UFES

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDA HADDAD VIANA RODRIGUES

MODELO MATEMÁTICO PARA DESIGNAÇÃO DE DOCAS PARA OPERAÇÃO DE CAMINHÕES EM CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO COMPARTILHADOS

VITÓRIA – ES

2025

FERNANDA HADDAD VIANA RODRIGUES

MODELO MATEMÁTICO PARA DESIGNAÇÃO DE DOCAS PARA OPERAÇÃO DE CAMINHÕES EM CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO COMPARTILHADOS

Trabalho de Graduação de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA – ES

2025

FERNANDA HADDAD VIANA RODRIGUES

MODELO MATEMÁTICO PARA DESIGNAÇÃO DE DOCAS PARA OPERAÇÃO DE CAMINHÕES EM CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO COMPARTILHADOS

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Prof. Dr. Thiago de Almeida Rodrigues, Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador

_____

Prof. Dr. Wander Demonel de Lima. Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador

VITÓRIA – ES

2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão, primeiramente, à minha família, pelo amor incondicional, apoio e incentivo em todos os momentos. Em especial, à minha mãe, Daniella, por ser minha base e minha maior inspiração. Pelo carinho, pelos sacrifícios feitos para que eu pudesse chegar até aqui e, acima de tudo, por nunca deixar de acreditar em mim, mesmo à distância.

Ao meu amor, Guilherme, agradeço pelo companheirismo e incentivo, por estar sempre ao meu lado e, principalmente, pela paciência ao me ouvir falar incansavelmente sobre meus estudos. Seu apoio e interesse tornaram essa jornada ainda mais especial.

Aos meus amigos, que tornaram essa caminhada mais leve e enriquecedora, pela troca de experiências que levarei para sempre em meu coração. Um agradecimento especial a Eber Lucas, por me ensinar a importância de compartilhar nossos pontos de vista e nunca desistir, e a Katielly, por ser um exemplo de determinação.

Ao professor Rodrigo Rosa, por seus conselhos, ensinamentos e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Por me apresentar à área de Transportes, despertando em mim uma verdadeira paixão e permitindo que eu me encontrasse na Engenharia Civil. Suas aulas enriquecem o meio acadêmico, trazendo conhecimento aliado à experiência e uma didática inspiradora. Sua sabedoria e dedicação ao ensino foram fundamentais para minha evolução acadêmica e profissional.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação, meu sincero muito obrigada!

"Tudo o que temos que decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado” - J. R. R. TOLKIEN

RESUMO

A alocação eficiente de docas para operação de caminhões é um desafio operacional nos Centros de Distribuição (CDs) compartilhados, considerando a disponibilidade de docas e sinergia entre as empresas que alugam áreas de armazenagem no local. Caso o CD opte por alugar as docas e restringi-las a empresas determinadas, o tempo de espera pode aumentar, enquanto ao distribuir as docas como recurso comum entre as empresas, permite-se maior flexibilidade e redução no tempo de espera dos caminhões. A limitação de disponibilidade de docas requer a designação adequada destas, realizada pelo planejador do CD. Assim, o caminhão pode aguardar para estacionar próximo à área de armazenagem, ou estacionar mais rapidamente em uma doca distante. A definição da doca e momento para início da operação impacta no tempo total de permanência dos caminhões e na eficiência operacional para que o CD atenda à demanda de forma ágil. Diante disso, esta pesquisa compara cenários onde o CD aluga as docas às empresas e cenários cujas docas são recursos compartilhados entre essas empresas. Para isso, foi proposto um modelo matemático baseado no Problema de Roteamento de Veículos Capacitados (MD-CVRP) para otimizar a alocação de docas, visando reduzir o tempo total de permanência dos veículos. Nesta pesquisa, as docas representam depósitos, os caminhões são tratados como clientes com demanda de tempo de atendimento, e um veículo fictício realiza o atendimento dos caminhões. Os resultados mostram que, em cenários onde os caminhões são atendidos em docas distantes da área de armazenagem, há redução no tempo de espera, ainda que o tempo de operação possa aumentar. Os resultados indicam que a abordagem proposta pode reduzir em até 6,6% o tempo total de permanência dos caminhões, quando comparada a uma estratégia que opera os caminhões apenas em docas mais próximas da área de armazenagem. O modelo matemático desenvolvido mostrou-se capaz de encontrar soluções em tempos viáveis para aplicação prática ao utilizar o *solver* CPLEX para todas as instâncias avaliadas.

Palavras-chave: Centro de Distribuição Compartilhado, *Co-warehousing*, Alocação de docas, Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos.

ABSTRACT

The efficient allocation of docks for truck operations is an operational challenge in shared Distribution Centers (DCs), considering dock availability and synergy among the companies renting storage areas on-site. If the DC chooses to rent the docks along with the storage areas, waiting times may increase, whereas distributing docks as a shared resource among companies allows for greater flexibility and reduced truck waiting times. The limited availability of docks requires proper assignment, carried out by the DC planner. Thus, a truck may either wait to park near the storage area or park more quickly at a distant dock. The definition of the dock and the timing of the operation's start impact the total truck dwell time and the operational efficiency needed for the DC to meet demand efficiently. In this context, this research compares scenarios in which the DC rents docks to companies and scenarios where docks are shared resources among these companies. To this end, a mathematical model based on the Capacitated Vehicle Routing Problem (MD-CVRP) was proposed to optimize dock allocation, aiming to reduce the total vehicle dwell time. In this research, docks represent depots, trucks are treated as customers with service time demand, and a fictitious vehicle performs truck servicing. The results show that in scenarios where trucks are serviced at docks farther from the storage area, waiting times decrease, even though operation times may increase. The findings indicate that the proposed approach can reduce total truck dwell time by up to 6.6% when compared to a strategy that operates trucks only at docks closer to the storage area. The developed mathematical model proved capable of finding solutions in feasible times for practical application by using the CPLEX solver for all evaluated instances.

Keywords: Shared Warehousing, Co-warehousing, Dock Allocation, Multi-Depot Vehicle Routing Problem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Centro de Distribuição Compartilhado 12
Figura 2 - Tempo de permanência do caminhão no CD 13
Figura 3 - Designação de Caminhões no Centro de Distribuição 14
Figura 4 - Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos 15
Figura 5 – Etapas para desenvolvimento da pesquisa 22
Figura 6 - Tempo adicional para operação de acordo com o local da doca 24
Figura 7 - Cenários Doca-Fixa e Doca-Flexível 25
Figura 8 - Conjuntos do modelo matemático proposto 29
Figura 9 - Termos da Função Objetivo 30
Figura 10 – Resultado da ocupação das docas para as Instâncias 01 e 10 pelo CPLEX 37
Figura 11 – Resultado da ocupação das docas para a Instância 02 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 38
Figura 12 – Resultado da ocupação das docas para a Instância 11 pelo solver CPLEX (Doca-Flexível) 39
Figura 13 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 03 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 40
Figura 14 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 12 pelo CPLEX (Doca-Flexível) 40
Figura 15 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 04 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 42
Figura 16 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 13 pelo CPLEX (Doca-Flexível) 42
Figura 17 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 05 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 43
Figura 18 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 14 pelo CPLEX (Doca-Flexível) 44
Figura 19 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 06 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 44
Figura 20 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 15 pelo CPLEX (Doca-Flexível) 45

Figura 21 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 07 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 46
Figura 22 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 16 pelo CPLEX (Doca-Flexível) 47
Figura 23 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 08 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 48
Figura 24 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 17 pelo CPLEX (Doca-Flexível) 48
Figura 25 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 09 pelo CPLEX (Doca-Fixa) 49
Figura 26 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 18 pelo CPLEX (Doca-Flexível) 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de operação dos caminhões de cada empresa 23
Tabela 2 - Relação entre Instâncias do Cenário 1 (Doca-Fixa) e Cenário 2 (Doca-Flexível).....25
Tabela 3 - Instâncias de Teste para Cenário 1 (Doca-Fixa) e Cenário 2 (Doca-Flexível) 26
Tabela 4 – Parâmetros do modelo matemático proposto 28
Tabela 5 - Conjuntos do modelo matemático proposto 28
Tabela 6 - Variáveis de decisão do modelo matemático proposto.....29
Tabela 7 - Resultados da Função Objetivo obtidos pelo *solver* CPLEX 33
Tabela 8 - Resultados obtidos pelo *solver* CPLEX para comparação Cenário 1 (Doca-Fixa) e Cenário 2 (Doca-Flexível).....34
Tabela 9 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 01 e 10.....37
Tabela 10 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 02 e 11 38
Tabela 11 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 03 e 12 39
Tabela 12 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 04 e 13.....41
Tabela 13 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 05 e 14.....43
Tabela 14 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 06 e 15.....44
Tabela 15 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 07 e 16.....46
Tabela 16 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 08 e 17.....47
Tabela 17 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 09 e 18.....49

SIGLAS

CD — Centro de Distribuição

CVRP — Problema de Roteamento de Veículos Capacitados

MD-CVRP – Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Múltiplos Depósitos

SUMÁRIO

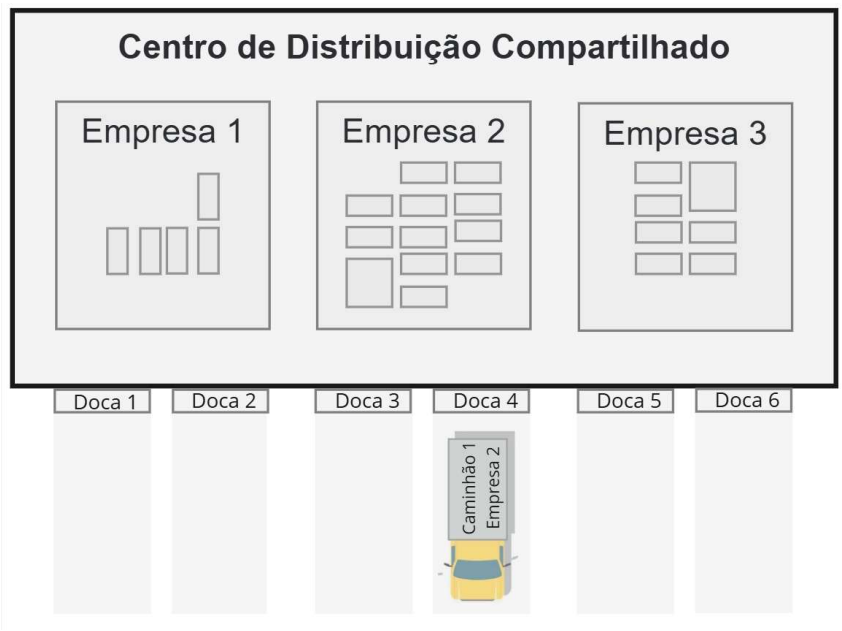
1 INTRODUÇÃO 12
1.1 OBJETIVOS 16
1.1.1 OBJETIVO GERAL 16
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 16
2 REFERENCIAL TEÓRICO 18
2.1 CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO 18
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
3 METODOLOGIA DE PESQUISA 22
4 GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS 23
5 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO 27
6 RESULTADOS E ANÁLISES 33
7 CONCLUSÃO 52
7.1 PESQUISAS FUTURAS 53
REFERÊNCIAS 54
APÊNDICE A - ARQUIVO .MOD DO MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO PELO CPLEX 56
APÊNDICE B - O CÓDIGO EM PYTHON DESENVOLVIDO PARA GERAÇÃO DAS IMAGENS DE RESULTADO TENDO COMO INPUT OS DADOS DE SAÍDA DO CPLEX 60

1 INTRODUÇÃO

Iwan et al. (2021), Snoeck e Winkenback (2020) destacaram que o aumento de encomendas de pequeno porte em áreas urbanas exige a adequação operacional para lidar com volumes variáveis conforme as sazonalidades. Nessa lógica, o Centro de Distribuição (CD) é uma unidade essencial para suporte na cadeia logística, capaz de armazenar diversos tipos de produtos e suprir a variação de demanda pela consolidação de carga em pontos estratégicos. Uma solução para redução de custos e eficiência operacional é a utilização de CDs compartilhados, onde várias empresas dividem a infraestrutura para armazenagem e distribuição de mercadorias, normalmente localizadas estrategicamente nas grandes cidades.

Os CDs compartilhados possibilitam que pequenos empreendimentos arquem com os custos de armazenagem, ao compartilhar atividades e recursos em comum entre as empresas que alugam área para armazenagem, como os recursos de vigilância e segurança, portaria, regulados pela administração do CD. Dentre essas atividades, destaca-se a alocação dos locais disponíveis para operação dos caminhões que chegam no local, também conhecidos como docas. A Figura 1 ilustra a relação entre a doca e área de armazenagem no CD.

Figura 1 - Centro de Distribuição Compartilhado

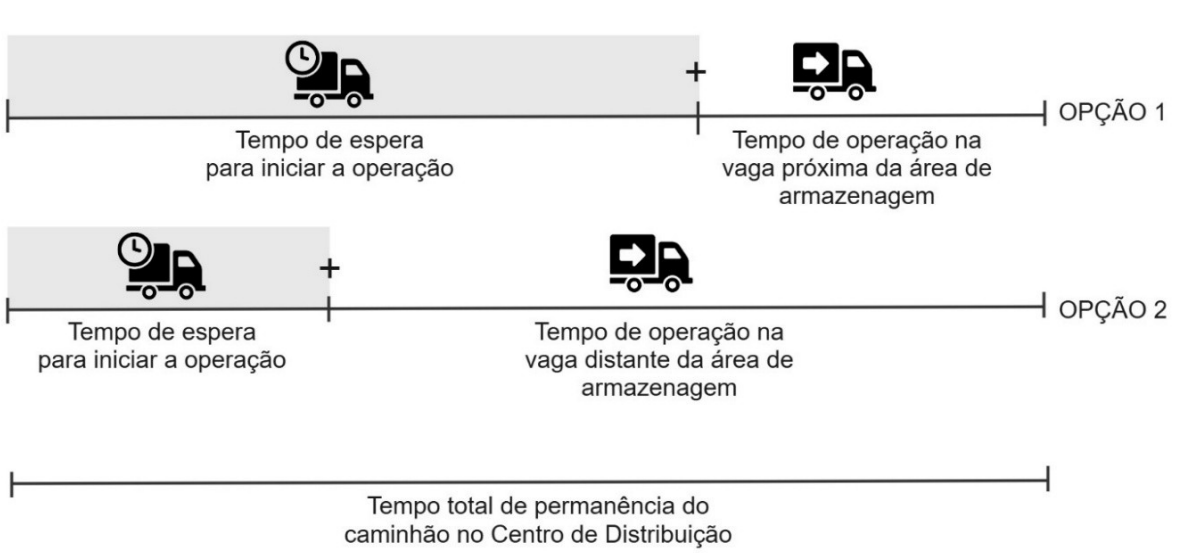


Fonte: Autora (2025).

Dentre os acordos entre o CD e as empresas, as docas podem ou não serem alugadas junto às áreas de armazenagem da carga, porém, quando as docas são limitadas e falta disponibilidade, os caminhões necessitam esperar para iniciar a operação, aumentando o período de permanência no local. Dessa forma, avalia-se um segundo cenário, onde as docas são compartilhadas como um recurso em comum e sua alocação definida pelo planejador da administração do CD.

Para designação das docas para operação, o planejador deve considerar que o tempo de operação é afetado pela localização da doca que o caminhão vai estacionar, pois essa determina a distância a ser percorrida entre o caminhão e a área destinada à empresa, ou seja, um tempo maior para deslocamento da carga ocasiona um tempo maior na sua operação. O tempo de permanência de cada caminhão é a soma do tempo de espera para estacionamento na doca e o tempo de operação (carga e/ou descarga), ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Tempo de permanência do caminhão no CD

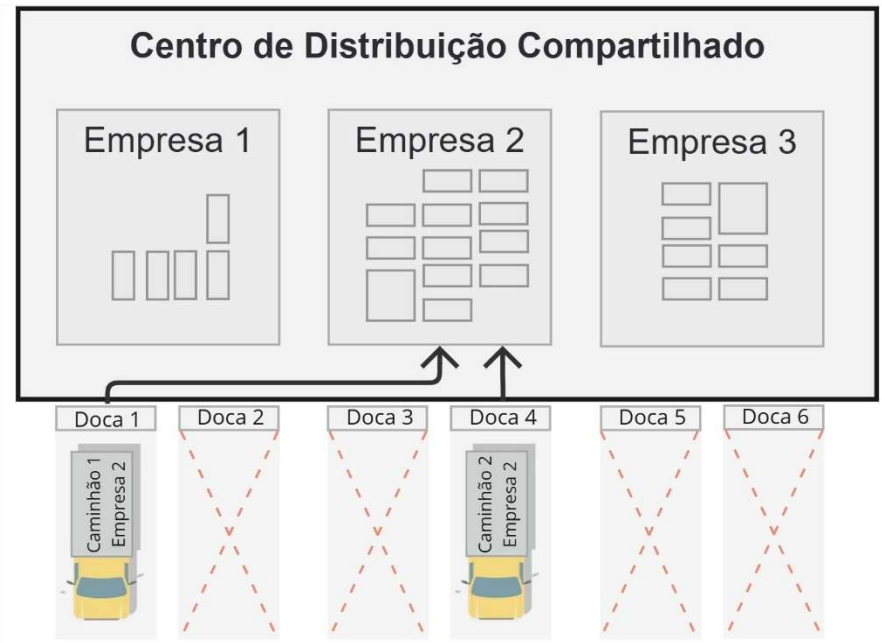


Fonte: Autora (2025).

No caso de docas compartilhadas pelas empresas e indisponibilidade de docas próximas à área de armazenagem, o planejador responsável pelo CD compartilhado deve decidir entre aguardar a sua liberação, ou designá-lo à outra doca disponível, mesmo que mais distante. A Figura 3 ilustra as duas possibilidades do planejador. Neste caso, o Caminhão 1, estacionado na Doca 1, com carga designada à Empresa

2 possui maior tempo de operação se comparado ao Caminhão 2, com carga da Empresa 2, estacionado na Doca 4 devido a maior distância entre a doca e área destinada, considerando o mesmo tipo de veículo e carga.

Figura 3 - Designação de Caminhões no Centro de Distribuição

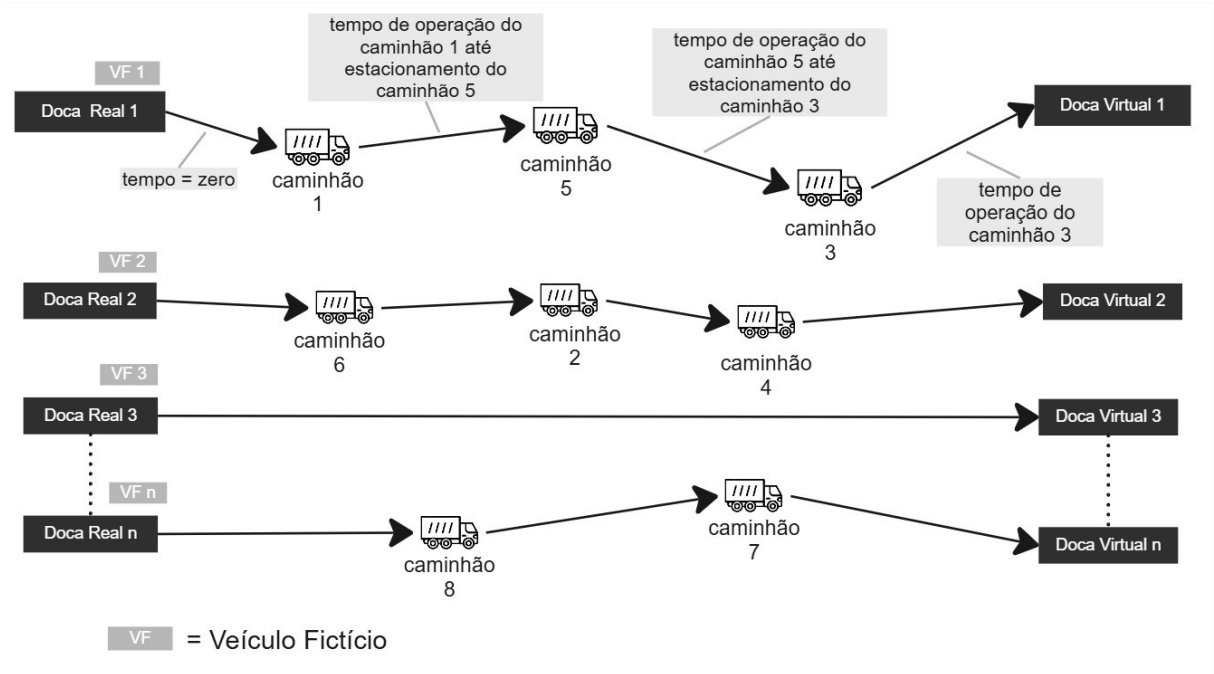


Fonte: Autora (2025).

Devido a necessidade da alocação de docas no sistema de compartilhamento de docas entre as empresas, este trabalho propõe um modelo matemático baseado no Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Múltiplos Depósitos (MD-CVRP) para designação das docas minimizando o tempo de permanência do caminhão no CD. No MD-CVRP, um conjunto de veículos com uma capacidade limitada de coleta sai de um dos depósitos, passa uma única vez no conjunto de clientes e volta ao ponto de partida (Montoya-Torres et al., 2015).

As adaptações necessárias para a criação do modelo matemático proposto nesta pesquisa consideram os depósitos sendo as docas e os clientes sendo os caminhões. Cada doca possui um veículo fictício que percorre uma rota com saída na doca real e fim na doca fictícia, passando uma única vez por cada caminhão. A Figura 4 ilustra a sequência de atendimento dos caminhões para cada rota, ou seja, o atendimento em cada doca realizado pelo veículo fictício. O tempo total de viagem de cada veículo fictício é limitado pelo tempo de funcionamento do CD.

Figura 4 - Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos



Fonte: Autora (2025).

O tempo representado pelos arcos entre caminhões na Figura 4 é determinado pelo tempo de operação do caminhão anterior acrescido do tempo até a chegada do próximo caminhão atendido pela mesma doca no CD. Quando a rota apresenta um único trecho, como na Doca 3, nenhum caminhão estaciona ou opera neste local.

A aplicação do modelo matemático proposto, baseado no MD-CVRP, para a alocação de docas aos caminhões em um CD compartilhado visa auxiliar os planejadores na definição do local e do momento ideal para o início da operação de cada caminhão. Além disso, a comparação da otimização em diferentes cenários—seja permitindo maior flexibilidade na operação ou restringindo as docas a áreas próximas à armazenagem—busca viabilizar a sinergia entre empresas que compartilham o mesmo CD. Dessa forma, este trabalho compara a aplicação do modelo em operações cujas docas são compartilhadas e operações cujas docas são alugadas para definição da melhor configuração em CDs compartilhados, visando redução do tempo de permanência dos caminhões.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do sistema para alocação de docas no tempo de permanência dos caminhões que operam em um CD compartilhado em dois cenários: Doca-Fixa, restringindo a operação em docas próximas à área de armazenagem, e Doca-Flexível, permitindo alocação de docas distantes da área de armazenagem para operação dos caminhões. Objetiva-se, por meio da aplicação de ferramenta computacional, avaliar o melhor sistema para CDs compartilhados.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver modelo matemático para apoio a tomada de decisão do planejador de um CD compartilhado;
- Elaborar Instâncias de Teste com base na operação de caminhões com carga de empresas distintas para os contextos operacionais: Doca-Fixa e Doca-Flexível;
- Exibir graficamente a ocupação das docas pelos caminhões no tempo de operação do CD compartilhado para comparação de cenários.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado e será apresentado conforme os seguintes tópicos:

O Capítulo 1 apresenta o contexto e descrição do problema, abordando temas semelhantes para descrição do problema. Em seguida, os Objetivos Gerais e Específicos são descritos. No Capítulo 2, são apresentados o Referencial Teórico e a Revisão Bibliográfica, abordando conceitos fundamentais para o entendimento deste estudo e destacando estudos relacionados e classes de problemas similares.

A Metodologia de pesquisa é detalhada no Capítulo 3. O Capítulo 4 descreve o problema de alocação de docas, abordado na introdução, e as instâncias utilizadas na pesquisa.

No Capítulo 5, o modelo matemático proposto é apresentado. Os resultados e discussões são explorados no Capítulo 6 por meio da aplicação e comparação das

instâncias. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo fornecer informações essenciais para a compreensão dos capítulos subsequentes do trabalho.

2.1 CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO

Os CDs podem ser vistos como uma forma de organização dos estoques ao longo da cadeia de suprimentos, com a finalidade de responder a demanda dos clientes rapidamente. Os tipos de CD compartilhados podem ser dados por: *flex*, compostos de galpões modulares utilizados separadamente ou agrupados; armazéns, condomínios destinados a armazenagem de produtos projetados em modulações como porta-paletes; *cross-docking*, projetados para manuseio de carga e despacho imediato sem consideração de estoque, entre outros (MARIANTE, 2017).

Segundo Tadumadze et al. (2019), as atividades para descarregamento em um CD compartilhado são sequenciais e definidas por:

1. Manobra do veículo para dentro da doca;
2. Preparação para o descarregamento;
3. Remoção da carga do veículo;
4. Fechamento do veículo;
5. Saída do veículo;

Dentre as atividades sequenciadas no processo de descarregamento, a redução do tempo de permanência do caminhão no CD pode ser dada pela definição da doca de acordo com sua proximidade ao local de armazenagem, ou alocação de mão-de-obra para realizar a operação.

Quando se trata de alocação de docas para operação de caminhões em um CD, duas decisões devem ser tomadas: em relação à doca em que os caminhões devem ser estacionados e ao momento em que os caminhões devem ser estacionados (LADIER, 2014). Segundo Van Belle (2012), uma atribuição planejada de doca ao caminhão pode aumentar a produtividade e reduzir o tempo de manuseio da carga. Assim, o problema de alocação de docas para operação de caminhões no CD busca

uma configuração que reduza o tempo de permanência do veículo ou distância a ser percorrida após a retirada do produto do caminhão.

Nesta pesquisa, o foco será a alocação de docas para operação de caminhões de empresas distintas que alugam uma área para armazenagem de produtos no CD compartilhado, se restringindo a etapa de definição do local e momento de operação do caminhão. Dessa forma, o modelo não responde a alocação de recursos como mão de obra e equipamentos disponíveis no CD e possíveis demarcas ao aumentar o tempo de manuseio da carga. Assim, o planejador deve considerar as demais influências ao considerar o resultado obtido pelo modelo, visto que ele tem como único objetivo a redução do tempo de permanência do caminhão no CD.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos de Braekers et al. (2016), Montoya-Torres et al., (2015) e Kumar e Pannerselvam (2012) apresentaram a revisão da literatura para o Problema de Roteamento de Veículos Capacitados (CVRP) e variações. Por se tratar de um problema pertencente à classe de problemas NP-Difícil, de elevado tempo de execução, grande parte das pesquisas encontradas não utiliza métodos exatos, tendo como propostas alternativas meta-heurísticas, que exploram diferentes espaços de solução a partir de mínimos locais.

Wolff et al. (2021) descrevem o problema de alocação de docas como um problema de programação de caminhões integrada a decisão espacial e temporal, ou seja, este determina em quais portas de doca e em quais horários os caminhões devem ser processados. Em seu estudo, é analisado a alocação da força de trabalho para reduzir o tempo de operação nos caminhões em uma plataforma de *cross-docking* com múltiplas docas, onde os horários de partida dos caminhões de saída seguem um cronograma.

Boysen (2010) propuseram um modelo matemático de agendamento de docas para produtos perecíveis por meio de programação inteira mista. Em sua pesquisa, foi considerada uma janela de tempo relacionada ao prazo de vencimento deste produto e uma política de zero estoque para a operação *cross-docking* (estratégia logística para transferência de cargas entre veículos com pouco ou nenhum armazenamento entre eles) (BOYSEN, 2010).

Gnanapragasam et al. (2023), propuseram um modelo para otimizar simultaneamente o agendamento de veículos nas docas de depósito e o roteamento de veículos para coleta de remessas de fornecedores, minimizando o tempo de viagem, espera e operação. A extensão do VRP com *cross-docking* considera janela de tempo e movimentação de remessas dentro do *Cross Dock Center.* A aplicação é dada pelo problema de programação quadrática inteira mista, utilizando o *software* de otimização LINGO.

Monemi e Gelareh (2023) investigaram o agendamento de caminhões e a alocação de docas em um *cross-docking*, considerando restrições de recursos. Como o tempo de processamento depende da alocação de recursos, um modelo de programação linear inteira foi desenvolvido com base no conhecimento de especialistas.

Miao et al. (2009) aborda o problema de atribuição de docas de caminhões com uma restrição de tempo operacional em *cross-docks* em situações em que o número de caminhões excede o número de docas disponíveis. Inicialmente o problema foi formulado como um modelo de programação inteira (IP). Ao longo do trabalho, percebeu-se a rápida expansão do modelo pelo aumento no número de variáveis, se tornando difícil de ser resolvido pelo ILOG CPLEX *Solver*, utilizado nesta pesquisa. Assim, foram propostas duas abordagens meta-heurísticas, Tabu Search (TS) e algoritmo genético (GA), dominando o CPLEX *Solver* em quase todos os casos de teste utilizados. Gelareh et al (2016) continuou o estudo de Miao et al (2009) ao reduzir ainda mais o tempo de execução no computador por meio de um algoritmo de ramificação e corte para o problema definido.

Van Belle et al. (2012) abordaram a descrição do problema de alocação de docas para operação de caminhões ao realizarem uma revisão de 42 artigos sobre operações em cross-docking. Devido à complexidade dos problemas, a maioria dos autores recorrem a meta-heurística como método de solução, sendo os algoritmos genéticos mais citados, aparecendo em 14 dos artigos apresentados. Além disso, 31 dos artigos citados utilizam modo exclusivo de serviço, ou seja, a doca é dedicada exclusivamente a caminhões de entrada ou saída. Apesar da configuração diferente para centros de distribuição compartilhados, onde não há separação das docas entre saída e entrada, o CD compartilhado deve garantir para empresa que irá alugar a área de armazenagem que terá docas disponíveis para operação.

A maior parte das pesquisas apresentadas abordam a aplicação do problema de alocação de docas a caminhões para operação em *cross-docking* e não utilizam o MD-CVRP como referência para modelagem. Neste trabalho, será abordado apenas a aplicação do modelo ao CD Compartilhado, minimizando o tempo de permanência dos caminhões no local, sem atividades de *cross-docking* ou divisão de docas de entrada e saída no local. Apesar da grande maioria das pesquisas apresentadas sobre o problema de alocação de docas a caminhões recorrerem à heurísticas, neste trabalho a obtenção do sequenciamento de atendimento dos caminhões nas docas e definição do horário de estacionamento é dada pela solução exata do modelo matemático proposto por meio do *solver* IBM CPLEX versão 22.1.0.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este capítulo apresenta a metodologia de pesquisa, formulação e método de análise do problema abordado. A Figura 5 ilustra as etapas desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 5 – Etapas para desenvolvimento da pesquisa

Fonte: Autora (2025).

O Capítulo 1 introduz o problema de alocação de docas. O capítulo de revisão bibliográfica, no capítulo 2, consolida pesquisas publicadas com temas relacionados, disponíveis em recursos periódicos e encontrados por palavras-chave como: "*co-warehousing*", "Alocação de Docas" e "MD-CVRP".

O modelo matemático proposto é inspirado no MD-CVRP, de forma que os depósitos são representados pelas docas do CD. Cada doca possui um veículo fictício que percorre uma rota com início na doca real e fim na doca virtual correspondente, passando uma única vez por cada caminhão. O modelo matemático permite a alocação de docas distantes da área de armazenagem da empresa para operação dos caminhões, como ilustrado na Figura 3.

Para aplicação do modelo matemático proposto, foram definidos parâmetros gerais para o centro de distribuição compartilhado e parâmetros específicos para as empresas a operarem no mesmo CD. A partir disso, as instâncias foram criadas para comparação de cenários em que o caminhão pode operar em qualquer doca, ou aguarda a liberação da doca mais próxima para iniciar sua operação. Por fim, os resultados apresentam a distribuição dos caminhões nas docas do CD compartilhado. São comparados os cenários para avaliar as duas hipóteses de alocação das docas, reduzindo o tempo de permanência deles no CD.

4 GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Como descrito na introdução, esta pesquisa tem como foco a redução do tempo de permanência dos caminhões em centros de distribuição compartilhados ao alocar as docas disponíveis de forma eficiente. Ao se tratar de uma operação com várias empresas no mesmo CD, os parâmetros devem ser definidos de modo a representar o centro de distribuição e a operação de cada empresa. Dessa forma, a operação no CD foi restrita a um dia de 8 horas ininterruptas, definido como o horizonte de planejamento de atividades.

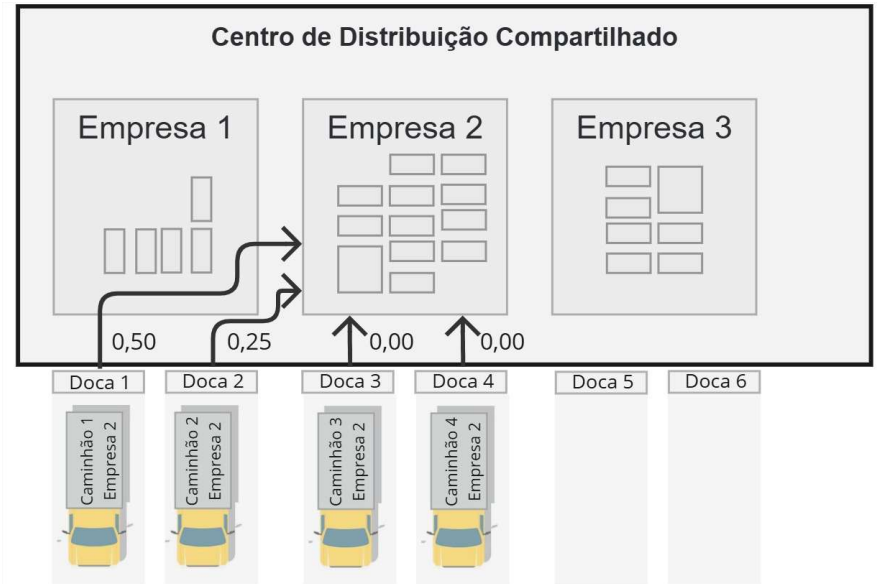
Foram descritas, na Tabela 1, três empresas e os tempos de operação determinados para carregamento ou descarga de cada caminhão, independente da sua capacidade volumétrica. Já o adicional no tempo, caso a doca esteja longe da área de armazenagem, é definido pelo acréscimo de 0,25 horas a cada doca que se distanciar desta área. A Figura 6 ilustra esse acréscimo no tempo, em função da distância entre a doca e a área de armazenagem, e a distribuição das docas para as 3 áreas de armazenagem alugadas pelas 3 empresas nas instâncias geradas nesta pesquisa.

Tabela 1 - Tempo de operação dos caminhões de cada empresa

Empresa	Tempo para Operação Completa do Caminhão (horas)
1	1,0
2	0,8
3	0,9

Fonte: Autora (2025).

Figura 6 - Tempo adicional para operação de acordo com o local da doca



Fonte: Autora (2025).

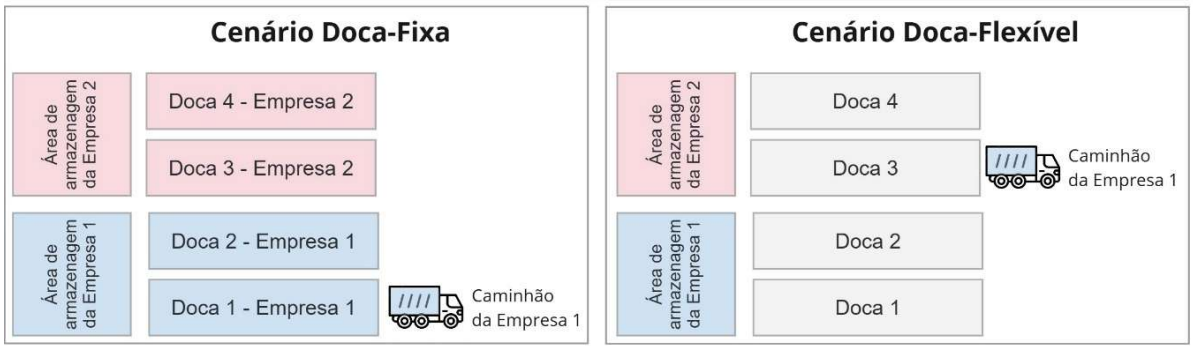
Além do tempo de operação para cada empresa, foi definido que o tempo máximo de atendimento de cada caminhão é de 2,0 horas. Além disso, o caminhão deve terminar sua operação antes do horizonte de planejamento do CD.

Para comparar as instâncias e comprovar a eficácia do modelo matemático ao reduzir o tempo de permanência dos caminhões no CD, foram gerados dois cenários, descritos a seguir.

1. **Cenário Doca-Fixa**: os caminhões são alocados na doca em frente à área de armazenagem destinada à empresa dona da carga que ele transporta.
2. **Cenário Doca-Flexível**: os caminhões são alocados nas docas que minimizem o tempo de permanência total dele no CD. Leva-se em conta o tempo de espera e o tempo de operação. O tempo de operação é dependente da doca que o caminhão estacionará para operar (Figura 6). Assim, o tempo para operar em cada doca é proporcional a distância entre ela e a área de armazenagem.

A Figura 7 ilustra os dois cenários descritos anteriormente, sendo a carga do caminhão 1 destinada a área da empresa 1.

Figura 7 - Cenários Doca-Fixa e Doca-Flexível



Fonte: Autora (2025).

Para representar os cenários em instâncias diferentes, os horários de chegada dos caminhões foram distribuídos de forma aleatória ao longo da operação em um dia de 8 horas. Todos os caminhões devem chegar e finalizar seu atendimento antes do horizonte de planejamento do CD.

Para análise, foram geradas 18 instâncias, sendo 9 para o Cenário Doca-Fixa e 9 para o Cenário Doca-Flexível. Inicialmente, foram definidas as quantidades de caminhões a operarem no CD para cada instância. A distribuição do número de caminhões por empresa foi definida para maximizar o uso das docas e avaliar a sinergia entre as empresas, identificando como será o funcionamento do CD para um dia em que todas as docas disponíveis serão utilizadas.

A relação entre as 9 instâncias do Cenário Doca-Fixa e as 9 instâncias do Cenário Doca-Flexível, são apresentados na Tabela 2. Por exemplo, a Instância 01, Cenário Doca-Fixa, possui os mesmos parâmetros da Instância 10, Cenário Doca-Flexível, variando somente a possibilidade de estacionar o caminhão em docas que não estejam em frente a área de armazenagem da empresa.

Tabela 2 - Relação entre Instâncias do Cenário 1 (Doca-Fixa) e Cenário 2 (Doca-Flexível)

Cenários	Instâncias								
Doca-Fixa	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Doca-Flexível	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Fonte: Autora (2025).

A Tabela 3 apresenta, para cada instância, o número total de caminhões, e o número total de caminhões por cada empresa. A distribuição busca simular um dia típico com ocupação de todas as docas disponíveis para as duas empresas.

Tabela 3 - Instâncias de Teste para Cenário 1 (Doca-Fixa) e Cenário 2 (Doca-Flexível)

Cenário	Instância	nº total caminhões	Distribuição de caminhões nas Empresas		
			1	2	3
1 – Doca-Fixa	1	19	9	10	0
	2	20	10	10	0
	3	21	10	11	0
	4	22	11	11	0
	5	23	11	12	0
	6	24	12	12	0
	7	25	12	13	0
	8	26	13	13	0
	9	30	10	10	10
2 – Doca-Flexível	10	19	9	10	0
	11	20	10	10	0
	12	21	10	11	0
	13	22	11	11	0
	14	23	11	12	0
	15	24	12	12	0
	16	25	12	13	0
	17	26	13	13	0
	18	30	10	10	10

Fonte: Autora (2025).

5 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Conforme visto na introdução, o modelo matemático proposto foi inspirado no Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos (MD-CVRP) (Figura 4). As adaptações necessárias são descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Relação entre o MD-CVRP e o Problema de Alocação de Docas

MD-CVRP	Problema de Alocação de Docas
Depósitos	Docas
Depósito Virtuais	Docas Virtuais
Clientes	Caminhões
Veículo	Veículo fictício representando o atendimento dos caminhões nas docas
Tempo de viagem de um nó para outro nó	Tempo de operação do caminhão anterior até o estacionamento do próximo caminhão
Tempo de viagem do depósito até o primeiro cliente	Tempo igual a zero
Tempo de viagem entre o último cliente e o depósito	Tempo de atendimento do último caminhão que estaciona no CD

Fonte: Autora (2025).

Os parâmetros, conjuntos e variáveis do modelo são apresentados e descritos nas Tabelas 4,5 e 6, respectivamente. A Figura 8 ilustra os conjuntos descritos na Tabela 5.

Tabela 4 – Parâmetros do modelo matemático proposto

Definição	Descrição dos Parâmetros
hp	Horizonte de tempo para planejamento em horas
M	Multiplicador grande para lógica do modelo
nd	Número de docas
nc	Número de caminhões
to_{ik}	Tempo de operação convencional do caminhão i na doca k, para $i \in NC, k \in DR$
a_i	Momento de chegada do caminhão i, para $i \in NC$
b_i	Momento máximo para estacionamento do caminhão i, para $i \in NC$
ta_{ik}	Tempo adicional de operação do caminhão i na doca k, para $i \in NC, k \in DR$

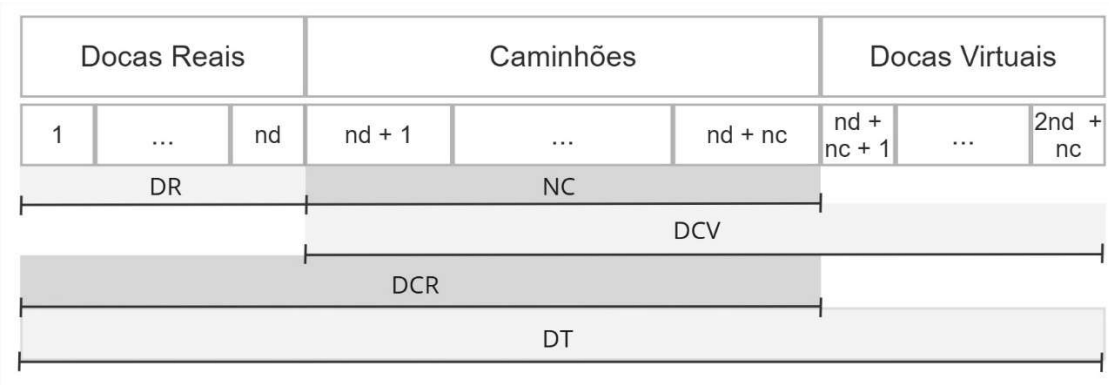
Fonte: Autora (2025).

Tabela 5 - Conjuntos do modelo matemático proposto

Definição	Descrição dos Conjuntos
DR	Conjunto de docas, $DR = \{1, \dots, nd\}$
NC	Conjunto de caminhões, $NC = \{nd + 1, \dots, nd + nc\}$
DCV	Conjunto de caminhões e docas fictícias, $DCV = \{nd + 1, \dots, 2nd + nc\}$
DCR	Conjunto de caminhões e docas reais, $DCR = \{1, \dots nd + nc\}$
DT	Conjunto de todos os elementos do problema, $DT = \{1, \dots, 2nd + nc\}$

Fonte: Autora (2025).

Figura 8 - Conjuntos do modelo matemático proposto



Fonte: Autora (2025).

Tabela 6 - Variáveis de decisão do modelo matemático proposto

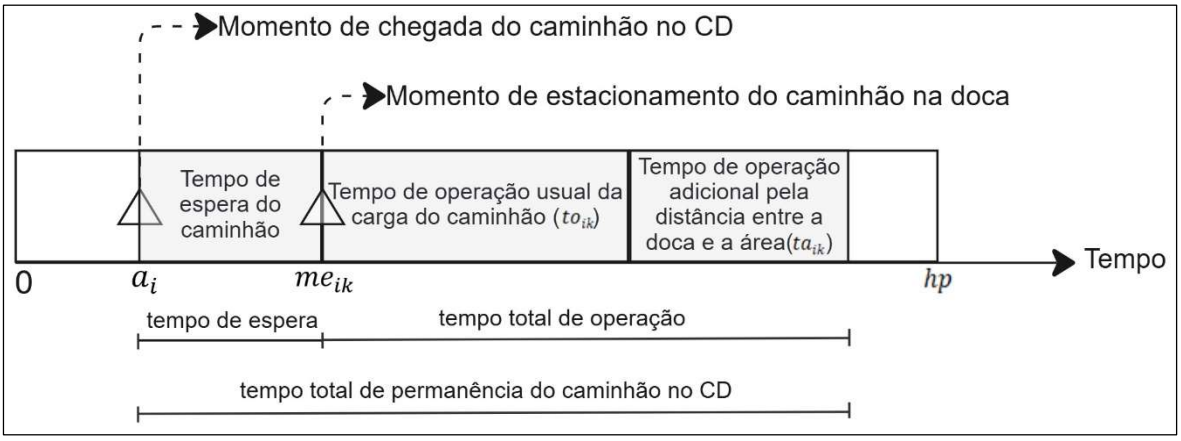
Definição	Descrição das Variáveis de Decisão
$x_{ijk} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	Variável binária que assume valor 1 se o caminhão j for atendido imediatamente após o caminhão i na doca k, para $i \in DT, j \in DT, k \in DR$, 0 caso contrário.
$me_{ik} \in \mathbb{R}^+$	Momento de estacionamento do caminhão i na doca k, para $i \in NC, k \in DR$

Fonte: Autora (2025).

A Função Objetivo, apresentada na Equação 1 e na Figura 9, tem como objetivo minimizar o tempo total de permanência dos caminhões no centro de distribuição compartilhado. Este tempo total é dado pela hora em que o caminhão estaciona na doca (me_{ik}), mais o tempo de operação convencional desta carga (to_{ik}) acrescido do tempo adicional pela distância entre a doca e área de armazenagem (ta_{ik}), subtraído do tempo de chegada do caminhão no CD (a_i).

$$\text{Minimizar} \sum_{i \in NC} \sum_{k \in DR} \left(me_{ik} + (to_{ik} + ta_{ik} - a_i) \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \right) \quad (1)$$

Figura 9 - Termos da Função Objetivo



Fonte: Autora (2025).

As restrições são apresentadas a seguir.

$$\sum_{k \in DR} \left(x_{i(k+nc+nd)k} + \sum_{j \in NC} x_{ijk} \right) = 1 \qquad \forall\, i \in NC \qquad (2)$$

$$x_{k(k+nc+nd)k} + \sum_{j \in NC} x_{kjk} = 1 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (3)$$

$$x_{k(k+nc+nd)k} + \sum_{i \in NC} x_{i(k+nc+nd)k} = 1 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (4)$$

$$\sum_{ka \in DR} \sum_{i \in DCR} x_{i(k+nc+nd)ka} = 1 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (5)$$

$$\sum_{i \in NC} \left(x_{(k+nc+nd)ik} + x_{(k+nc+nd)kk} \right) = 0 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (6)$$

$$x_{(k+nc+nd)kk} + \sum_{i \in NC} x_{ikk} = 0 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (7)$$

$$\left(\left(x_{h(k+nc+\quad)k} + \sum_{j \in NC} x_{hjk} \right) - \left(x_{khk} + \sum_{i \in NC} x_{ihk} \right) \right) = 0 \qquad \forall\, h \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (8)$$

$$me_{jk} \geq me_{ik} + (to_{ik} + ta_{ik}) \cdot x_{ijk} - \left(\left(1 - x_{ijk}\right) \cdot M\right) \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, j \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (9)$$

$$me_{ik} \geq a_i \cdot \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (10)$$

$$me_{i,k} \leq b_i \cdot \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (11)$$

$$me_{i,k} \leq (hp - to_{ik}) \cdot \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (12)$$

As Restrições 2 asseguram que cada caminhão i seja alocado a uma única doca k. As Restrições 3 garantem que, em cada doca k, o primeiro cliente a ser atendido pelo veículo fictício seja um caminhão ou a doca virtual associada. Na segunda opção, nenhum caminhão estaciona nesta doca.

As Restrições 4 garantem a precedência da doca virtual, ou seja, garante que, para cada doca k, ou um caminhão é o último a ser atendido e sai para a doca virtual, ou nenhum caminhão é atendido e o veículo fictício vai da doca real para a doca virtual.

As Restrições 5 garantem que cada caminhão seja atendido uma única vez em uma única doca. Isso evita múltiplas alocações para o mesmo caminhão ou situações que ele fique sem atendimento. Assim, se o veículo fictício sair de uma doca, ele deve terminar apenas na doca virtual equivalente.

As Restrições 6 e 7 impossibilitam que, respectivamente, o veículo fictício saia do virtual ou chegue no real. Assim, nenhum caminhão pode ser atendido após a doca virtual ou antes da doca real. A rota deve ter início na doca real e fim na doca virtual.

A conservação de fluxo é garantida pelas Restrições 8 onde um caminhão h estaciona em uma doca k seja igual ao número de vezes que sai desta doca. Se o veículo fictício inicia o atendimento de um caminhão, ele deve finalizar o atendimento deste mesmo caminhão.

As Restrições 9 determinam que, se o caminhão i precede o caminhão j na doca k, o tempo do início do estacionamento de j deve ser maior ou igual ao tempo de

término do estacionamento de i mais o tempo de operação do caminhão i. Assim, é imposta uma restrição de sequenciamento no tempo para atendimento dos caminhões que estacionam na mesma doca. Isso impossibilita que o caminhão j, atendido depois do caminhão i estacione antes do fim da operação de j em uma doca k.

As Restrições 10 garantem que o horário de estacionamento de um caminhão i em uma doca k seja maior que o momento de chegada do caminhão no centro de distribuição. Dessa forma, o caminhão não pode estacionar antes de chegar no CD. As Restrições 11 garantem que o caminhão i estacione em qualquer doca k até o momento b_i, determinado pelo momento máximo de atendimento deste caminhão.

As Restrições 12 delimitam o momento máximo de finalização de operação dos caminhões. Dessa forma, o momento para início do estacionamento de um caminhão i deve ser menor que o horizonte de planejamento (hp) menos o tempo operacional associado a operação total deste caminhão ($to_{ik} + ta_{ik}$), sem considerar hora extra na operação.

A quantidade de variáveis do modelo matemático proposto (qt), descritas na Tabela 6, pode ser calculada a partir da Função 13.

$$qt = |DR|\,|NC|\,(1 + |DVC|) \tag{13}$$

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo tem como finalidade apresentar os resultados obtidos ao aplicar o modelo matemático descrito no Capítulo 5 às instâncias de teste desenvolvidas. A seguir, são apresentados os resultados gerados com o uso do *solver* CPLEX 22.1.0 e tratados em Python com a biblioteca *matplotlib* e Pandas. A visualização do sequenciamento de caminhões nas docas foi construída para visualização em gráficos da ocupação das docas ao longo do tempo.

O computador utilizado é equipado com um processador Intel® Core™ i7-9750H0 operando a 2.60 GHz, 6 núcleos e 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. O *solver* CPLEX encontrou a solução ótima para todas as instâncias testadas, descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da Função Objetivo obtidos pelo *solver* CPLEX

(continua)

Cenário	Instância	Função Objetivo (h)	Tempo de execução no CPLEX (s)
1 – Doca-Fixa	01	17,32	0,64
	02	19,84	0,73
	03	21,00	0,47
	04	23,21	0,77
	05	22,98	0,73
	06	23,30	0,80
	07	24,78	5,28
	08	25,96	2,81
	09	28,39	0,58
2 – Doca-Flexível	10	17,32	2,84
	11	18,61	12,86
	12	20,32	722,26
	13	21,96	72,06

(continuação)

Cenário	Instância	Função Objetivo (h)	Tempo de execução no CPLEX (s)
2 – Doca-Flexível	14	21,47	11,38
	15	22,86	61,34
	16	23,35	249,91
	17	25,11	343,14
	18	28,17	122,67

Fonte: Autora (2025).

A Tabela 8 apresenta os tempos de espera, operação e tempo total de permanência dos caminhões para as instâncias dos Cenários 1 e 2. O Cenário 2 (Doca-Flexível) apresenta valores menores para o tempo de permanência dos caminhões, se comparado ao Cenário 1 (Doca-Fixa), para quase todas as instâncias, exceto nas com 19 caminhões (instâncias 01 e 10).

Tabela 8 - Resultados obtidos pelo *solver* CPLEX para comparação Cenário 1 (Doca-Fixa) e Cenário 2 (Doca-Flexível)

(continua)

Cenário	Instância	Nº Caminhões	Espera Caminhões (h)	Operação Caminhões (h)	Tempo Total (h)
1 – Doca-Fixa	01	19	0,32	17,00	17,32
	02	20	1,84	18,00	19,84
	03	21	2,20	18,80	21,00
	04	22	3,41	19,80	23,21
	05	23	2,38	20,60	22,98
	06	24	1,70	21,60	23,30
	07	25	2,38	22,40	24,78
	08	26	2,56	23,40	25,96

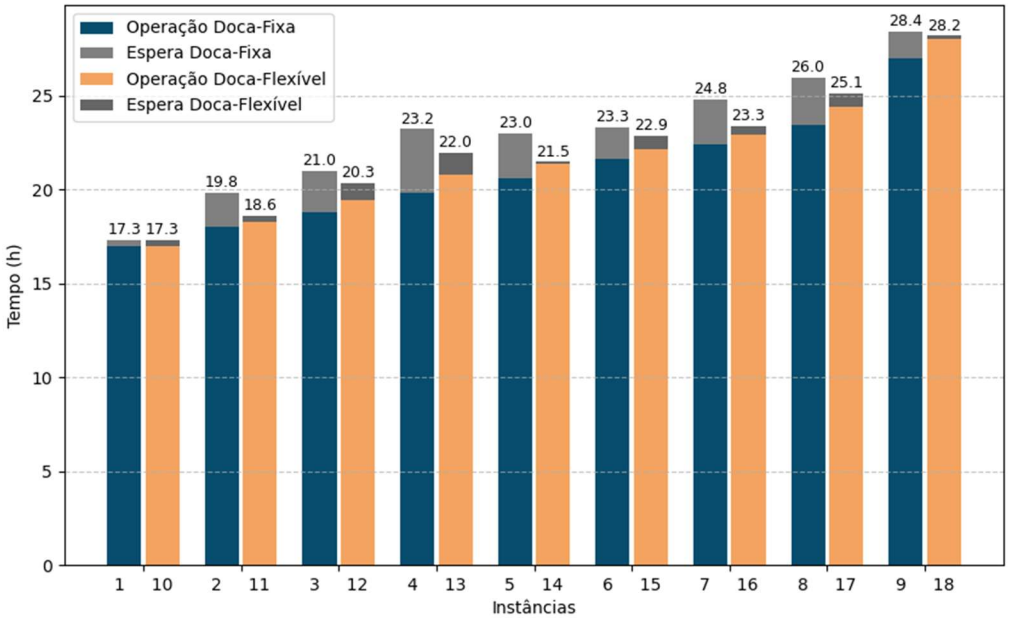
(continuação)

Cenário	Instância	Nº Caminhões	Espera Caminhões (h)	Operação Caminhões (h)	Tempo Total (h)
1– Doca-Fixa	09	30	1,39	27,00	28,39
2 – Doca-Flexível	10	19	0,32	17,00	17,32
	11	20	0,36	18,25	18,61
	12	21	0,87	19,45	20,32
	13	22	1,16	20,80	21,96
	14	23	0,12	21,35	21,47
	15	24	0,76	22,10	22,86
	16	25	0,45	22,90	23,35
	17	26	0,71	24,40	25,11
	18	30	0,17	28,00	28,17

Fonte: Autora (2025).

O Gráfico 1 apresenta os tempos de operação e os tempos de espera para os caminhões nos cenários Doca-Fixa e Doca-Flexível. Os valores acima das barras representam o tempo total de permanência dos caminhões no CD para cada instância. Observa-se uma redução no tempo total de permanência em 89% das instâncias, se comparados ambos os cenários. As instâncias para cenário Doca-Flexível apresentam aumento no tempo de operação e redução no tempo de espera se comparadas aos cenários de Doca-Fixa.

Gráfico 1 – Resultado do tempo de permanência dos caminhões no CD compartilhado



Fonte: Autora (2025).

Nos próximos tópicos serão apresentados os sequenciamentos dos caminhões em cada doca para as instâncias descritas na Tabela 3. Para representação gráfica, foram gerados gráficos onde o eixo x representa o tempo, o eixo y corresponde às docas, sendo as Docas 1 e 2 em frente à área de armazenagem da Empresa 1 e, as Docas 3 e 4 em frente à área de armazenagem da Empresa 2.

A área dos retângulos indica a duração da operação em cada doca. Para comparação dos cenários Doca-Fixa e Doca-Flexível, as Tabelas 8 a 17 informam a empresa responsável pela carga de cada caminhão numerado nos gráficos.

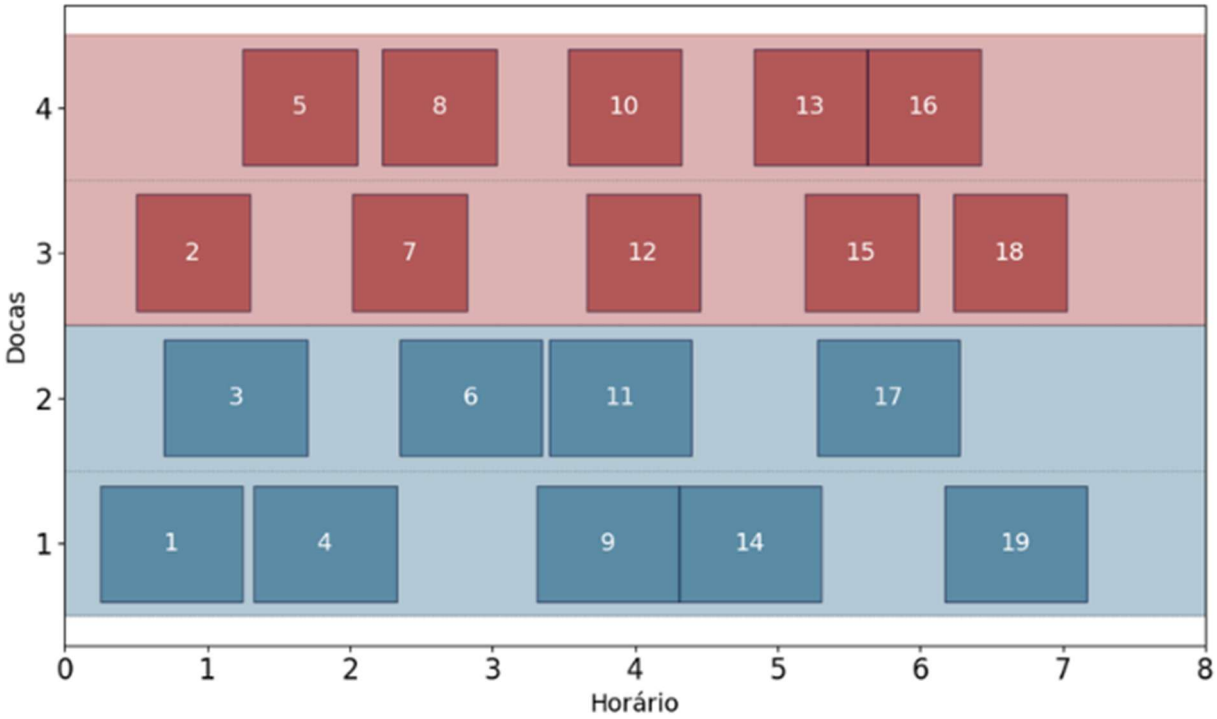
A Tabela 8 indica os caminhões de cada empresa nas Instâncias 01 e 10. As Instâncias 01 e 10 obtiveram o mesmo resultado para a minimização da Função Objetivo. A ordem de atendimento dos caminhões em cada doca é apresentada para ambos os cenários destas instâncias na Figura 10. Nas instâncias 01 e 10 ocorreram atrasos referentes ao tempo aguardado para estacionar dos caminhões 14 e 16, com atrasos de 0,23 horas e 0,09 horas, respectivamente. Nestas duas instâncias, não houve diferença entre flexibilizar a doca de estacionamento ou restringi-la.

Tabela 9 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 01 e 10

Empresa	Caminhões com carga desta empresa									
1	1	3	4	6	9	11	14	17	19	
2	2	5	7	8	10	12	13	15	16	18

Fonte: Autora (2025).

Figura 10 – Resultado da ocupação das docas para as Instâncias 01 e 10 pelo CPLEX



Fonte: Autora (2025).

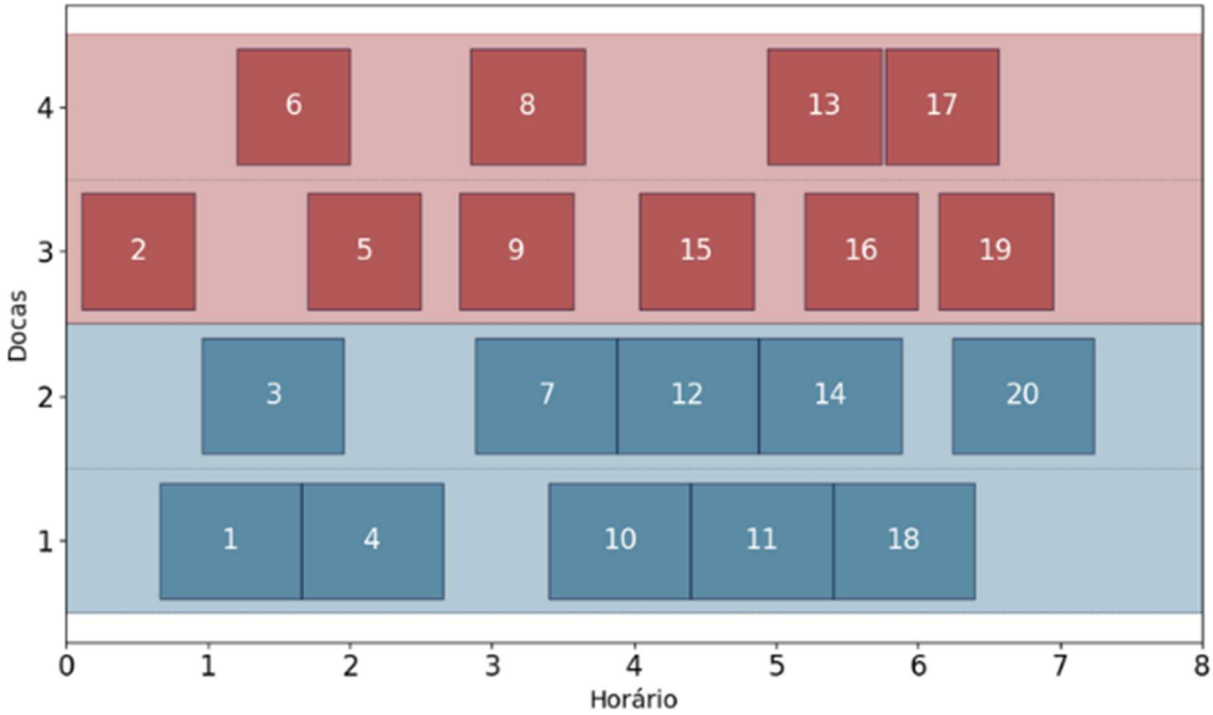
A Tabela 10 indica os caminhões de cada empresa nas Instâncias 02 e 11. Se comparadas às instâncias 02 (Doca-Fixa) e 11 (Doca-flexível), o tempo de espera dos caminhões reduziu em 1,48 horas. No cenário Doca-Fixa (Figura 11), o tempo total de permanência de todos os caminhões foi de 19,84 horas, enquanto no cenário Doca-Flexível (Figura 12), esse tempo foi reduzido para 18,61 horas. Ao alocar a doca distante da área de armazenagem da empresa do caminhão 11, o caminhão 14 reduziu seu tempo de espera em 0,45 minutos, visto que a doca 1 e 2 passou a ter disponibilidade.

Tabela 10 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 02 e 11

Empresa	Caminhões com carga desta empresa									
1	1	3	4	7	10	11	12	14	18	20
2	2	5	6	8	9	13	15	16	17	19

Fonte: Autora (2025).

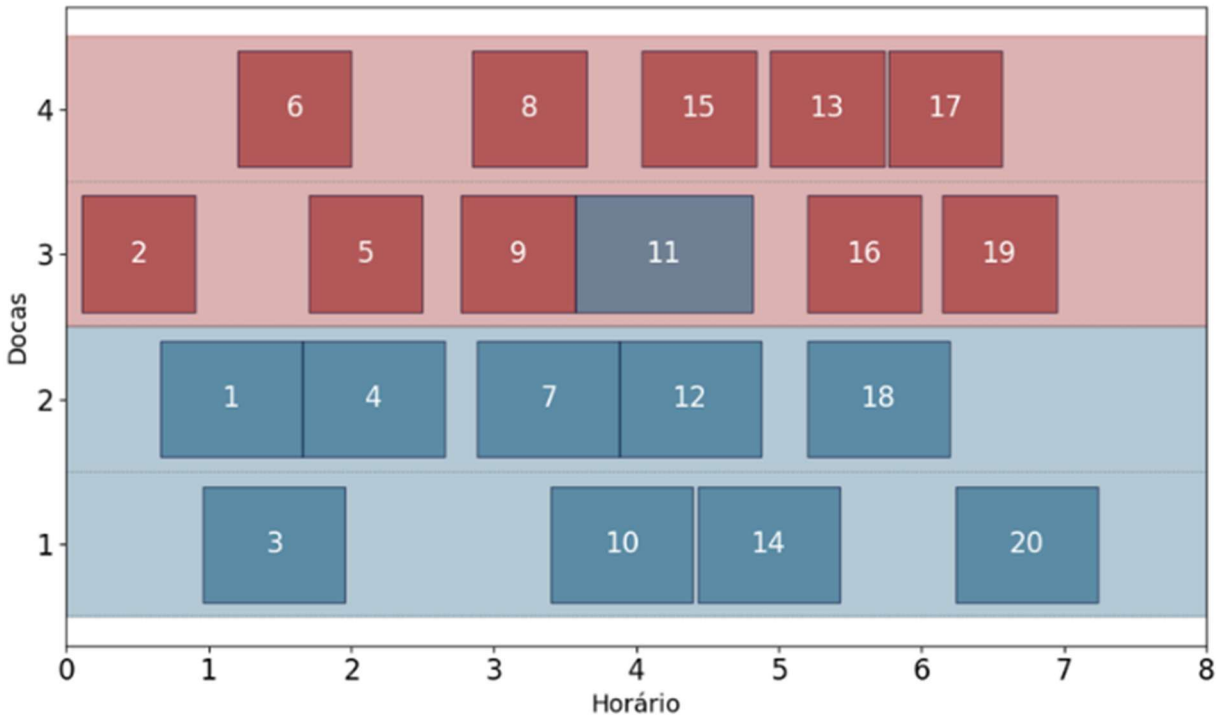
Figura 11 – Resultado da ocupação das docas para a Instância 02 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

A Figura 12 ilustra a ocupação das docas ao longo do tempo para o cenário Doca-Flexível. A alteração em relação a Instância 11 (Doca-Fixa) é dada pela mudança no local de operação do Caminhão 11, da Empresa 1. O tempo de operação deste caminhão é maior que no cenário Doca-Fixa, porém, o tempo de espera foi reduzido em 0,98 horas.

Figura 12 – Resultado da ocupação das docas para a Instância 11 pelo solver CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

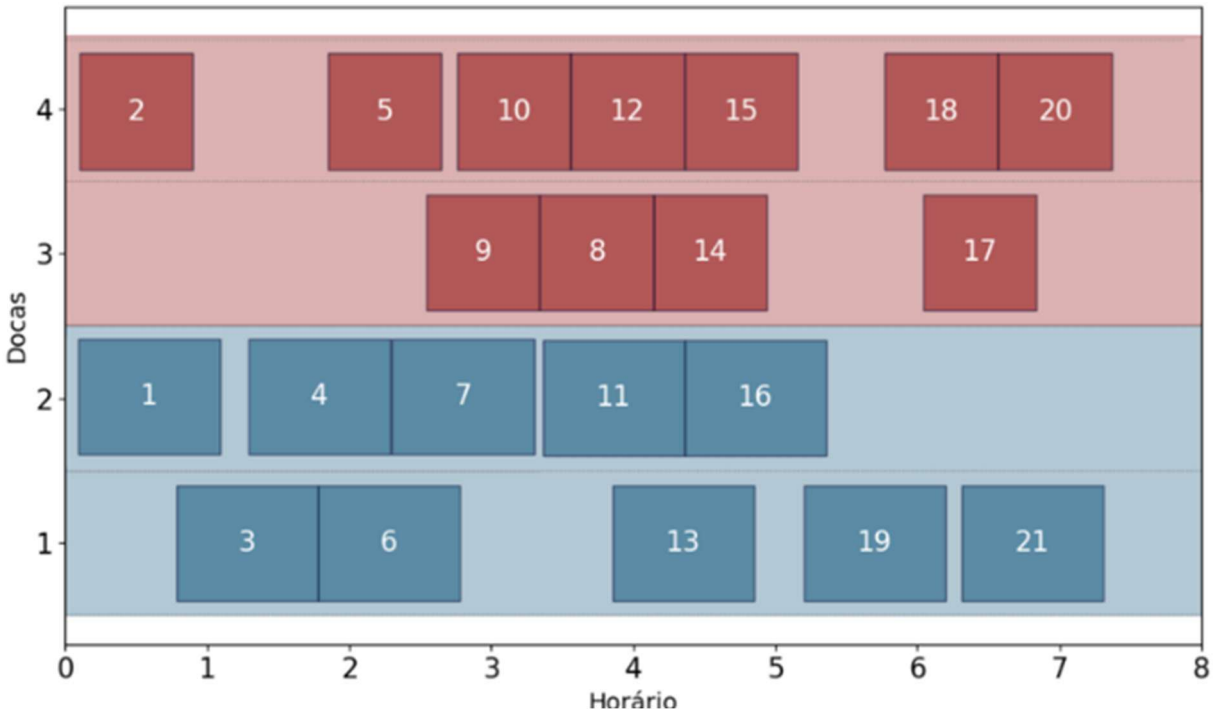
A Tabela 11 apresenta a distribuição dos 21 caminhões para cada empresa nas instâncias 03 (Doca-Fixa) e 12 (Doca-Flexível). A alocação de docas para operação dos caminhões pode ser vista nas Figuras 13 e 14. Ao analisar a chegada dos 21 caminhões em um dia, a instância 12 (Doca-Flexível) apresentou 0,68 horas a menos na permanência dos caminhões, se comparada a instância 03 (Doca-Fixa). Na instância 12, os caminhões 3, 8 e 20 foram realocados para operar em docas em frente à área de outra empresa. Percebe-se que, apesar desses caminhões não estarem em frente à área destinada à sua empresa, a alocação foi definida para as docas mais próximas disponíveis, como, por exemplo, a operação do Caminhão 3 na Doca 3 e não na Doca 4, mais distante.

Tabela 11 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 03 e 12

Empresa	Caminhões com carga desta empresa										
1	1	3	4	6	7	11	13	16	19	21	
2	2	5	8	9	10	12	14	15	17	18	20

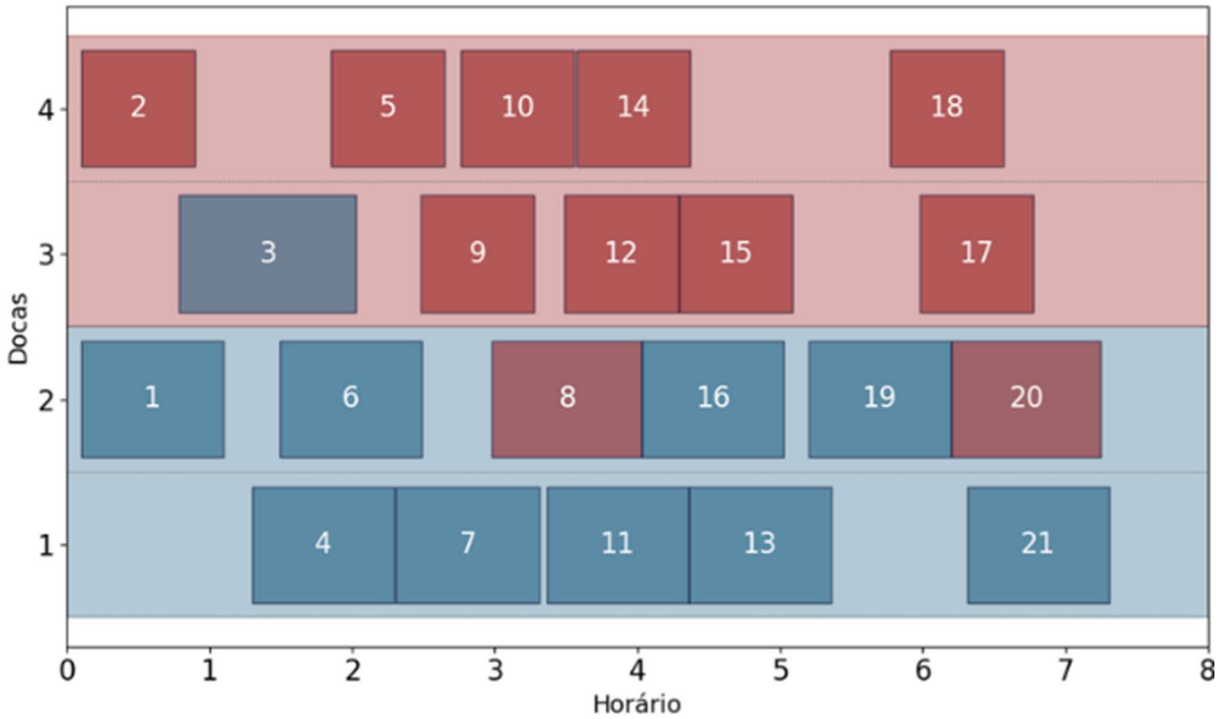
Fonte: Autora (2025).

Figura 13 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 03 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

Figura 14 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 12 pelo CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

A Tabela 12 apresenta a relação das empresas e os caminhões a serem operados para a instância 04 (Doca-Fixa) e instância 13 (Doca-Flexível), ambas com 22 caminhões operando em um dia. O cenário Doca-Flexível, na instância 13, apresentou 1,25 horas a menos no tempo de permanência dos caminhões que o cenário Doca-Fixa, instância 04.

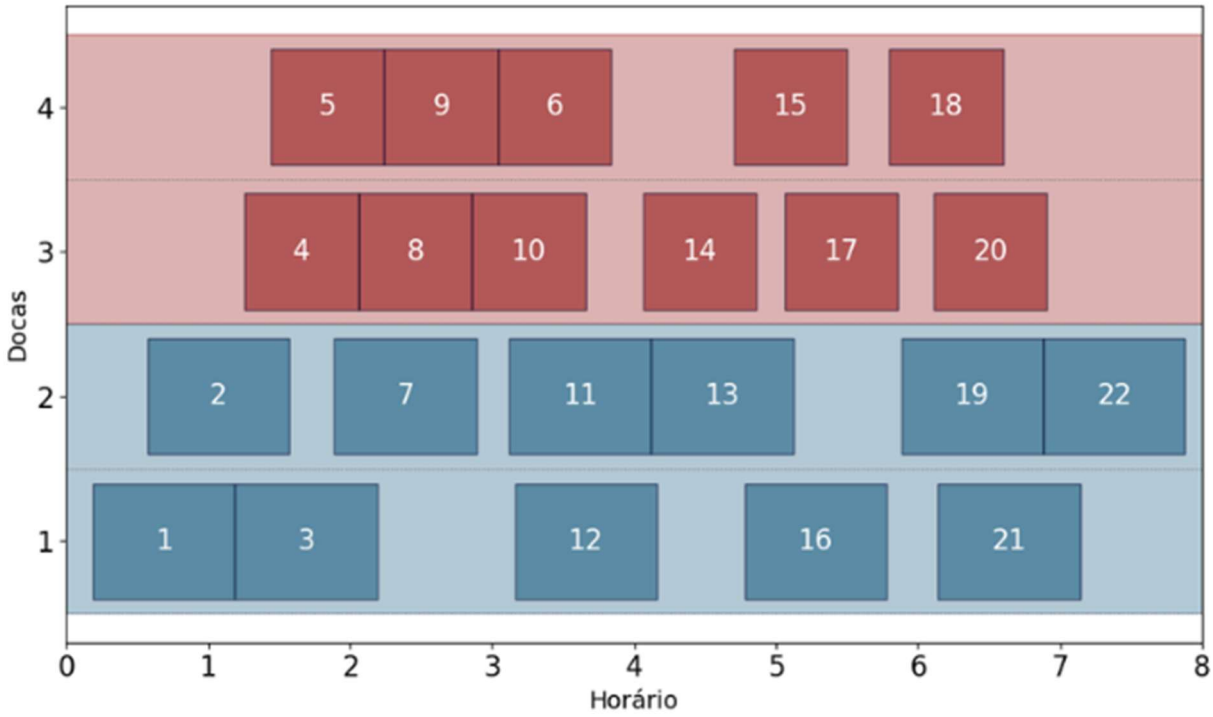
Tabela 12 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 04 e 13

Empresa	Caminhões com carga desta empresa										
1	4	5	6	8	9	10	14	15	17	18	20
2	1	2	3	7	11	12	13	16	19	21	22

Fonte: Autora (2025).

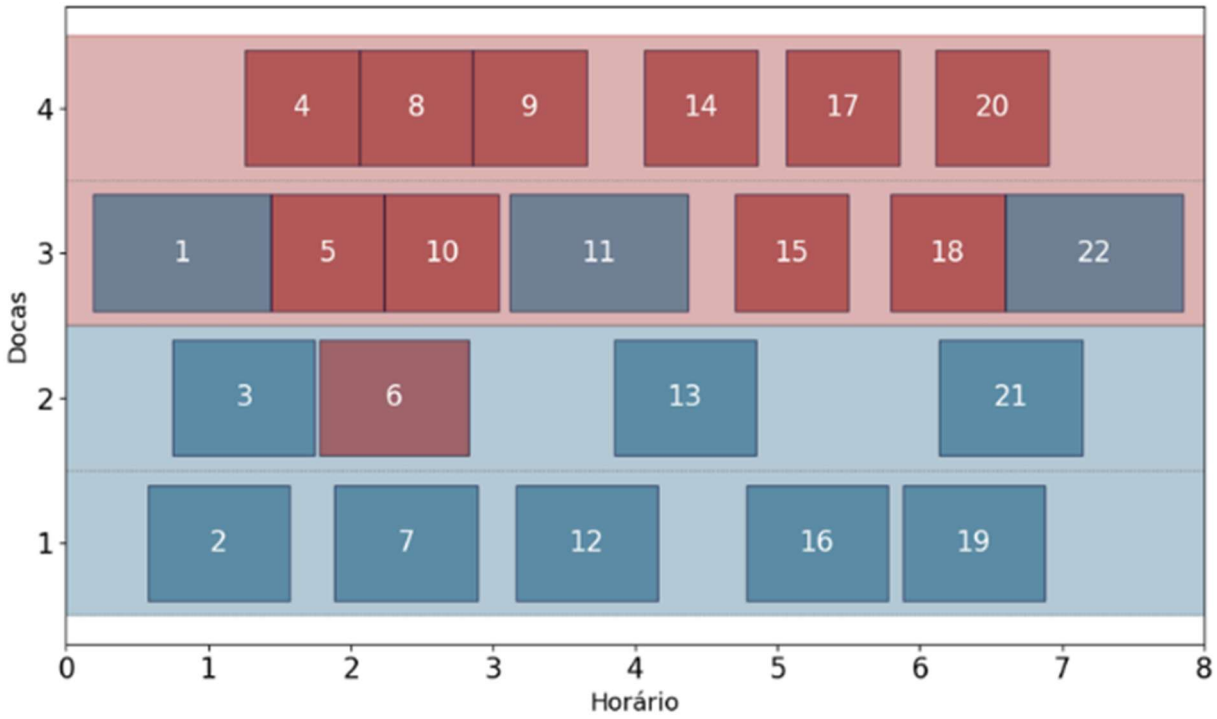
A ocupação das docas é ilustrada na Figuras 15, para Doca-Fixa, e Figura 16, para Doca-Flexível. A ilustração da ocupação dos caminhões nas docas para a instância 13 indica que os caminhões 1, 11 e 22 da Empresa 1 são realocados na Doca 3 e apenas o caminhão 6, da Empresa 2, é realocado para a Doca 2, se comparados ao cenário Doca-Fixa. A alteração acontece para mais vezes para caminhões da Empresa 1, que conseguem operar em 1,0 hora, apresentando um cronograma com menos folgas entre as operações que a Empresa 2, que opera em 0,8 horas, mesmo que tenham a mesma quantidade total de caminhões a serem carregados ou descarregados em um dia.

Figura 15 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 04 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

Figura 16 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 13 pelo CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

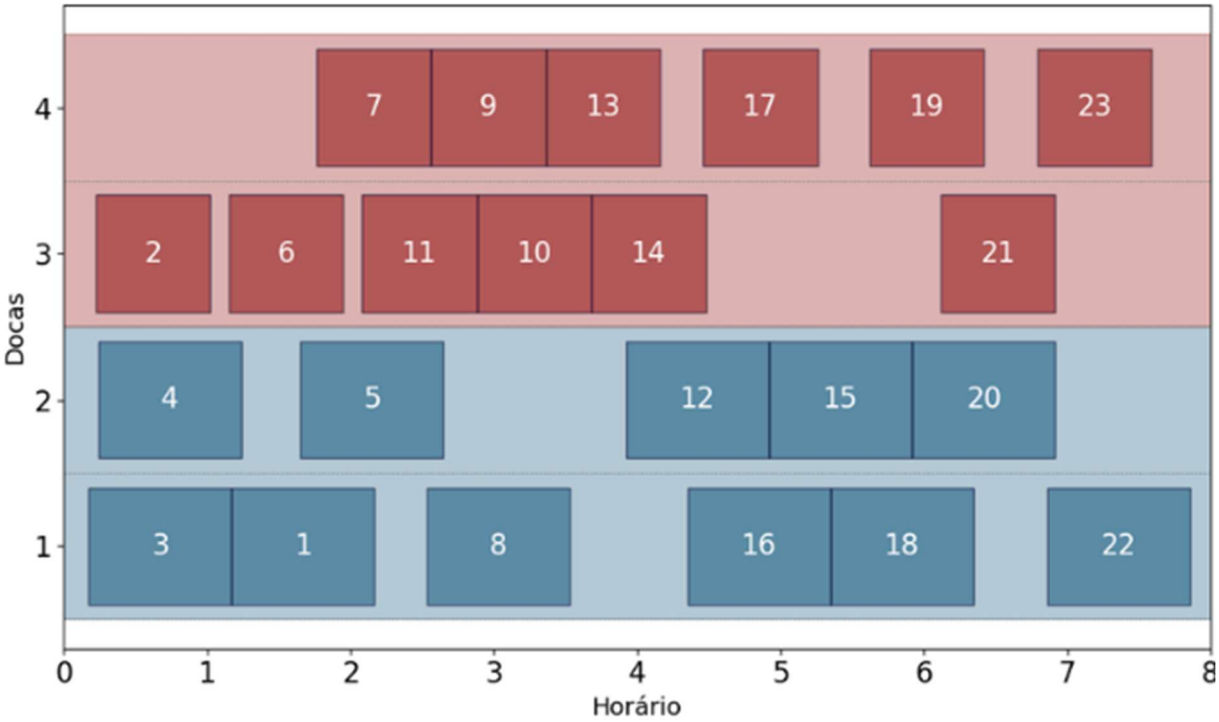
A Tabela 13 apresenta a distribuição dos 23 caminhões para cada empresa nas instâncias 05 (Doca-Fixa) e 14 (Doca-Flexível). A alocação de docas para os caminhões pode ser vista nas Figuras 17 e 18. Ao comparar os cenários, a instância 14 (Doca-Flexível) apresentou 2,26 horas a menos no tempo de permanência dos caminhões em relação a instância 05 (Doca-Fixa). Ao analisar a operação da Empresa 2 percebe-se que na Instância 14 há uma folga entre o atendimento dos caminhões na Doca 3 e Doca 4, o que não ocorria para a instância 05. Dessa forma, o cenário Doca-Flexível, além de minimizar o tempo de permanência total dos caminhões, a alocação garantiu um tempo disponível entre as operações nas docas, não emendando operações no mesmo local.

Tabela 13 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 05 e 14

Empresa	Caminhões com carga desta empresa											
1	2	6	7	9	10	11	13	14	17	19	21	23
2	1	3	4	5	8	12	15	16	18	20	22	

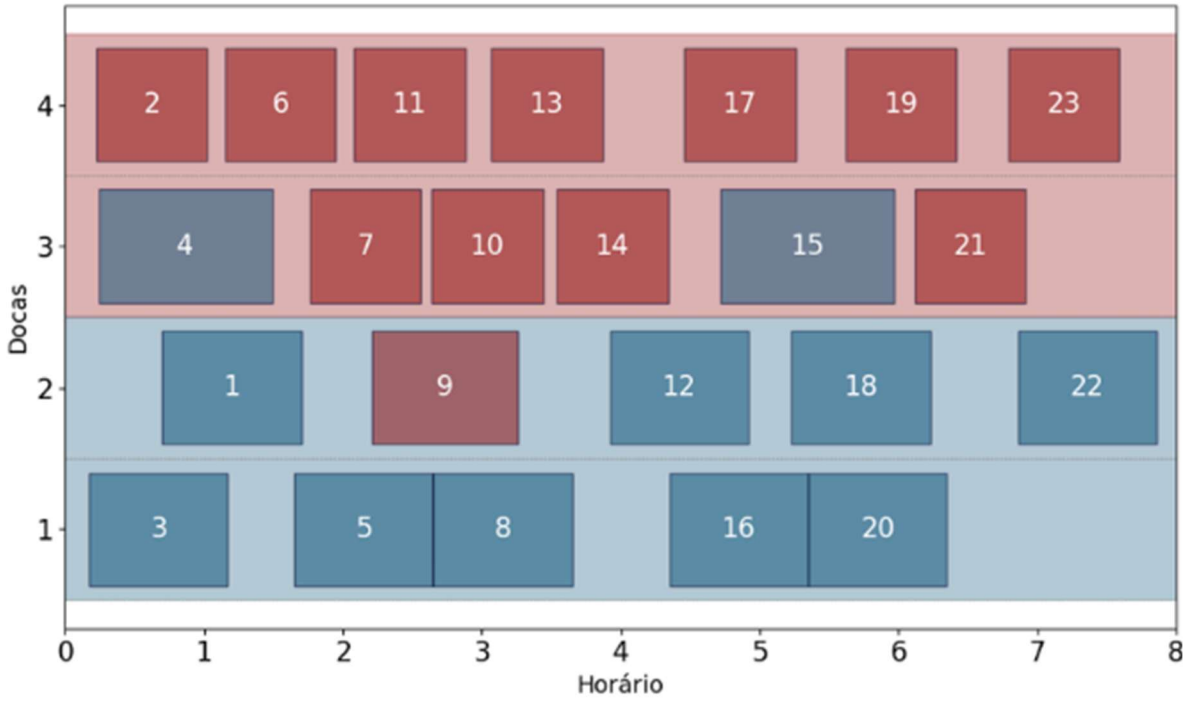
Fonte: Autora (2025).

Figura 17 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 05 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

Figura 18 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 14 pelo CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

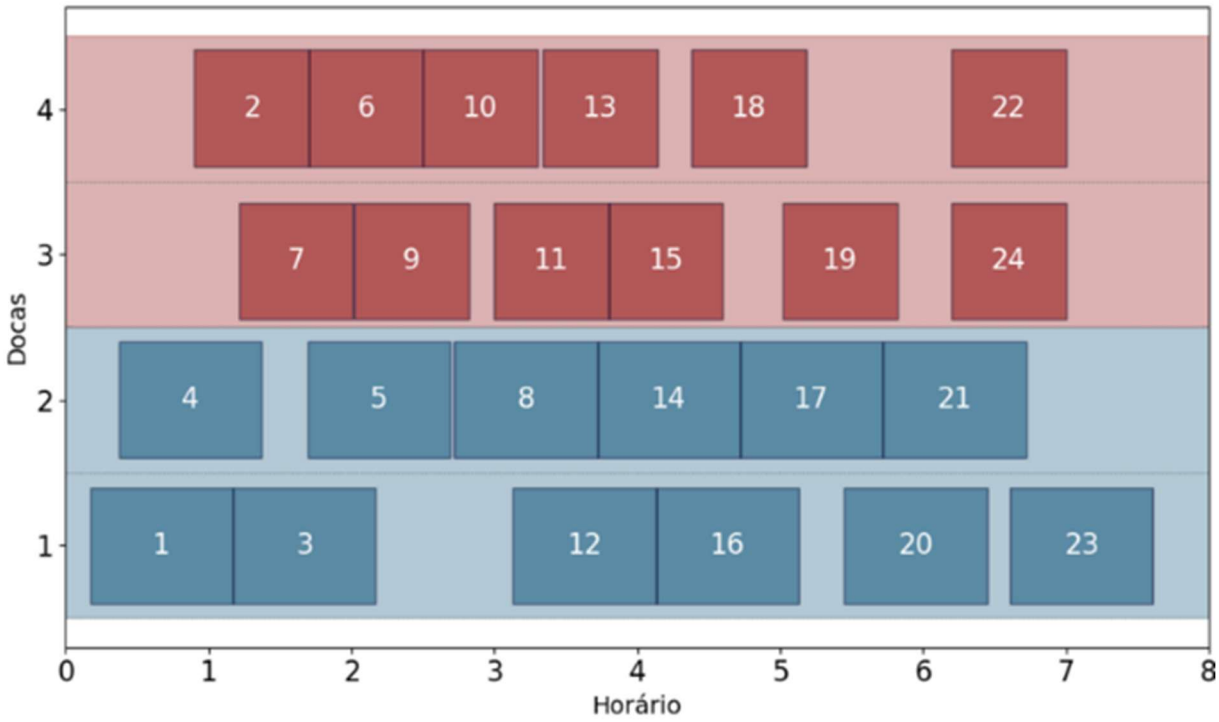
A relação entre as empresas e caminhões para as instâncias com 24 caminhões é descrita na Tabela 14. A instância 06 (Doca-Fixa) apresentou 23,30 horas de permanência dos caminhões enquanto na instância 15 (Doca-Flexível) o tempo de permanência passou para 22,86 horas. As Figuras 19 e 20 representam a sequência de atendimento nas instâncias 06 e 15, respectivamente. No cenário Doca-Flexível, apenas os caminhões 1 e 7 foram realocados para docas distantes, reduzindo a propagação do atraso para os períodos subsequentes.

Tabela 14 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 06 e 15

Empresa	Caminhões com carga desta empresa											
1	2	6	7	9	10	11	13	15	18	19	22	24
2	1	3	4	5	8	12	14	16	17	20	21	23

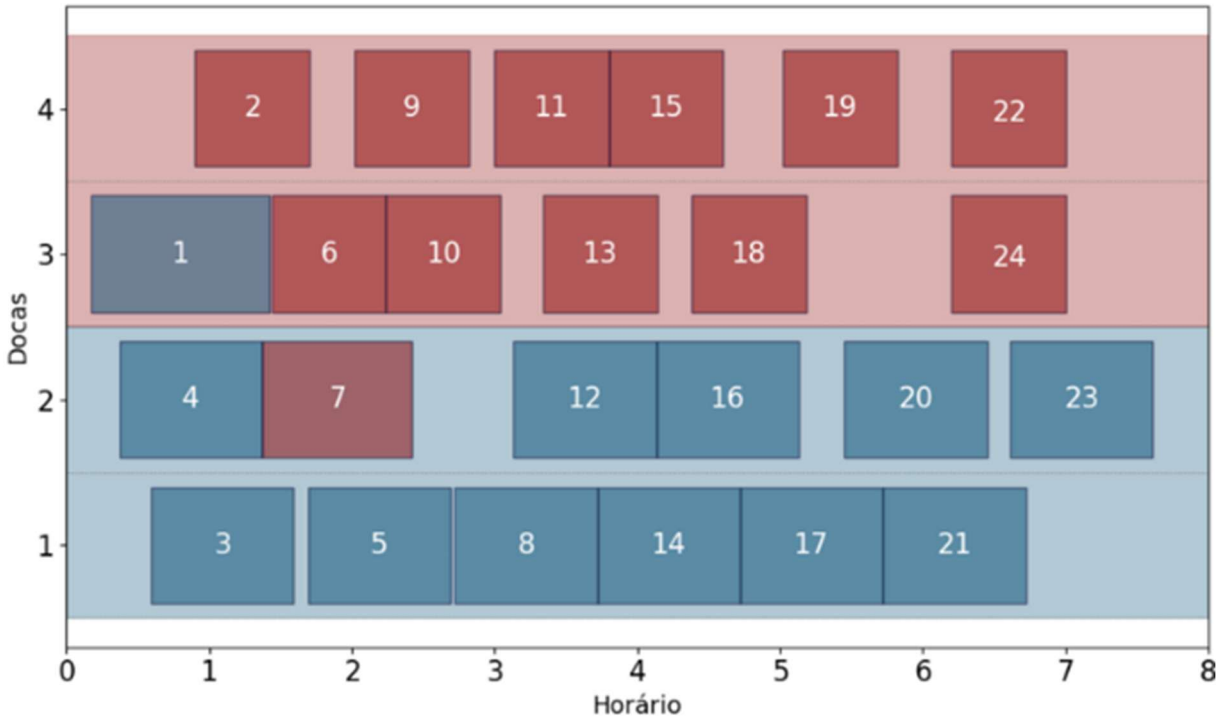
Fonte: Autora (2025).

Figura 19 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 06 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

Figura 20 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 15 pelo CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

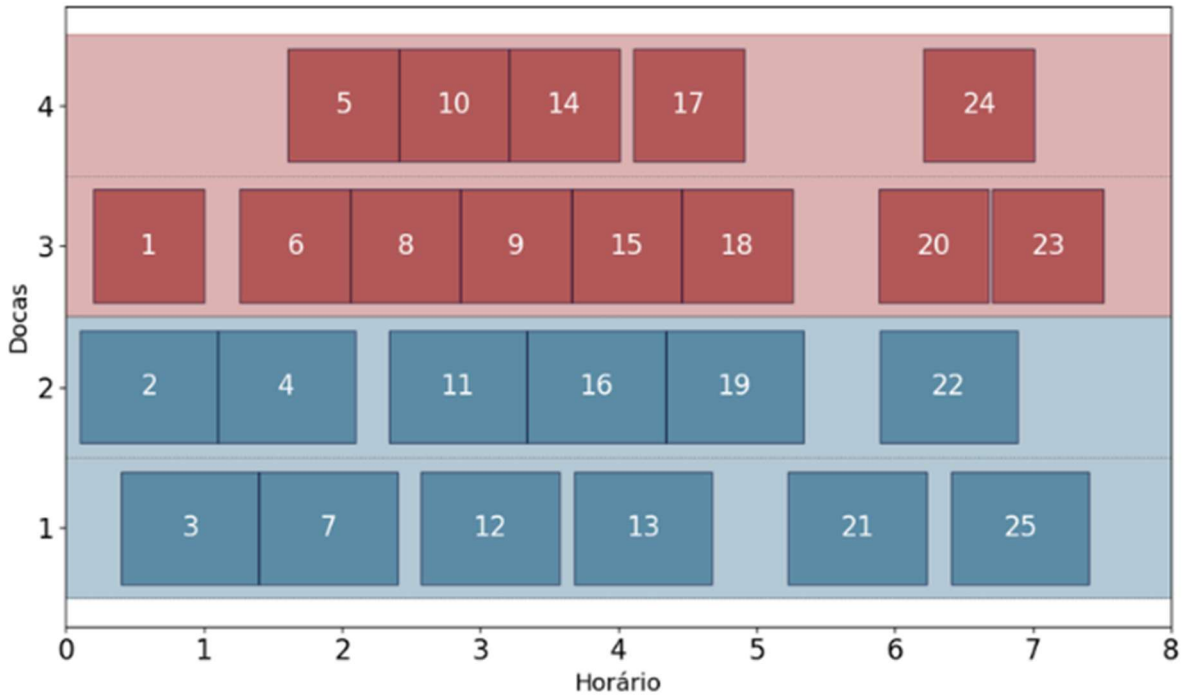
As instâncias 07 (Doca-Fixa) e 16 (Doca-Flexível), com 25 caminhões de cargas destinadas a empresas distintas, conforme a Tabela 15, apresentaram diferença na alocação de docas para operação de dois caminhões: 3, da Empresa 1 e o caminhão 5, da Empresa 2. A alocação de caminhões para a instância 07 é ilustrada na Figura 21 e a instância 16 é ilustrada na Figura 22. A instância 16, ao flexibilizar a escolha da doca em que o caminhão irá operar, apresentou 1,43 horas a menos de permanência dos caminhões no CD que a instância 07, que restringe a operação a doca próxima da área de armazenagem. O tempo total de permanência dos caminhões no cenário Doca-Flexível é dada pela soma de 0,45 horas de espera e 22,90 horas de operação, enquanto no cenário Doca-Fixa é dada pela soma de 2,38 horas de espera e 22,40 de operação.

Tabela 15 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 07 e 16

Empresa	Caminhões com carga desta empresa												
1	2	3	4	7	11	12	13	16	19	21	22	25	
2	1	5	6	8	9	10	14	15	17	18	20	23	24

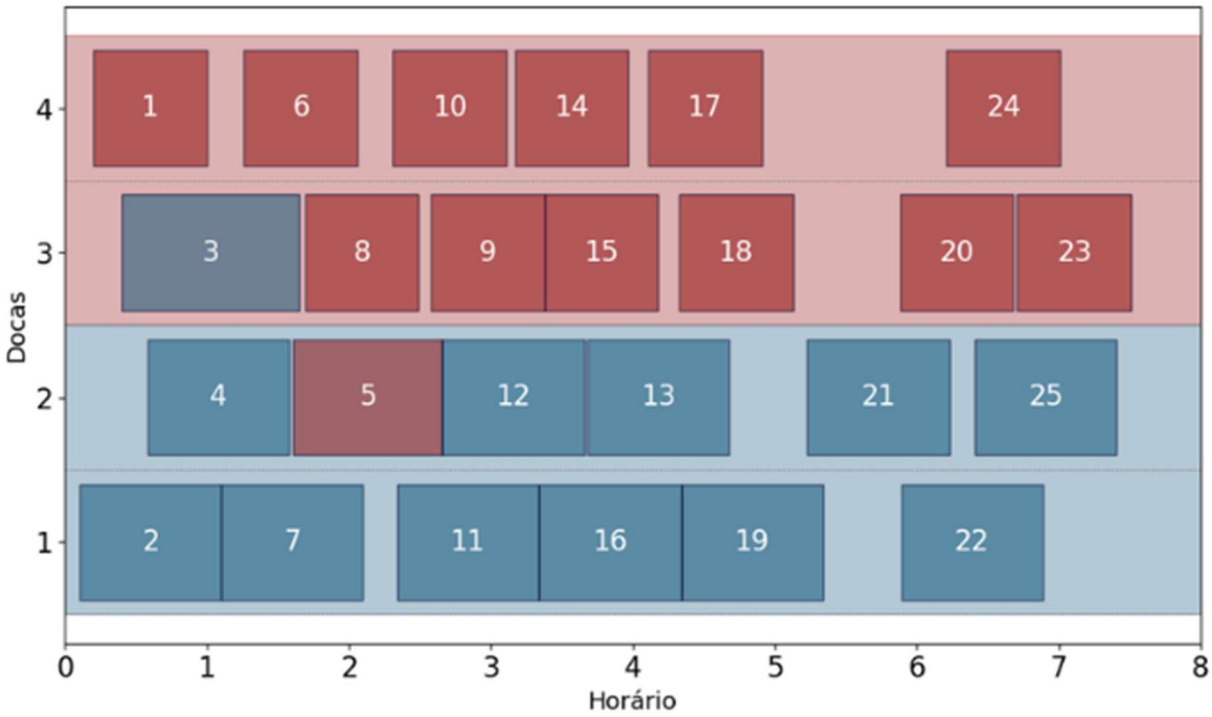
Fonte: Autora (2025).

Figura 21 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 07 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

Figura 22 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 16 pelo CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

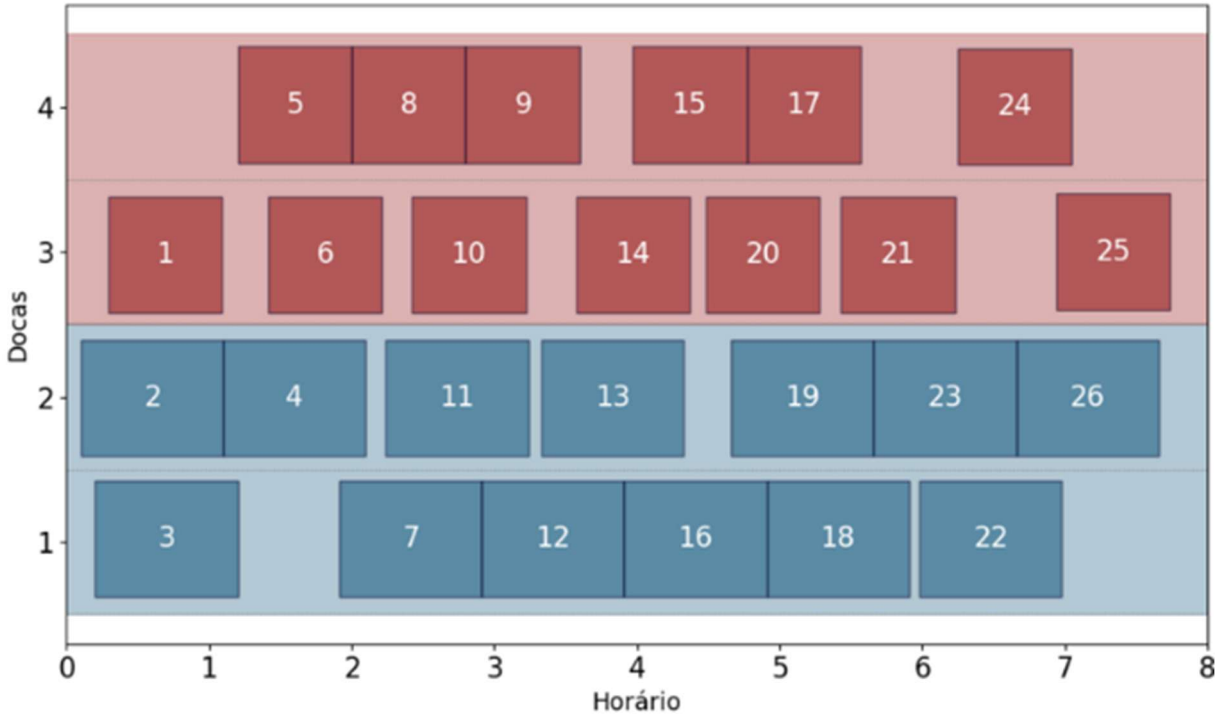
A Tabela 16 apresenta a relação entre os 26 caminhões das instâncias 08 e 17 e as duas empresas com área reservada a armazenagem no CD. O cenário Doca-Fixa, instância 08, é ilustrado na Figura 25 e o cenário Doca-Flexível, instância 17, é ilustrado na Figura 26. Se comparados, os tempos de permanência total foram de 25,96 horas na Doca-Fixa para 25,11 horas na Doca-Flexível, devido a alocação diferente de 4 caminhões: 2, 13, 15 e 23. A flexibilidade permitiu redução no tempo de espera ao trabalhar a sinergia entre as empresas, de forma que o tempo de espera foi de 2,56 horas, na instância 08, para 0,71 horas, na instância 17.

Tabela 16 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 08 e 17

Empresa	Caminhões com carga desta empresa												
1	2	3	4	7	11	12	13	16	18	19	22	23	26
2	1	5	6	8	9	10	14	15	17	20	21	24	25

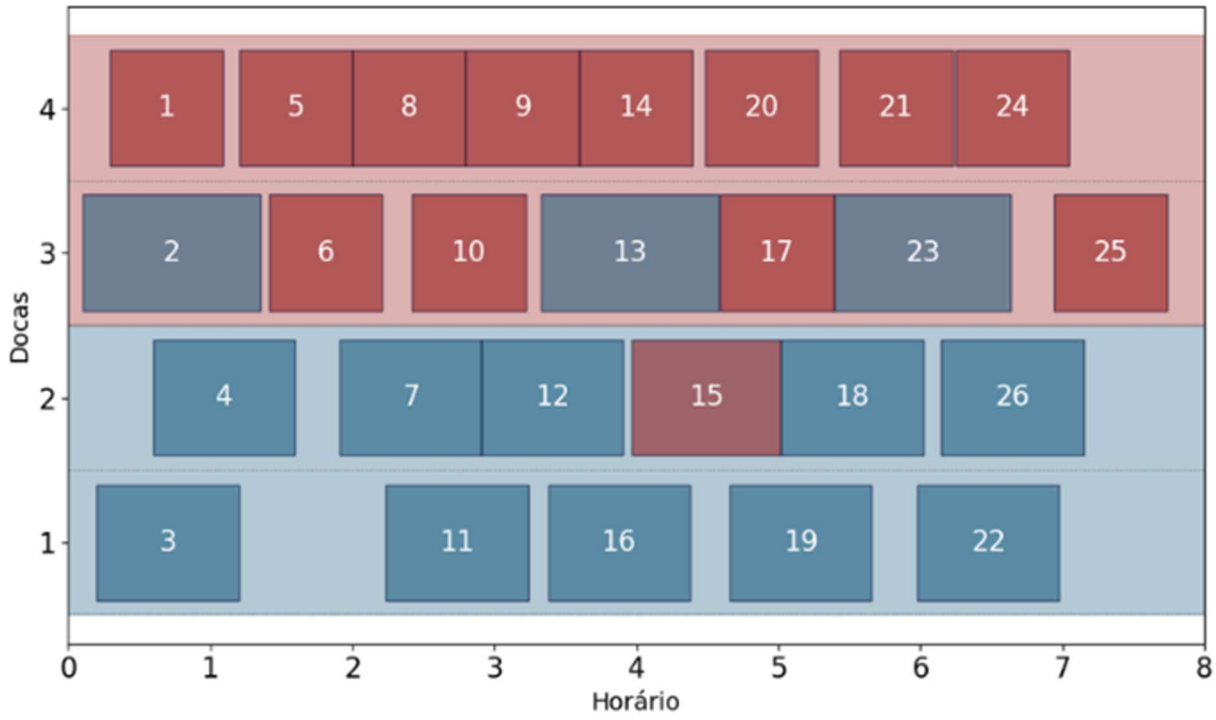
Fonte: Autora (2025).

Figura 23 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 08 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

Figura 24 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 17 pelo CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

Por fim, a Tabela 17 mostra a distribuição dos caminhões para as 3 empresas com operação a serem analisadas nas instâncias 09 (Doca-Fixa) e 18 (Doca-Flexível).

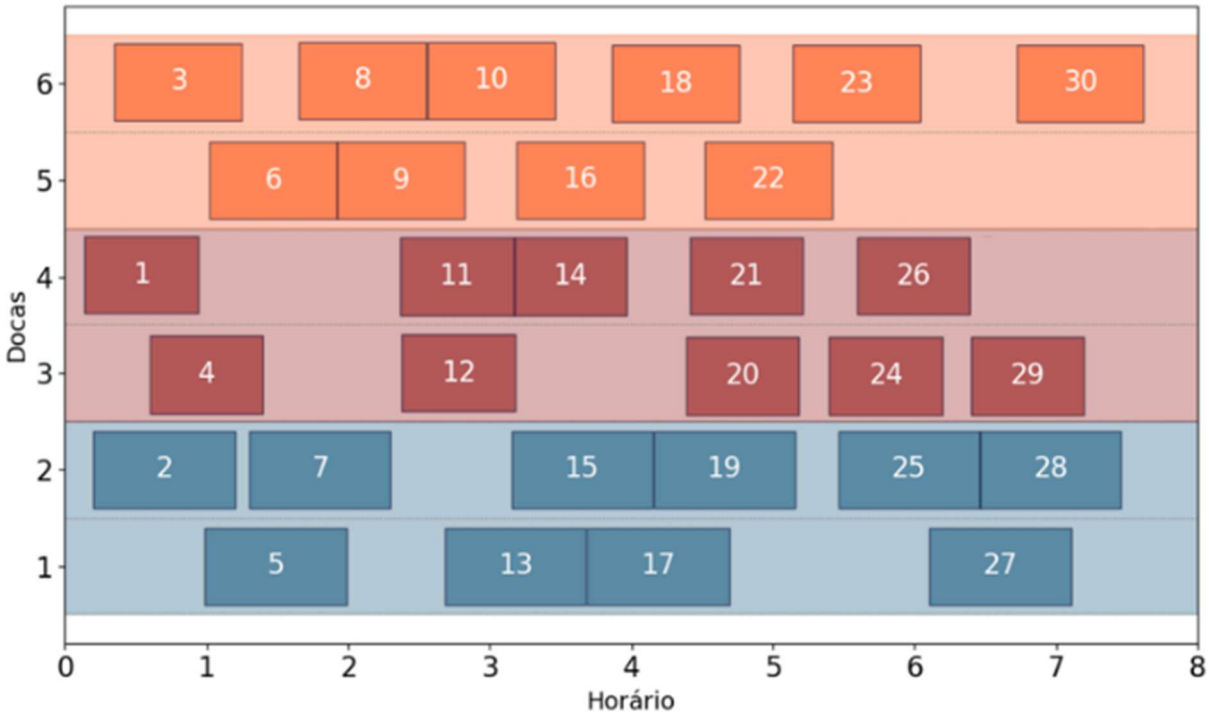
Enquanto no cenário Doca-Flexível (Figura 26) o tempo de permanência dos caminhões foi de 28,17 horas no total, no cenário Doca-Fixa (Figura 25) esse tempo foi de 28,39 horas. O cenário Doca-Flexível apresenta alteração na alocação de docas para os caminhões 8, 12, 15 e 28 se comparado ao cenário Doca-Fixa.

Tabela 17 - Relação entre as Empresas e Caminhões das Instâncias 09 e 18

Empresa	Caminhões com carga desta Empresa									
1	2	5	7	13	15	17	19	25	27	28
2	1	4	11	12	14	20	21	24	26	29
3	3	6	8	9	10	16	18	22	23	30

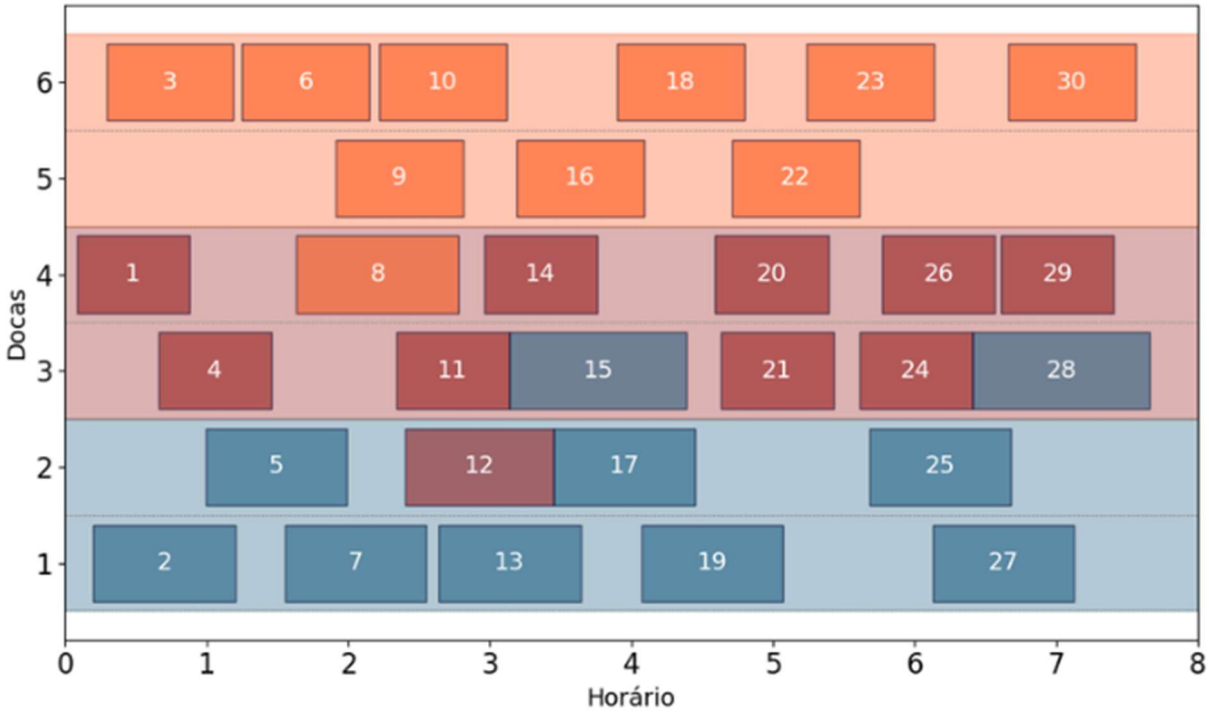
Fonte: Autora (2025).

Figura 25 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 09 pelo CPLEX (Doca-Fixa)



Fonte: Autora (2025).

Figura 26 - Resultado da ocupação das docas para a Instância 18 pelo CPLEX (Doca-Flexível)



Fonte: Autora (2025).

Após comparação das instâncias apresentadas acima e a redução no tempo de permanência total de operação dos caminhões nos cenários Doca-Flexível, em comparação aos cenários Doca-Fixa, comprova-se a aplicabilidade do modelo em CDs compartilhados. A vantagem nos resultados das instâncias no cenário Doca-Flexível é dada pela definição da alocação de docas a caminhões que não seria facilmente identificada pelo planejador sem o auxílio do modelo matemático proposto. A aplicação do modelo no cenário Doca-Flexível traz vantagens ao CD compartilhado que pode utilizar a redução no tempo de permanência dos caminhões para chamar atenção de novas empresas que tenham interesse em alugar parte das áreas disponibilizadas para armazenagem de cargas.

Os resultados dados pela variação do número de caminhões a operarem no CD indicou que a redução no tempo de permanência em cenários Doca-Flexível, se comparados aos cenários Doca-Fixa, não é proporcional ao número de caminhões a operarem no dia. A alocação de docas é dada pela particularidade de cada instância, como o tempo de chegada dos caminhões, número de docas disponíveis para uma mesma quantidade de caminhão, definição do horizonte de planejamento,

caso o CD opere em mais tempo e definição do tempo máximo de espera por caminhão. As instâncias 01 (Doca-Fixa) e 10 (Doca-Flexível) foram as únicas que não apresentaram redução no tempo de operação para comparação de cenários. As instâncias 05 (Doca-Fixa) e 14 (Doca-Flexível) apresentaram maior redução no tempo de permanência dos caminhões, de 1,2 horas.

Apesar dos resultados apresentarem menor tempo de permanência para os cenários Doca-Flexível, o planejador deve considerar outras influências na operação, como por exemplo, possíveis perdas em materiais por maior manuseio. Assim, a ferramenta auxilia o melhor aproveitamento das docas disponibilizadas, mas não descartam a necessidade da capacidade técnica e analítica do usuário.

7 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como foco a comparação de sistemas de operação em CDs compartilhados, alugando ou não as docas às empresas com áreas destinadas a armazenagem no local. Para isso, o tempo de permanência dos caminhões no local foi dado como indicador para avaliação do desempenho de cada sistema. Para isso, foi proposto um modelo matemático baseado no MD-CVRP, cuja abordagem consiste na analogia dos depósitos sendo as docas fixas em um CD e os caminhões sendo os clientes com demanda equivalente ao tempo de operação. Esse estudo buscou minimizar a soma do tempo de espera e o tempo de operação dos caminhões ao alocar as docas disponíveis de forma eficiente, sem violar as restrições de tempo impostas. A otimização da Função Objetivo, descrita no capítulo 5, resultou na definição da sequência de atendimento dos caminhões em cada doca, bem como no tempo destinado à espera e à operação de cada veículo.

Foram aplicadas 18 instâncias ao modelo matemático proposto, sendo 9 para o Cenário Doca-Fixa e 9 para o Cenário Doca-Flexível. A relação entre os cenários, descrita na Tabela 2 possibilita comparação de instâncias. O resultado para tempo de permanência dos caminhões nos cenários Doca-Flexível são menores, se comparados aos cenários Doca-Flexível para quase todo conjunto de instância apresentado na Tabela 2, exceto nas instâncias 01 (Doca-Fixa) e 10 (Doca-Flexível). As instâncias 05 (Doca-Fixa) e 14 (Doca-Flexível) apresentaram maior redução no tempo de permanência dos caminhões, de 1,2 horas.

Embora grande parte do referencial bibliográfico seja adequado às meta-heurísticas, a utilização do *solver* CPLEX para encontrar os resultados da Função Objetivo foi viável em relação ao tempo necessário para execução da otimização no computador. Todas as instâncias chegaram no valor ótimo da Função Objetivo. A instância que mais necessitou de tempo para execução no *solver* CPLEX foi a instância 12, dada por 12 minutos.

A visualização dos resultados, estruturados por código em Python, auxilia a análise e visualização da alocação das docas aos caminhões para operação. Ao combinar a aplicação do modelo matemático proposto e processamento visual, a aplicação em centros de distribuição compartilhados auxilia o planejador ao reduzir o tempo de

permanência dos caminhões no local. A redução nesse tempo pode ser utilizada como acordo comercial para atrair novas empresas a alugarem áreas de armazenagem, contribuindo com a produtividade do centro de distribuição compartilhado.

Apesar dos resultados indicarem melhor eficiência em sistemas cujas docas não são alugadas, a ferramenta deve ser utilizada pelo planejador capaz de avaliar demais influências na operação, como a disponibilidade de máquinas em cada doca, funcionários dedicados e possível perda de material pelo aumento do tempo de manuseio da carga.

7.1 PESQUISAS FUTURAS

Ainda que a análise e aplicação do modelo matemático tenha sido em CDs compartilhados, o modelo pode ser adaptado para diferentes *layouts* em armazéns. Dessa forma, recomenda-se a abordagens heurísticas para possibilitar análise de instâncias maiores. Sugere-se aumentar o tempo de operação para CDs que operem em diferentes tempos de operação, diversificando os tempos de carga ou descarga e suas particularidades. Outra abordagem é a restrição de acesso dos caminhões em cada doca, incluindo a particularidade de cada carga. Isso pode ser realizado por meio da redução do tempo de operação em docas com equipamentos dedicados que acelerem a operação.

Por fim, recomenda-se realizar uma análise de sensibilidade, variando o acréscimo no tempo de operação em cada doca. Essa abordagem permitirá observar como melhorias no centro de distribuição, como aumento de mão de obra dedicada a operação, poderiam alterar a eficiência operacional, especialmente em processos de carga e/ou descarga em locais distantes da área destinada a armazenagem.

REFERÊNCIAS

BOYSEN, N. (2010). *Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals. Computers & Operations Research*, 37(1), 32–41. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.COR.2009.03.010. Acesso em:24 jan. 2025.

BRAEKERS, K.; RAMAEKERS, K.; NIEUWENHUYSE, I. V*. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. Computers & Industrial Engineering, Elsevier* BV, v. 99, p. 300–313, set. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007. Acesso em: 20 jan. 2025.

GNANAPRAGASAM, S. R.; DAUNDASEKERA, W. B. *An optimization model for the hard time windows vehicle routing problem with moving shipments at the cross dock center*. OUSL Journal, v. 18, n. 1, p. 33-60, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.4038/ouslj.v18i1.7569. Acesso em: 24 jan. 2025.

GELAREH, S., MONEMI, R. N., SEMET, F., & Goncalves, G. (2016). A branch-and-cut algorithm for the truck dock assignment problem with operational time constraints. European Journal of Operational Research, 249(3), 1144–1152. doi:10.1016/j.ejor.2015.09.049. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.049. Acesso em: 20 jan. 2025

IWAN, S. et al. *Efficiency of light electric vehicles in last mile deliveries - Szczecin case study. Sustainable Cities and Society, Elsevier* BV, v. 74, p. 103167, nov. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103167. Acesso em: 15 de fev. de 2025.

KUMAR, S. N.; PANNEERSELVAM*, R. A survey on the vehicle routing problem and its variants. Intelligent Information Management, Scientific Research Publishing*, v. 4, n. 3, p. 66–74, 2012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.4236/iim.2012.43010. Acesso em: 08 jan. 2025.

LADIER, A.-L., & Alpan, G. (2014). *Crossdock truck scheduling with time windows: earliness, tardiness and storage policies. Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 569–583.Disponível em: doi:10.1007/s10845-014-1014-4. Acesso em: 29 dez. 2024.

MARIANTE, E.; ROMANEL, C.; COSTA, F. L. C. M.. Uma proposta de critérios de implantação de condomínio logístico para a cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017. 76p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/32446/32446.PDF

MIAO, Z., LIM, A., & MA, H. (2009*). Truck dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks. European Journal of Operational Research*, 192(1), 105–115.Disponível em: doi:10.1016/j.ejor.2007.09.031. Acesso em: 15 fev. 2025.

MONEMI, N. R., & GELAREH, S. (2023). *Dock Assignment and Truck Scheduling Problem: Consideration of Multiple Scenarios with Resource Allocation Constraints*. Computers & Operations Research, Volume 151, March 2023, 106074. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106074. Acesso em: 26 jan. 2025.

MONTOYA-TORRES, J. R., LÓPEZ FRANCO, J., NIETO ISAZA, S., FELIXXOLA JIMÉNEZ, H., & HERAZO-PADILLA, N. (2015). *A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. Computers & Industrial Engineering*, 79, 115–129. Disponível em: doi:10.1016/j.cie.2014.10.029. Acesso em: 26 jan. 2025.

SNOECK, A.; WINKENBACH, M. *The value of physical distribution flexibility in serving dense and uncertain urban markets. Transportation Research Part A: Policy and Pratice, Elsevier* BV, v. 136, p. 152-177, jun 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.011>. Acesso em: 03 de jan. de 2025.

TADUMADZE, G., BOYSEN, N., EMDE, S., & WEIDINGER, F. (2019). *Integrated truck and workforce scheduling to accelerate the unloading of trucks. European Journal of Operational Research*, 278(1), 343–362. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2019.04.024. Acesso em: 30 dez. 2024

TOLKIEN, J. R. R. *O Senhor dos Anéis: A Sociedade do Anel*. Tradução de Lenita Maria Rímoli Esteves e Almiro Pisetta. 2. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1994

VAN BELLE, J.; P. VALCKENAERS e D. CATTRYSSE (2012). *Cross-Dock-ing: State of the Art. Omega,* v. 40, p. 827-846. Disponível em: DOI: 10.1016/j.omega.2012.01.005. Acesso em: 15 fev. 2025.

WOLFF, P., Emde, S., & Pfohl, H. C. (2021). *Internal resource requirements: The better performance metric for truck scheduling? Omega*, 103, 102431. Disponível em; https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2021.102431. Acesso em: 03 de jan. de 2025.

ZISSIS, D.; AKTAS, E.; BOURLAKIS, M. Collaboration in urban distribution of online grocery orders. International Journal of Logistics Management, v. 29, n. 4, p. 1196–1214, 2018.

APÊNDICE A - ARQUIVO .MOD DO MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO PELO CPLEX

```
// PARAMETROS GERAIS

// horizonte de tempo em horas

int hp = ...;

// parametro com valor elevado

float M = ...;

// numero de docas

int nd = ...;

// numero de caminhoes

int nc = ...;

// CONJUNTOS

range DR = 1 .. nd;

range NC = (nd+1) .. (nd+nc); //tirei o +1

// nao usado range DV = (nd+nc+1) .. (2 * nd + nc);

range DCV = (nd+1) .. (2 * nd + nc);

range DCR = 1 .. (nd+nc);

range DT = 1 .. (2 * nd + nc);

//tempo de operacao

float t[i in NC , k in DR] = ...;

// horario de chegada (eta)

float a[i in NC] = ...;

//limite horario superior estacionamento

float b[i in NC]=...;
```

```
//tempo extra de operacao fora da doca

float ca[i in NC , k in DR] = ...;

// Variaveis Decisoes

//= 1, se o caminhao j e atendido apos o caminhao i na doca k

dvar boolean x[i in DT][j in DT][k in DR];

//hora de estacionamento do caminhao i na doca k

dvar float T[i in NC][k in DR];

// FUNCAO OBJETIVO (FO)

//Minimizar (momento de estacionamento do caminhão + tempo de operacao do caminhão + adicional do tempo pela distancia da area de armazenagem  - momento de chegada do caminhao)

minimize

    (sum(i in NC, k in DR) (T[i, k] + ((ca[i,k] - a[i])*sum(j in DCV) x[i,j,k])));

// RESTRICOES CONDOMINIO_LOGISTICO

subject to

{

//Garante que cada caminhao i e atendido por apenas uma doca.

forall (i in NC) {

   const02: sum(k in DR) ((sum(j in NC) x[i][j][k]) + x[i][k + nc + nd][k]) == 1;}

// vai da doca real para apenas uma doca virtual ou para um caminhao

        forall (k in DR) {

          const03: (sum(j in NC) x[k][j][k]) + x[k][k + nc + nd][k] == 1;}

//em cada doca ou atende um caminhao ou vai direto para o virtual

        forall (k in DR) {
```

```
        const04: (sum(i in NC) x[i][k + nc + nd][k]) + x[k][k + nc + nd][k] == 1;}
// cada no e atendido uma unica vez em uma unica doca
      forall (k in DR) {
        const05: sum(ka in DR,i in DCR) x[i][k + nc + nd][ka] == 1;}
//ninguem sai do virtual
      forall (k in DR) {
        const06: (sum(i in NC) x[k + nc + nd][i][k]) + x[k + nc + nd][k][k] == 0;}
 //ninguem chega no real
      forall (k in DR) {
        const07: (sum(i in NC) x[i][k][k]) + x[k + nc + nd][k][k] == 0;}
//A equacao garante a conservacao do fluxo
      forall (k in DR, h in NC) {
const08: ((sum(j in NC) x[h][j][k]) + x[h][k + nc + nd][k]) - ((sum(i in NC) x[i][h][k]) +
x[k][h][k]) == 0;}
//Garante continuidade do tempo
      forall (k in DR, i in NC, j in NC) {
        const09: T[j][k]  >= T[i][k] + (t[i][k] + ca[i,k])* x[i,j,k] - ((1 - x[i][j][k]) * M);}
//Garante o horario de chegada do caminhao i seja antes de seu estacionamento
      forall (k in DR, i in NC) {
        const10: T[i][k]  >= a[i] * (sum(j in DCV) x[i][j][k]);}
// Limite superior maximo para tempo de atendimento do caminhao
      forall (k in DR, i in NC) {
        const11: T[i][k]  <= b[i] * (sum(j in DCV) x[i][j][k]);}
// Garante que o horario de chegada seja menor que o horizonte de planejamento
```

```
        forall (k in DR, i in NC) {
          const12: T[i][k]  <= (hp-t[i,k]) * (sum(j in DCV) x[i][j][k]);}
// condicionante para x ser 1 ou 0
        forall (k in DR, i in DT, j in DT) {
          const13: 0 <= x[i][j][k] <= 1;}
// O tempo de operacao nao pode ser negativo
        forall (k in DR, i in NC) {
          const14: T[i][k] >= 0;}
}
```

APÊNDICE B - O CÓDIGO EM PYTHON DESENVOLVIDO PARA GERAÇÃO DAS IMAGENS DE RESULTADO TENDO COMO INPUT OS DADOS DE SAÍDA DO CPLEX

```
# %%

import matplotlib.pyplot as plt

import pandas as pd

import math

# %% [markdown]

# ## ENTRADA DA DADOS E FORMACAO DA TABELA UNIFICADA

# %%

#DADOS

num_docas = 10

num_caminhoes = 50

num_empresas = 5

num_doca_por_empresa = int(num_docas / num_empresas)

pasta_dados = "caminho_do_arquivo"

cores_empresas = ["#8B0000","#FF4500","#EEAD2D","#3CB371","#00CED1"] # Precisa ter dimensao de num_empresas

# %% [markdown]

# ## Código

# %%

#LEITURA DOS DADOS

a = pd.read_csv(pasta_dados+"/a.csv")

ca = pd.read_csv(pasta_dados+"/ca.csv")

T = pd.read_csv(pasta_dados+"/T.csv")
```

```
t = pd.read_csv(pasta_dados+"/to.csv")

x = pd.read_csv(pasta_dados+"/x.csv")

# %%

#PROCESSA OS DADOS

caminhoes = a

#DESCOBRIR HORA DE ESTACIONAMENTO

#adiciona coluna hora estaciona e doca para todo caminhao,

caminhoes["horaestaciona"] = float(0)

caminhoes["doca"] = int(0)

for i in range (len(caminhoes.index)):

    horas_estacionamento = list(T.iloc[i].values.flatten().tolist())

    estaciona = max(horas_estacionamento)                    #pega a hora que
cada caminhao estacionou

    doca = horas_estacionamento.index(estaciona)              #pega o indie da
doca que ele estacionou (maior valor do T)

    caminhoes.loc[i, "horaestaciona"] = estaciona             #atribui a hora que
estaciona na tabela

    caminhoes.loc[i,"doca"] = int(doca + 1)                   #indice da doca + 1

# %%

#HORA DE SAIDA DE CADA CAMINHAO

#adiciona coluna horadaida para todo caminhao

caminhoes["horasaida"] = float(0)

for i in range (len(caminhoes.index)):

    caminhao =  caminhoes.loc[i]

    tempo_operacao = list(t.iloc[i].values.flatten().tolist())
```

```
    tempo_adicional = list(ca.iloc[i].values.flatten().tolist())
        permanencia = tempo_operacao[int(caminhao["doca"] - 1)] + tempo_adicional[int(caminhao["doca"] - 1)]
    saida = caminhao["horaestaciona"] + permanencia
    caminhoes.loc[i, "horasaida"] = saida
# %%
# TEMPO DE ESPERA
caminhoes["tempoespera"] = caminhoes["horaestaciona"] - caminhoes["horachegada"]
# Somando tempo de espera
esperatotal = sum(caminhoes["tempoespera"])
# CALCULANDO O TEMPO OCIOSO
#tempo_total = caminhoes["horasaida"].max()
tempo_total = 9
# Inicializando um dicionário para armazenar o tempo ocupado por cada doca
tempo_doca_ocupada = {doca: 0 for doca in range(1, num_docas + 1)}
# Calculando o tempo ocupado por cada doca
for doca in range(1, num_docas + 1):
    # Filtrando os caminhões que ocuparam a doca atual
    ocupacoes = caminhoes[caminhoes["doca"] == doca]
    for _, caminhao in ocupacoes.iterrows():
        tempo_doca_ocupada [doca] += caminhao["horasaida"] - caminhao["horaestaciona"]
# Calculando o tempo ocioso para cada doca
```

```
tempo_ocioso_por_doca = {doca: tempo_total - ocupado for doca, ocupado in tempo_doca_ocupada.items()}

# Calculando a taxa de ociosidade para cada doca

taxa_ociosidade_por_doca = {doca: ocioso / tempo_total for doca, ocioso in tempo_ocioso_por_doca.items()}

#print("Tempo ocioso por doca:", tempo_ocioso_por_doca)

#print("Taxa de ociosidade por doca:", {doca: f"{taxa:.2%}" for doca, taxa in taxa_ociosidade_por_doca.items()})

# %%

# EMPRESA DE CADA CAMINHAO (CELULA)

caminhoes["celula"] = int(0)

for i in range (len(caminhoes.index)):

    horas_estacionamento = list(ca.iloc[i].values.flatten().tolist())

        posicao_celula = math.ceil((horas_estacionamento.index(0) + 1) / num_doca_por_empresa )

    #posicao_celula = (horas_estacionamento.index(0) % num_empresas) + 1

    caminhoes.loc[i,"celula"]= posicao_celula

# %% [markdown]

# ## MONTANDO GRAFICO DE BARRAS

# %%

# Criando a figura e o eixo para o grafico

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))

# Vetor de cores para as docas

cor_docas = ['#FFD700', '#FF5733', '#33FF57', '#3498DB', '#9B59B6', '#E74C3C']

# Pintando o fundo a cada 2 docas
```

```
k = 0

#for i in range(1, num_docas + 1, num_empresas):  # Comeca da doca 1 e vai até 6 pulando 2 docas por vez

for i in range(1, num_docas + 1, num_doca_por_empresa):  # Comeca da doca 1 e vai até 6 pulando 2 docas por vez

    ax.axhspan(i - 0.5, i + 1.5, color= cores_empresas[k % len(cor_docas)], alpha=0.3)

    k += 1

# Fazendo as barras dos caminhoes

for i in range (len(caminhoes.index)):

    caminhao =  caminhoes.loc[i]

     ax.barh(caminhao["doca"]  ,caminhao["horasaida"]  -  caminhao["horaestaciona"], left = caminhao["horaestaciona"], height = 0.8, color = cores_empresas[int(caminhao["celula"]) - 1],

            edgecolor= "#00002d50", alpha = 0.5)

# -1  na cor para pegar a  posicao comecando do zero

#  Adicionando numeracao aos caminhoes

# containers sao as barras (caminhoes)

for i in range(len(caminhoes.index)):

      ax.bar_label(ax.containers[i],  labels  =  [caminhoes.loc[i,"caminh"]-num_docas], label_type='center', color='white')

# Adicionando divisões dentro de cada doca

for doca in range(1, num_docas + 1):  # Para cada doca

    y_pos = doca - 0.5  # Posição da linha horizontal

    ax.axhline(y=y_pos, color="gray", linestyle="--", linewidth=0.5)  # Linha divisória

# Definindo as marcas e os rótulos no eixo y
```

```
ax.set_yticks(range(1, num_docas + 1))  # Marcas no eixo y

ax.set_yticklabels([i for i in range(1, num_docas + 1)])  # Rótulos

ax.set_xlim(0 , tempo_total)

# Ajustando o layout e exibindo o gráfico

plt.xlabel("Horário")# leganda do eixo x

plt.ylabel("Docas")  # legenda do eixo y

plt.title("")  #título gráfico

plt.tight_layout()

plt.show()

# PRINTANDO TEMPO DE ESPERA TOTAL

print(f"Tempo de espera: {round(esperatotal,2)} horas\n")

print("Tempo ocioso por doca:", {doca: f"{taxa:.2f}" for doca, taxa in tempo_ocioso_por_doca.items()}, "\n")

print("Taxa de ociosidade por doca:", {doca: f"{taxa:.2%}" for doca, taxa in taxa_ociosidade_por_doca.items()}, "\n")

# TABELA COM OS RESULTADOS

print(caminhoes)
```