transporte e processamento interno, uma vez que o processo de descarga, retorno do vazio e desova ocorrem dentro do mesmo dia. O pseudocódigo (Algoritmo 1) a seguir descreve as principais etapas do algoritmo proposto.

Algoritmo 1 Pseudocódigo – Heurística HSCR

```

01: Entrada: Base de dados com ETA, porto de destino, linha de produção, lote e  $f_0$ 
02: Parâmetros:  $Cap_l = \{L1 = 2, L2 = 1\}$ ,  $F_p = \{IOA = 10, NAV = 6\}$ ,  $DemMax = 36$ 
03: Inicializa calendário de dias úteis  $T \leftarrow [\text{mín}(ETA), \text{máx}(ETA + 36)]$ 
04: Para cada contêiner  $i \in I$ , associar a lote  $j$ , linha  $l$  e porto  $p$ 
05: Para cada dia útil  $t \in T$  faça:
06:   Para cada linha  $l \in L$  faça:
07:     Capacidade_dia  $\leftarrow Cap_l$ 
08:     Enquanto Capacidade_dia > 0 e existirem lotes elegíveis faça:
09:       Seleciona conjunto de lotes  $L_{eleg} \leftarrow \{j \mid ETA_i \leq t, FO_j \geq t, \text{não alocado}\}$ 
10:       Para cada lote  $j \in L_{eleg}$ :
11:         Calcular prioridade (j) = [dias_restantes_para_DemMax,  $F_p$ , n°_contêineres]
12:       Seleciona  $j^* \leftarrow$  lote com maior prioridade
13:       Aloca  $j^*$  no dia  $t$ 
14:       Atualiza Capacidade_dia  $\leftarrow Capacidade_{dia} - 1$ 
15:       Marca contêineres  $i \in I_{j^*}$  como “retirados”
16:     Fim-enquanto
17:   Fim-para
18: Fim-para
19: Saída: Cronograma de retirada ( $Ret_i$  para cada contêiner  $i$ )
20: Exporta resultado para planilha “Base de dados – com retirada.xlsx”

```

Fonte: Autoria Própria (2025).

O Algoritmo 1 inicia com a importação dos dados e configuração dos parâmetros operacionais. Em seguida, percorre o horizonte de planejamento dia a dia, avaliando a disponibilidade de contêineres e a capacidade das linhas. A cada iteração, os lotes elegíveis (aqueles cujo ETA já ocorreu e cujo f_0 ainda não foi alcançado) são classificados de acordo

com a função de prioridade. O lote mais crítico, isto é, o que apresenta menor folga em relação ao *demurrage* e ao *free time*, é selecionado para retirada. Esse processo é repetido até o esgotamento da capacidade de cada linha ou até que não restem lotes elegíveis no dia.

A heurística HSCR não realiza uma busca local posterior, ou seja, não há otimização adicional após a construção da solução. O algoritmo executa a atribuição de forma sequencial, priorizando a factibilidade e o respeito às restrições do sistema. Essa característica reduz o tempo de processamento e torna o método adequado para uso prático e operacional, como o planejamento diário de retiradas de contêineres.

Além disso, a simplicidade da abordagem torna possível sua execução diária ou em tempo quase real, característica desejável em ambientes industriais sujeitos a variações operacionais frequentes. Como o algoritmo lê diretamente a planilha de dados, quaisquer atualizações, como alterações de ETA, ETD ou f_0 , podem ser incorporadas imediatamente, bastando atualizar a planilha e executar novamente o código para gerar um novo cronograma. Contudo, por não incluir busca local ou otimização secundária, os resultados podem ser sensíveis à ordem inicial dos dados, o que abre oportunidades para aprimoramentos futuros por meio de heurísticas híbridas ou meta-heurísticas.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da heurística e a análise de desempenho em relação às restrições operacionais e à minimização de *demurrage*.

3.3.2.1. Implementação computacional: Heurística HSCR

O modelo heurístico foi desenvolvido na linguagem Python 3.13.7, utilizando o ambiente *Visual Studio Code* (VS Code), em um computador Lenovo Ideapad 3i, equipado com processador Intel® Core™ i7-10510U (1.80 GHz, até 2.30 GHz), 12 GB de memória RAM, SSD PCIe de 256 GB e placa de vídeo dedicada NVIDIA® GeForce MX330 (2 GB), operando com o sistema Windows 11 Pro (versão 24H2, 64 bits). Esse ambiente computacional assegurou capacidade adequada para leitura, processamento e análise de dados em larga escala, permitindo a geração de cronogramas e indicadores de desempenho em tempo reduzido.

A heurística HSCR foi implementada em Python, com suporte das bibliotecas *pandas*, *numpy*, *openpyxl*, *datetime*, *os* e *re*. Essas bibliotecas permitiram leitura automatizada e manipulação de grandes volumes de dados, o tratamento de datas de chegada, f_0 e exportação automatizada da geração automática do cronograma de retirada dos contêineres para uma planilha em Excel.

O algoritmo realiza a leitura da planilha “Base de dados.xlsx”, que contém as seguintes colunas: navio, porto de destino, contêiner, reserva, lote, linha de produção, f_0 , ETD e ETA. A partir dessas informações, o código identifica os contêineres elegíveis para retirada considerando as restrições de capacidade por linha, prazos de permanência máxima nos portos, limite de *demurrage* (36 dias corridos) e datas de f_0 .

Durante a execução, o algoritmo percorre os dias úteis do horizonte de planejamento e, para cada dia, seleciona os lotes disponíveis segundo critérios de prioridade definidos. Uma vez alocados, os contêineres são marcados como retirados, e o cronograma é atualizado automaticamente.

Ao término da execução, o algoritmo gera a planilha “Base de dados – com retirada.xlsx”, contendo a coluna adicional “Data de Retirada do Porto”. A execução completa do *script* ocorre em poucos segundos, o que permite sua utilização diária para tomada de decisão no planejamento logístico da montadora. Essa automação substitui o processo manual utilizado, reduzindo o tempo de programação e garantindo maior consistência nas retiradas dentro dos prazos estabelecidos.

Dessa forma, a presente seção apresentou os dados considerados no estudo, a formulação do problema e a descrição detalhada da heurística HSCR proposta, bem como sua implementação computacional. A estrutura metodológica aqui delineada estabelece as bases para a análise dos resultados, apresentada na seção seguinte, na qual serão discutidos o desempenho do modelo PLIM e os impactos da aplicação da heurística HSCR sobre a redução dos custos de *demurrage* e custos de armazenagem portuárias no contexto investigado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos com a aplicação do modelo PLIM e a heurística HSCR para o sequenciamento da retirada de contêineres. O desempenho dos métodos foi comparado à prática atualmente adotada pela montadora, com foco nos seguintes indicadores:

- Tempo de permanência dos contêineres nos portos;
- Custos de armazenagem portuária extra e de *demurrage*;
- Distribuição diária de retiradas por linha de produção.

Os experimentos foram realizados com dados reais referentes aos meses de junho e julho de 2024, período em que houve registros de extrapolação de *free time* e incidência de *demurrage*. A análise comparativa entre os três cenários, real, PLIM e heurístico, permite avaliar não apenas a capacidade de redução de custos, mas também a viabilidade operacional das soluções.

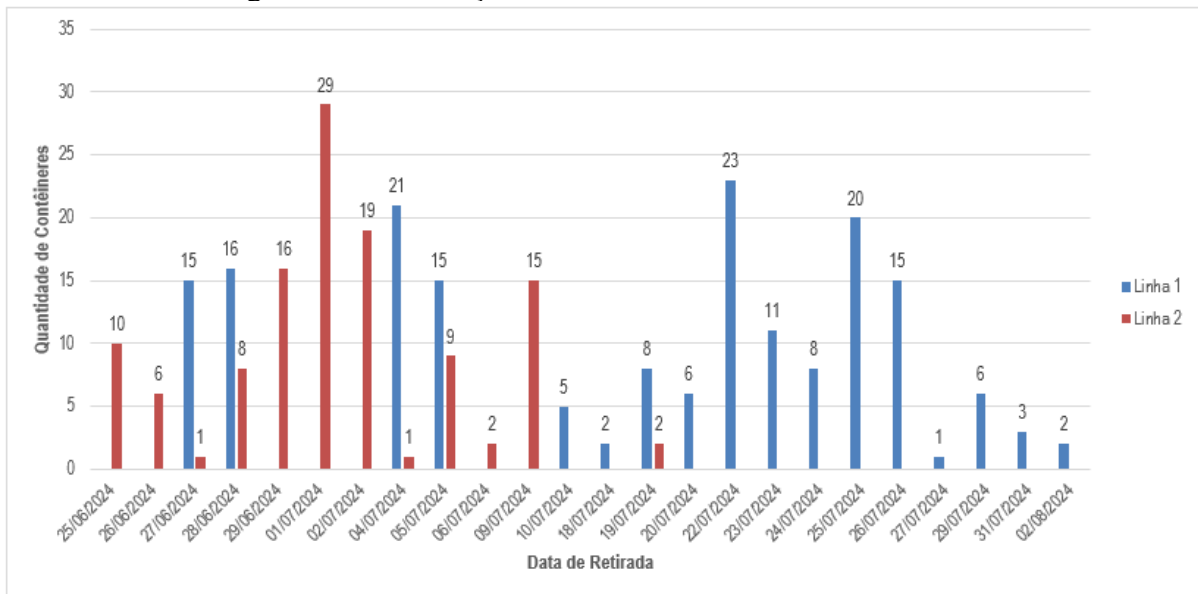
4.1. SITUAÇÃO REAL DA EMPRESA

Atualmente, o sequenciamento de retiradas é executado manualmente por meio de planilhas eletrônicas. O técnico responsável avalia individualmente cada contêiner considerando porto de destino, *free time* portuário disponível, data de início de produção (f_0) e capacidade diária de recebimento das linhas. Esse processo, totalmente dependente de análise humana, é suscetível a erros, inconsistências e retrabalho a cada atualização de ETA ou alteração nos cronogramas dos navios.

No período analisado, foram movimentados 295 contêineres, dos quais 239 em Itapoá e 56 em Navegantes. Um total de 18 contêineres apresentaram lotes compartilhados, exigindo tratamento especial devido à necessidade de retirada conjunta ou em dias consecutivos.

A Figura 5 apresenta a distribuição real das retiradas por data e a linha de produção, evidenciando picos de movimentação que ultrapassaram a capacidade diária, o que aumentou a necessidade de recursos operacionais e elevou o risco de atrasos.

Figura 5 – Distribuição das datas de retiradas do cenário real



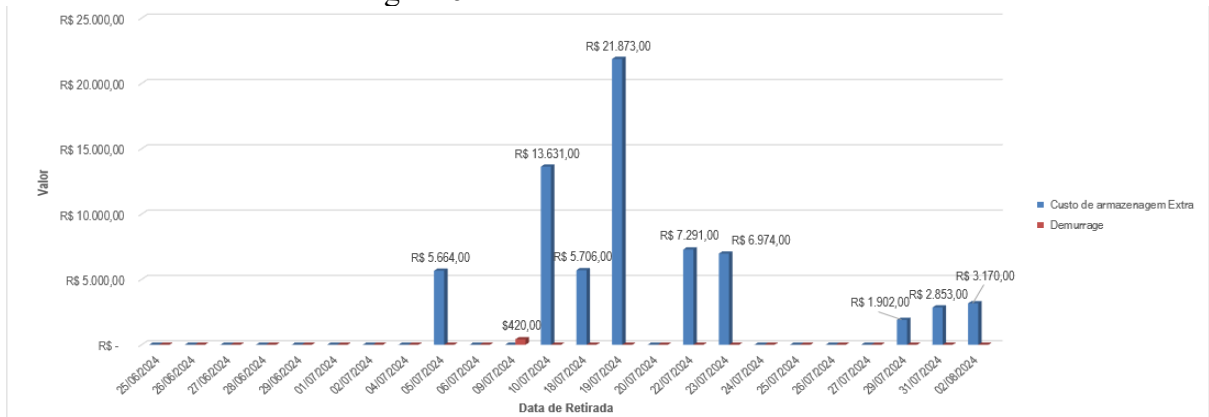
Fonte: Autoria Própria (2025).

Esses resultados mostram que a ausência de padronização aumenta a carga operacional nas equipes responsáveis pela desova dos contêineres, dificultando a previsibilidade e comprometendo a eficiência logística.

A despeito dos esforços de coordenação, 63 contêineres extrapolaram o *free time* portuário (55 em Itapoá e oito em Navegantes), gerando R\$ 69.064,00 em custos de armazenagem extra. Além disso, três contêineres excederam um dia além do limite de 36 dias, resultando em US\$ 420,00 em *demurrage*. O tempo médio de permanência portuária foi de 7,75 dias.

Conforme apresentado na seção 3.2. ao exceder o *free time* portuário é cobrado um valor fixo por dia de extrapolação, onde segundo contrato disponibilizado pela montadora é cobrado R\$ 317,00 no Porto Itapoá e R\$ 236,00 no Porto de Navegantes, conforme Figura 6.

Figura 6 – Custos totais do cenário real



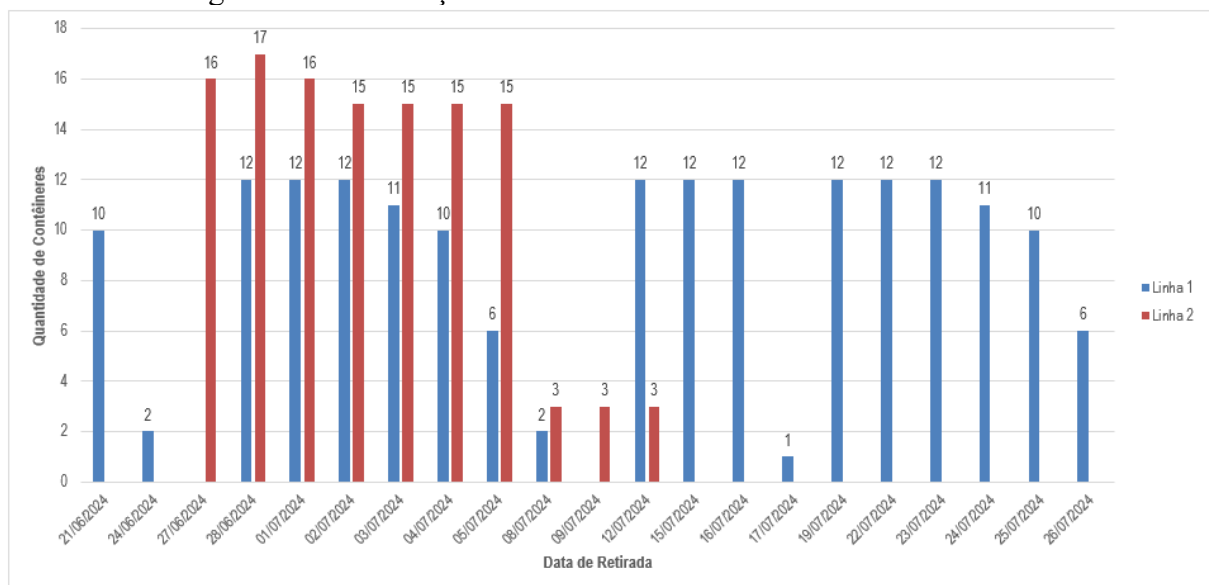
Fonte: Autoria Própria (2025).

Para o custo de *demurrage* dos contêineres que excederam os 36 dias contratuais, é cobrado uma taxa de US\$ 120,00 por dia de extrapolação. Na Figura 6 ilustra-se os custos logísticos gerados.

4.2. RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO PLIM

O modelo PLIM produziu uma solução ótima, sem violações de *free time* de *demurrage*. A distribuição resultante (Figura 7) apresentou melhor equilíbrio em comparação ao cenário real, embora ainda tenham ocorrido concentrações de retiradas em alguns períodos, pois o modelo tende a aproximar as retiradas do vencimento do *free time* para minimizar penalidades na função objetivo.

Figura 7 – Distribuição das datas de retiradas com o modelo PLIM



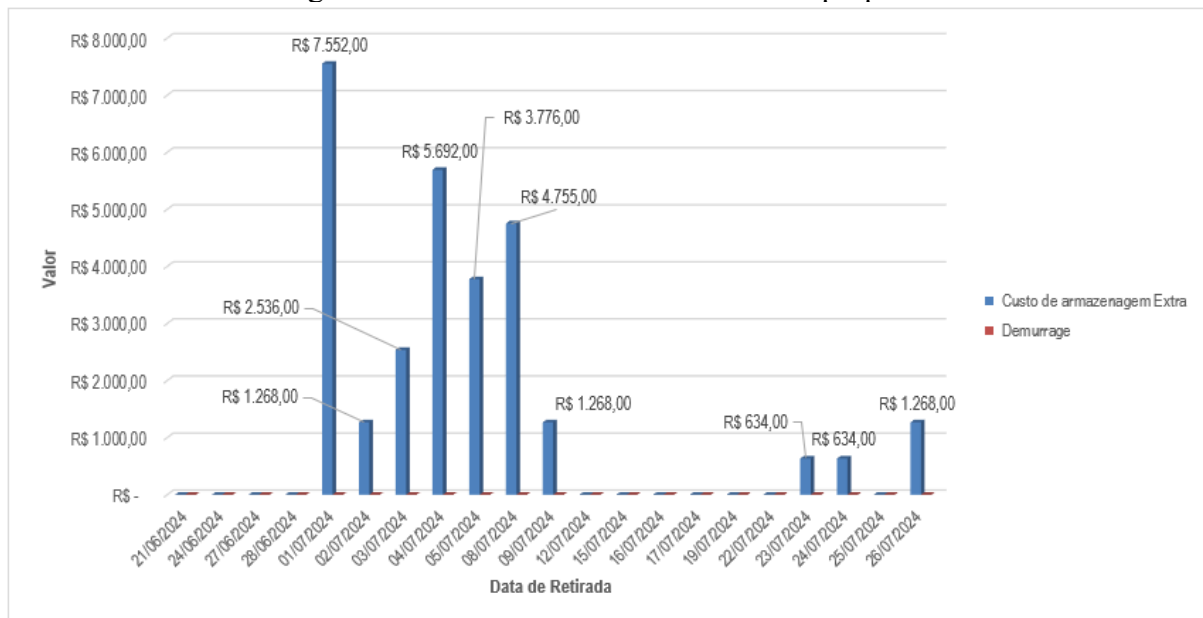
Fonte: Autoria Própria (2025).

O modelo reduziu significativamente o custo total de operação. Como ilustrado na Figura 8, destacando-se:

- A eliminação completa de custos de *demurrage*;
- Redução de taxa de armazenagem extra para R\$ 29.383,00, representando 57,45% em relação ao cenário real;
- Diminuição do tempo médio de permanência para 4,71 dias.

Apesar disso, o PLIM manteve oscilações em carga operacional e, embora ótimo matematicamente, pode gerar picos de volume difíceis de executar na rotina da planta.

Figura 8 – Custos totais do modelo PLIM proposto



Fonte: Autoria Própria (2025).

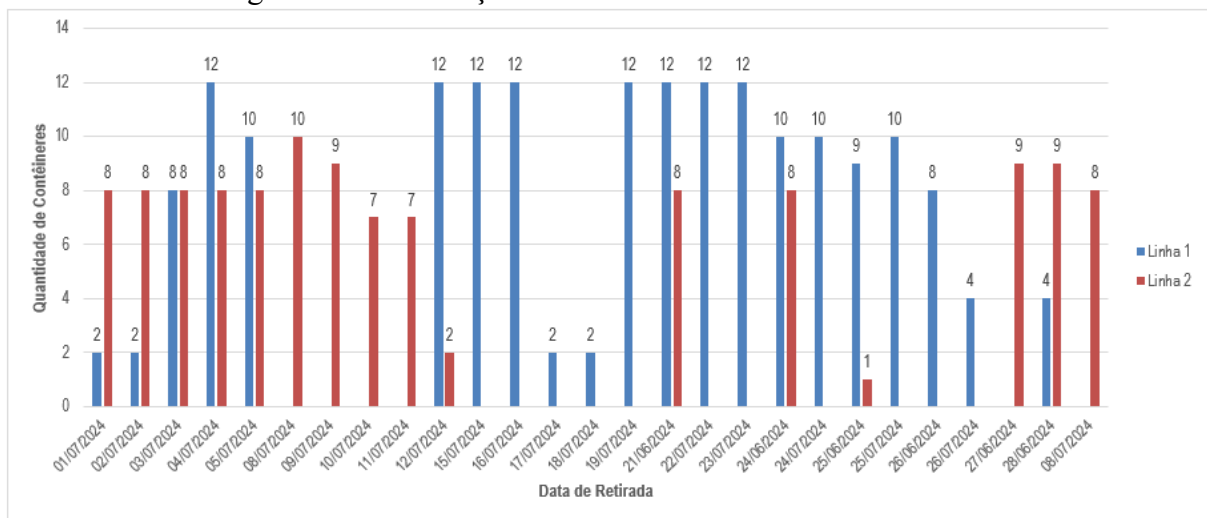
Ou seja, é possível observar que o modelo encontrou uma solução ótima em que não há custo de *demurrage* e reduziu o custo de armazenagem para R\$ 29.383,00 nos portos de destino, o que representa uma diminuição de 57,45% em relação ao cenário real. Os custos de armazenagem extra são relacionados a 22 contêineres no Porto Itapoá e 24 no Porto de Navegantes, devido a capacidade de recebimento de cada linha de produção.

Apesar do modelo reduzir os custos de *demurrage* e de armazenagem, ele mantém oscilações de volume e picos operacionais, o que pode sobrecarregar a equipe de recebimento e gerar riscos na execução prática.

4.3. RESULTADOS DA HEURÍSTICA HSCR

A heurística HSCR, desenvolvida para ser aplicada operacionalmente, apresentou distribuição temporal mais uniforme das retiradas (Figura 9). O algoritmo prioriza a alocação de contêineres segundo criticidade (ETA, f_0 , fim do *free time* e *demurrage*), resultando em programação mais estável e aderente às operações da montadora.

Figura 9 – Distribuição das retiradas com a heurística HSCR



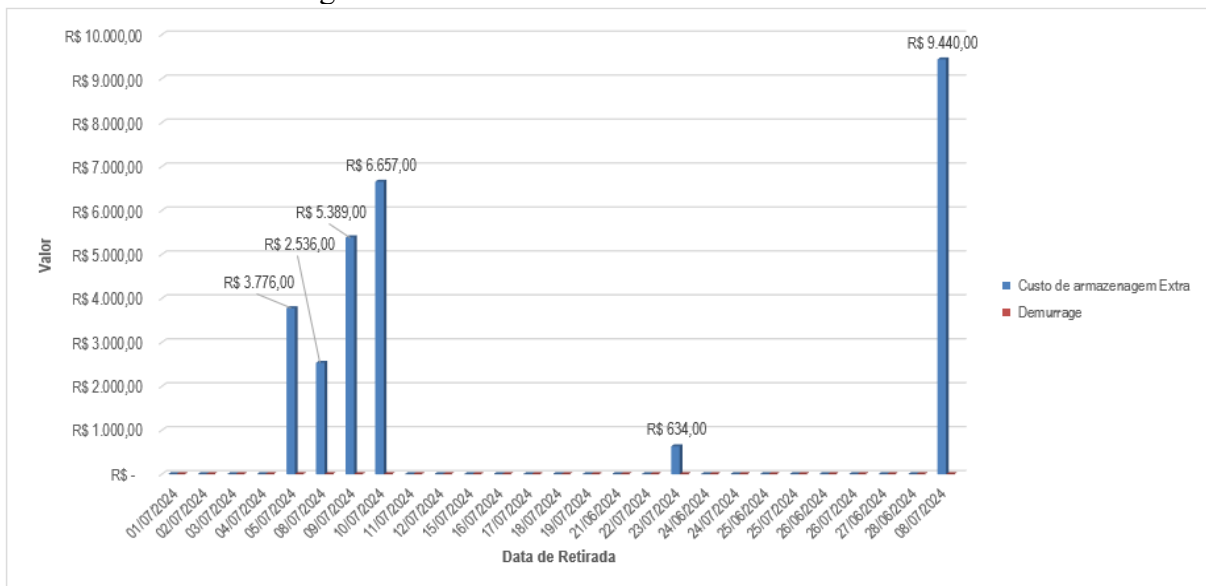
Fonte: Autoria Própria (2025).

Os resultados obtidos na Figura 9 indicam:

- Eliminação completa de custos de *demurrage*;
- Redução dos custos de armazenagem para R\$ 28.432,00, equivalendo a 58,8% de economia;
- Diminuição do tempo de permanência para 4,5 dias, uma melhora de 40,9%;
- Redução a oscilação entre linhas de produção;
- Melhora na consistência e previsibilidade do fluxo logístico.

Na Figura 10 ilustra-se os custos gerados com o novo cronograma.

Figura 10 – Custos totais com a heurística HSCR



Fonte: Aatoria Própria (2025).

4.4. ANALISE COMPARATIVA ENTRE CENÁRIOS

Antes da apresentação dos indicadores, é importante destacar que os dois métodos propostos têm objetivos distintos, o que influencia diretamente o comportamento dos resultados. O modelo PLIM busca minimizar o custo total de forma global, concentrando-se na redução das penalidades associadas ao *free time* e à *demurrage*, sem considerar a necessidade de suavização temporal da operação. Já a heurística HSCR foi desenvolvida com foco na viabilidade prática, priorizando a distribuição equilibrada das retiradas ao longo dos dias úteis, de modo a reduzir picos operacionais e facilitar a execução diária da rotina logística.

Em razão dessas diferenças, alguns indicadores refletem abordagens contrastantes: enquanto o PLIM privilegia a solução matematicamente ótima, a heurística favorece uma programação mais estável e operacionalmente compatível com os processos da montadora.

Dessa maneira, a Tabela 5 sintetiza os principais indicadores operacionais e financeiros, como permanência portuária, cumprimento do *free time* portuário, custos de armazenagem e incidência de *demurrage* para os três cenários analisados.

Tabela 5 – Indicadores de desempenho dos métodos propostos

Indicador	Situação Real	PLIM	Heurística HSCR
Contêineres dentro do <i>free time</i> dos portos	78,64%	84,41%	85,76%
Permanência média no porto (em dias)	7,75	4,71	4,5
Custo de armazenagem extra nos portos	R\$ 69.064,00	R\$ 29.383,00	R\$ 28.432,00
Quantidade de contêineres com <i>demurrage</i>	3	0	0
<i>Demurrage</i> (em dias)	3	0	0
Custo total (\$) de <i>demurrage</i>	\$ 420,00	\$ 0,00	\$ 0,00

Fonte: Aatoria Própria (2025).

Os resultados evidenciam três comportamentos principais:

- O cenário real apresenta pior eficiência em todos os indicadores;
- O PLIM atinge a solução ótima para o objetivo matemático definido (minimização global dos custos), mas sem garantir suavização temporal;
- A heurística HSCR produz cronogramas mais estáveis e, em alguns indicadores, apresenta valores mais baixos que o PLIM, devido às diferenças entre os objetivos dos métodos.

Cabe ressaltar que não há qualquer contradição teórica no fato de a heurística HSCR apresentar desempenho superior em determinados indicadores. Isso ocorre porque o PLIM e a HSCR possuem funções objetivo distintas. Enquanto o PLIM se concentra em minimizar o custo total de forma global, sem considerar a distribuição temporal das retiradas ou suavização temporal, a heurística HSCR utiliza uma lógica construtiva e incremental, priorizando contêineres críticos e promovendo uma distribuição mais uniforme das operações ao longo dos dias úteis. Essa diferença estrutural faz com que cada método privilegie aspectos diferentes do problema, resultando naturalmente em contrastes em indicadores como permanência média e custos de armazenagem.

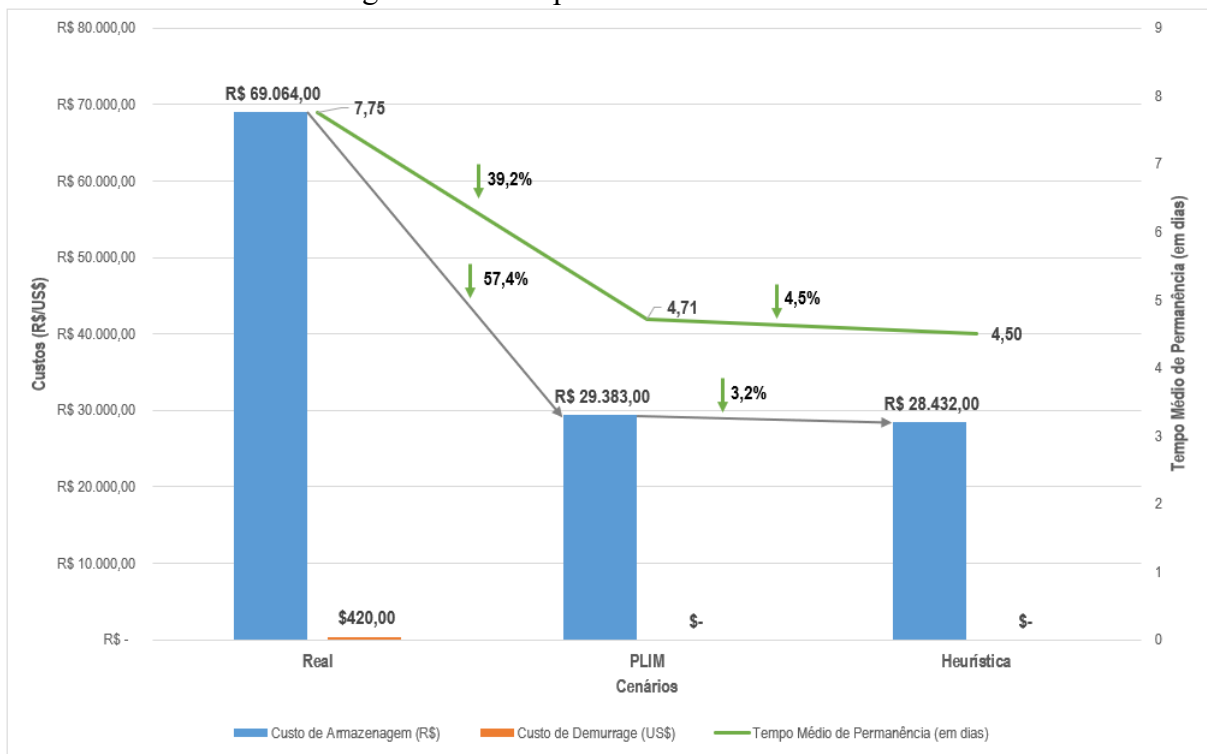
Assim, quando a HSCR apresentou menor tempo médio de permanência ou menor custo operacional, isso não significa que a heurística superou a solução ótima do PLIM, mas sim que ela performa melhor nesses indicadores específicos, que não representam o objetivo matemático do modelo exato.

Em termos quantitativos, a heurística HSCR reduziu em 41,9% o tempo de permanência e em 57,4% o custo de armazenagem em relação ao cenário real. Comparada ao PLIM, apresentou melhorias de 4,5% na permanência média e de 3,2% nos custos de armazenagem, mantendo todas as restrições satisfeitas. Tais diferenciais decorrem do propósito da heurística: gerar *schedules* mais equilibrados e operacionalmente viáveis, e não resolver o problema global de minimização de custos.

Além disso, a HSCR demonstrou maior robustez e adaptabilidade frente a variações operacionais, como alterações de ETA e ajustes de capacidade portuária, pois sua estrutura incremental permite reexecutar o algoritmo sem necessidade de reotimização completa.

Na Figura 11 ilustra-se os ganhos quantitativos.

Figura 11 – Comparativo entre os cenários



Fonte: Autoria Própria (2025).

Apesar dos ganhos expressivos obtidos com o PLIM e a heurística HSCR, é importante reconhecer que os resultados apresentados refletem um cenário idealizado, no qual os contêineres são liberados no tempo previsto e não ocorrem restrições externas. Na prática, atrasos na liberação portuária, limitações de espaço nos armazéns, indisponibilidade de janelas de atracação e variações operacionais podem alterar substancialmente o cronograma planejado e, conseqüentemente, os custos estimados.

Essas situações reduzem o impacto direto dos métodos, uma vez que parte das ineficiências logísticas decorre de fatores fora do controle do modelo. Assim, embora os procedimentos de otimização permitam reduzir significativamente a permanência e os custos em condições normais, seus resultados reais tendem a depender da capacidade do sistema em mitigar eventos externos.

Essa análise crítica reforça que os valores reduzidos obtidos pelos métodos não devem ser interpretados como limites absolutos de desempenho, mas como estimativas derivadas de um cenário ideal de operação. Na presença de perturbações, como atrasos na liberação de contêineres, restrições de armazenagem ou contingências operacionais, os custos reais podem se afastar significativamente daqueles calculados nos cenários otimizados, refletindo a influência direta de fatores externos que não são capturados pelo modelo.

Essa análise crítica reforça que os valores reduzidos pelos métodos não representam um limite absoluto, mas sim o desempenho possível quando a operação evolui dentro dos parâmetros esperados, e que, diante de perturbações, os custos podem ser superiores aos calculados nos cenários otimizados.

Esses resultados corroboram estudos clássicos (Feo e Resende (1990), Martello e Toth (1990), Kobayashi e Tamaki (2017) e Gao et al. (2021)), que apontam heurísticas construtivas como soluções eficazes para problemas de sequenciamento complexos.

5. CONCLUSÃO

O sequenciamento de retirada de contêineres representa um desafio central da logística de empresas que dependem de insumos importados, especialmente no setor automotivo. A ineficiência nesse processo pode gerar custos expressivos de armazenagem portuária e de *demurrage*, além de comprometer o abastecimento das linhas de produção. No caso da montadora estudada, que opera com contêineres importados de diferentes países e utiliza os portos de Itapoá e Navegantes, essas dificuldades são ampliadas pela natureza manual e pouco padronizada do processo decisório atualmente empregado.

Este trabalho propôs uma solução estruturada para o problema, composta por dois métodos complementares: um modelo PLIM e uma heurística gulosa construtiva chamada de HSCR. O modelo PLIM buscou representar rigorosamente as restrições logísticas e contratuais do problema, enquanto a heurística HSCR foi desenvolvida com foco na aplicabilidade prática e na capacidade de responder rapidamente às variações operacionais.

A aplicação dos métodos aos dados reais da montadora demonstrou ganhos significativos. Ambos eliminaram completamente o custo de *demurrage* e reduziram substancialmente o custo de armazenagem extra nos portos. A heurística HSCR, em particular, apresentou o melhor desempenho global: reduziu os custos de armazenagem em 58,8% e diminuiu o tempo médio de permanência dos contêineres de 7,75 para 4,5 dias, representando uma melhoria operacional de aproximadamente 41%. Além disso, a distribuição mais uniforme das retiradas proporcionou maior previsibilidade e reduziu picos de trabalho, contribuindo para uma operação mais estável e eficiente.

Embora o modelo PLIM tenha alcançado solução ótima do ponto de vista matemático, a análise dos resultados evidenciou limitações importantes para sua implementação prática. O modelo tende a concentrar retiradas em determinados dias, gerando picos de volume que podem ser difíceis de operacionalizar na rotina da planta e podem sobrecarregar as equipes de desova e recebimento. Essa característica ressalta a necessidade de métodos complementares que considerem, além da otimalidade, a viabilidade operacional e a distribuição equilibrada das atividades ao longo do horizonte de planejamento.

O desenvolvimento da heurística HSCR evidenciou sua viabilidade técnica para uso operacional. Sua execução rápida e sua adaptabilidade a alterações de ETA, mudanças de capacidade e variações no fluxo de produção tornam o método adequado para aplicações diárias, superando limitações práticas do modelo PLIM em contextos dinâmicos. Assim, a

solução proposta não apenas otimiza custos, mas também melhora a confiabilidade, padronização e agilidade do processo decisório.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas. O modelo PLIM apresenta dificuldade de escalabilidade para bases maiores, enquanto a heurística HSCR, por ser construtiva, não garante a obtenção da solução ótima global. Além disso, fatores estocásticos e operacionais, como atrasos na liberação dos contêineres pela alfândega, indisponibilidade de janelas de atracação, variações climáticas que interrompem operações portuárias, restrições de espaço em armazéns e atrasos no processo de desova, não foram incorporados aos métodos propostos, embora exerçam influência direta sobre o planejamento real.

Essas ocorrências podem modificar significativamente o cronograma previsto, elevando custos de armazenagem e aumentando o risco de incidência de *demurrage*, mesmo quando o planejamento matemático foi otimizado. Dessa forma, os modelos representam um cenário ideal de operação e devem ser interpretados como ferramentas de apoio à decisão, cuja eficácia depende da capacidade do sistema logístico de mitigar esses eventos externos.

Para estudos futuros, recomenda-se o aprimoramento da heurística por meio de procedimentos de melhoria, como busca local, *Variable Neighborhood Descent* (VND) e *Simulated Annealing*, bem como a avaliação de meta-heurísticas híbridas. Sugere-se também a incorporação de modelos estocásticos, capazes de representar incertezas nas chegadas dos navios, tempos de processamento e variações na demanda interna, aumentando a aderência do planejamento às condições reais de operação. Recomenda-se igualmente a integração da ferramenta com sistemas corporativos de gestão, como o SAP, permitindo replanejamento automático, e a inclusão de indicadores ambientais, de modo a ampliar a robustez e a sustentabilidade da solução.

Além disso, sugere-se avaliar a escalabilidade do modelo PLIM mediante a aplicação em bases de dados mais extensas e com maior granularidade. Embora o modelo tenha apresentado desempenho adequado no conjunto utilizado neste estudo, é provável que existam limitações computacionais associadas ao aumento do número de contêineres, lotes e restrições operacionais. Assim, investigações adicionais sobre tempos de processamento, qualidade das soluções e eventuais estratégias de decomposição ou pré-processamento podem contribuir para verificar a viabilidade do uso do PLIM em cenários reais de grande porte.

Conclui-se que o modelo desenvolvido apresenta elevado potencial de aplicação prática e contribui de forma expressiva para a redução de custos logísticos e para a modernização do processo de tomada de decisão. A utilização de métodos de PO mostrou-se

eficaz e confirma que abordagens analíticas aplicadas a dados reais podem gerar benefícios tangíveis, posicionando a montadora em um patamar mais avançado de eficiência e competitividade logística.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Resolução Normativa nº 18**, de 21 de dezembro de 2017. Capítulo II: Livre Estadia e Sobrestadia de Contêineres. Brasília: ANTAQ, 2017.
- AMARAL, R. F.; GUEDES, J. J. A burocracia como entrave ao comércio exterior brasileiro. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 51, n. 3, p. 345-362, 2017.
- ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Resolução Normativa nº 18, de 21 de setembro de 2017. Dispõe sobre normas e procedimentos para a cobrança de sobrestadia de contêiner. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2017.
- ALVARENGA, A. C. **Logística**. São Paulo: Atlas, 1994.
- BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transporte, administração de materiais e distribuição física**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BAKER, K. R. **Introduction to sequencing and scheduling**. New Jersey: Wiley, 2018.
- BAKER, K. R.; TRIETSCH, Dan. **Principles of Sequencing and Scheduling**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- BAKER, K.R.; TRIETSCH, Dan. **Principles of Sequencing and Scheduling**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Perspectivas do setor automotivo no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2018.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Visão 2035: Brasil, país desenvolvido**. Rio de Janeiro: BNDES, 2020.
- BERTSIMAS, D; TSITSIKLIS, J. N. **Introduction to linear optimization**. Belmont: Athena Scientific, 1997.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão da cadeia de suprimentos e logística**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 6.759**, de 5 de fevereiro de 2009. Regulamenta a administração das atividades aduaneiras, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 6 fev. 2009.
- BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 6.870**, de 4 de junho de 2009. Regulamenta a aplicação do regime aduaneiro especial de loja franca, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 jun. 2009.

- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys**, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.
- BÜYÜKÖZKAN, G.; GÖÇER, F. Digital supply chain: literature review and a proposed framework for future research. **Computers in Industry**, [s. l.], v. 97, p. 157-177, 2018.
- CABRAL, F. **Gestão Portuária e Logística Internacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- CABRAL, J. A. **Logística internacional: transporte, armazenagem e distribuição física global**. São Paulo: Atlas, 2013.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gestão da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operação**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2016.
- CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- COSTA, M. A.; SILVA, A. C. Despacho aduaneiro e parametrização: implicações para à eficiência logística. **Revista de Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 19, n. 2, p. 211-229, 2015.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. **Operations Research Letters**, v. 8, n. 2, p. 67-71, 1995.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.
- GAO, Z.; SUN, D.; ZHAO, R.; DONG, Y. Ship-unloading scheduling optimization for a steel plant. **Information Sciences**, v. 544, p. 214–226, 2021.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2013.
- IVANOV, D. **Supply Chain Resilience: Risk, Disruption, and Recovery in Supply Chains**. Cham: Springer, 2021.
- IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. Reinventing supply chains after the COVID-19 pandemic: a resilience perspective. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15-16, p. 1-17, 2019.
- IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. **International Journal of Production Research**, London, v. 57, n. 3, p. 829–846, 2019.
- KOBAYASHI, H.; TAMAKI, H. A method of ship scheduling and inventory management problem for reducing demurrage and freight. In: **2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering**. IEEE, 2009.

- KOBAYASHI, T.; TAMAKI, T. Optimization model for ship scheduling and container inventory management. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 259, n. 1, p. 1-12, 2017.
- KUME, H.; PIANI, G.; SOUZA, C. Estrutura tarifária e custos de importação no Brasil. **Revista Brasileira de Comércio Exterior**, Rio de Janeiro, v. 75, p. 25-42, 2003.
- LAM, S; ENGLERT, B. Cost-based optimization of shipment scheduling. **Annals of Operations Research**, v. 181, p. 499–517, 2009.
- LI, C. L.; TANG, G.; WU, Y. Cost-based optimization of shipment scheduling. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 48, n. 1, p. 250–265, 2012.
- LIBERATI, A. et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **PLoS Medicine**, San Francisco, v. 6, n. 7, p. 1-27, 2009.
- MARTELLO, S.; TOTH, P. **Knapsack problems: algorithms and computer implementations**. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.
- MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Medicine**, San Francisco, v. 6, n. 7, p. 1-6, 2009.
- MOREIRA, A. C. Comércio exterior e competitividade: impactos da ineficiência aduaneira no Brasil. **Revista de Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p. 483-502, 2011.
- NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and combinatorial optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- OSMAN, I. H.; LAPORTE, G. Metaheuristics: a bibliography. **Annals of Operations Research**, v. 63, n. 5, p. 513–623, 1996.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, London, v. 372, n. 71, p. 1-9, 2021.
- PAURA, G. L. **Fundamentos da logística**. Curitiba: Instituto Federal do Paraná, 2012.
- PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. 4. ed. Nova Iorque: Springer, 2008.
- PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. 5. ed. Cham: Springer, 2016.
- QUEIROZ, M. M. et al. Industry 4.0 and digital supply chain capabilities: a framework for understanding digitalization challenges and opportunities. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 229, p. 107–148, 2019.
- RAHMAN, A. T.; SARNO, R.; EFFENDI, Y. Goal programming to optimize time and cost for each activity in port container handling. In: 2018 **International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)**. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICOIACT.2018.8350808.

- REEVES, C. R. **Modern heuristic techniques for combinatorial problems**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993.
- RESENDE, M. G. C.; RIBEIRO, C. C. Greedy randomized adaptive search procedures. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. (orgs.). **Handbook of metaheuristics**. Boston: Springer, 2003. p. 219-249.
- SIDDAWAY, A. P.; WOOD, A. M.; HEDGES, L. V. How to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. **Annual Review of Psychology**, Palo Alto, v. 70, p. 747–770, 2019.
- SILVA, R. M.; ROCHA, F. A. Greves e paralisações no comércio exterior brasileiro: impactos sobre o desempenho logístico. **Revista de Administração e Negócios**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 67-82, 2012.
- SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Cadeia de suprimentos projeto e gestão: conceitos, estratégias e estudos de caso**. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- SONG, D. A Literature Review, Container Shipping Supply Chain: Planning Problems and Research Opportunities. **Logistics**, v. 5, n. 2, p. 41, 2021.
- SONG, D. **Container logistics and supply chain operations**. New York: Springer, 2021.
- SONG, D.; PANAYIDES, P. **Maritime Logistics: A Guide to Contemporary Shipping and Port Management**. 2. ed. London: Kogan Page, 2012.
- TAHA, Hamdy A. **Operations research: an introduction**. 9. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
- TALBI, E. G. **Metaheuristics: from design to implementation**. New Jersey: Wiley, 2009.
- TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2009.
- WANG, H.; WANG, S.; MENG, Q. Simultaneous optimization of schedule coordination and cargo allocation for liner container shipping networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 70, p. 261-273, 2014.
- WANKE, P. **Gestão de transportes: fundamentos e práticas**. São Paulo: Atlas, 2012.
- WOLSEY, Laurence A. **Integer programming**. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- WU, Y.; LI, C. L.; SONG, D. Goal programming to optimize time and cost for each activity in port container handling. **Maritime Economics & Logistics**, v. 15, n. 3, p. 338–356, 2013.
- ZHANG, W.; GEN, M. A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 48, n. 2, p. 409-425, 2005.