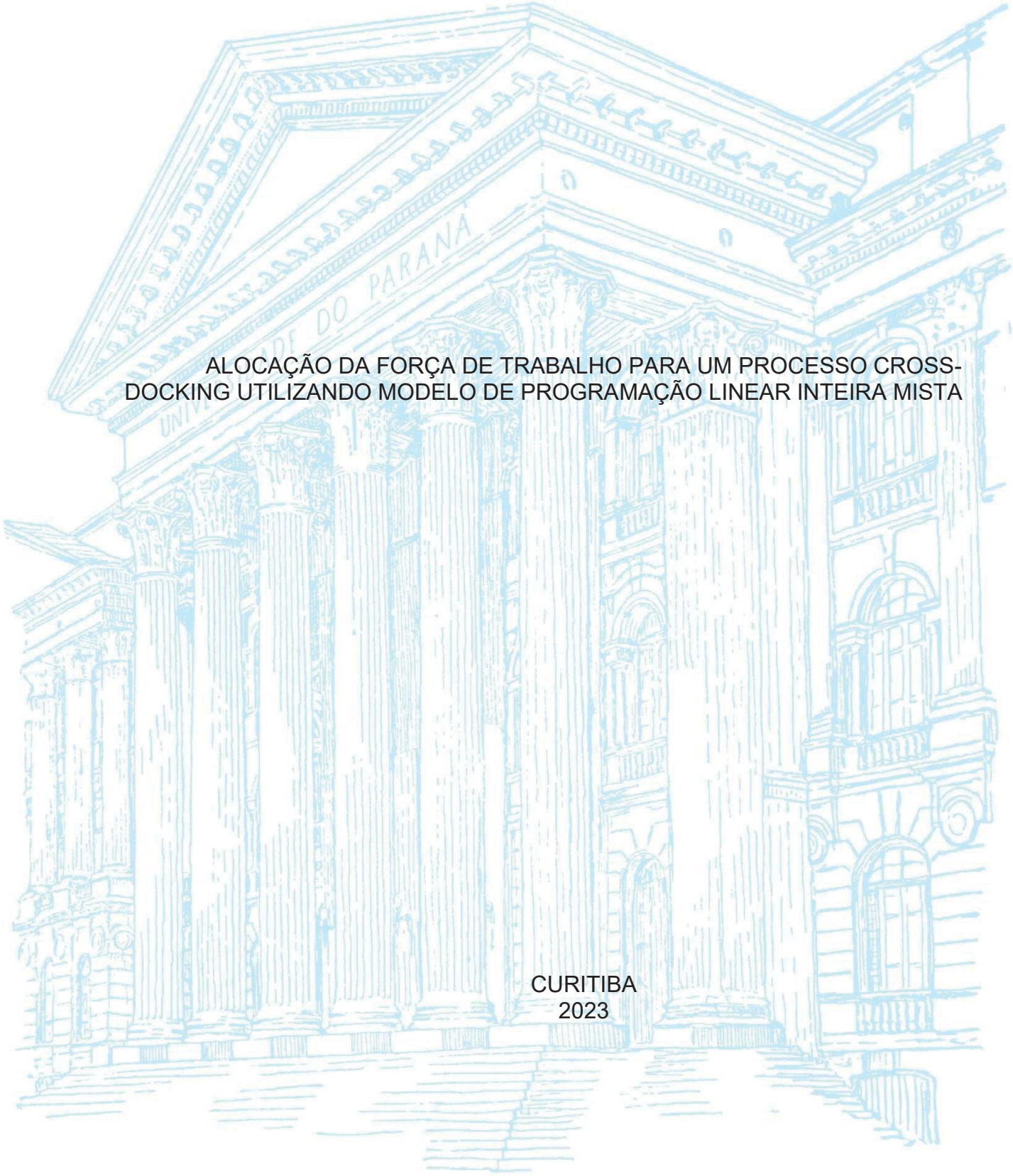
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EMMANUEL BOMFIM DEMARCH



# ALOCAÇÃO DA FORÇA DE TRABALHO PARA UM PROCESSO CROSS-DOCKING UTILIZANDO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA

CURITIBA
2023

EMMANUEL BOMFIM DEMARCH

# ALOCAÇÃO DA FORÇA DE TRABALHO PARA UM PROCESSO CROSS-DOCKING UTILIZANDO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA

Dissertação apresentada como requisito à obtenção de grau de Mestre em Gestão de Organizações, Liderança e Decisão, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA
2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

Demarch, Emmanuel Bomfim
Alocação da força de trabalho para um processo *cross-docking* utilizando modelo de programação linear inteira mista / Emmanuel Bomfim Demarch. – Curitiba, 2023.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Gestão de Organizações, Liderança e Decisão.
Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin.

1. Força de trabalho - Planejamento. 2. Distribuição de mercadorias. 3. Sequenciamento de veículos. 4. Programação linear. I. Scarpin, Cassius Tadeu. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Gestão de Organizações, Liderança e Decisão. III. Título.

Bibliotecária: Maria Lidiane Herculano Graciosa CRB-9/2008

# TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GESTÃO DE ORGANIZAÇÕES, LIDERANÇA E DECISÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **EMMANUEL BOMFIM DEMARCH** intitulada: **ALOCAÇÃO DA FORÇA DE TRABALHO PARA UM PROCESSO CROSS-DOCKING UTILIZANDO MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA**, sob orientação do Prof. Dr. CASSIUS

TADEU SCARPIN, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Maio de 2023.

Assinatura Eletrônica
12/06/2023 12:30:59.0
CASSIUS TADEU SCARPIN
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
20/06/2023 14:27:44.0
JOSÉ EDUARDO PÉCORA JUNIOR
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
12/06/2023 13:44:32.0
TALITA MARIANA PINHO SCHIMIDT
Avaliador Externo (null)


Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 291339
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp
e insira o codigo 291339

## RESUMO

O *cross-docking* é uma estratégia utilizada por gestores dentro dos centros de distribuição (CD) que visa reduzir o tempo que os produtos permanecem ali parados. Esta estratégia visa transferir os produtos que são descarregados no setor de recebimento diretamente para o setor de expedição, reduzindo ao máximo o tempo dos produtos em estoque e a quantidade de operações de manuseio interno. Dentro deste processo, a etapa de descarregamento dos veículos influencia diretamente a estratégia de *cross-docking*. Para a realização desta etapa é necessário alocar, da melhor maneira possível, os operadores disponíveis no centro de distribuição para cada um dos veículos. A alocação dos operadores é diretamente ligada ao Problema de Agendamento de Veículos. O problema de agendamento é uma alternativa para os gestores dos CDs decidirem quando e onde um veículo deve ser descarregado e/ou carregado. Entretanto, parte predominante das pesquisas não considera a força de trabalho. Dentro da estratégia de *cross-docking* na indústria, a alocação da força de trabalho é uma decisão importante devido ao seu impacto no prazo de entrega e custos. Desta forma, a proposta desta pesquisa foi criar uma alternativa para o Problema de Alocação da Força de Trabalho de uma mão de obra disponível e conhecida para as atividades relacionadas ao *cross-docking*. O objetivo foi criar um modelo matemático que visa distribuir da melhor maneira os operadores disponíveis para cada um dos veículos, com o objetivo de reduzir o tempo total de descarregamento. Para cumprir este objetivo, foi proposto um modelo de programação inteira mista (PLIM), utilizando a linguagem C# e o software GUROBI. Os resultados indicam que a redução da quantidade disponível de operadores pode influenciar o processo de descarga mais do que a quantidade de veículos ou docas. Ainda, o modelo elaborado é uma alternativa para gestores alocarem a força de trabalho e melhorar a eficiência das atividades de *cross-docking.*



**Palavras-chave:** Alocação. Força de Trabalho. *cross-docking*. Sequenciamento de Veículos. Programação Linear Inteira Mista.

## ABSTRACT

Cross-docking is a strategy used by distribution centers managers that aims to reduce the time that products are held. This strategy transfers the products that are unloaded in the receiving area directly to the shipping area, reducing the time of the products in inventory and the quantity of internal handling tasks. Within this process, the vehicle unloading steps, influence directly the cross-docking strategy. For the unloading step it is necessary to allocate, in the best way possible, the available operators in the distribution center for each of the vehicles. The allocation of operators is connected to the Vehicle Scheduling Problem. The scheduling problem has been widely explored by researchers as it helps managers to understand when and where a vehicle should be (un)loaded. However, a predominant part of the research don´t consider the workforce as a constraint. Workforce allocation is an important decision for cross-docking strategy in industry because impact on delivery time and costs. Thus, the proposal of this research was to perform a study on the Workforce Allocation Problem of an available and known workforce for cross-docking activities. The objective was to propose a mathematical model that aims to best distribute these workers to each of the vehicles, to reduce the total processing time of the available tasks. To accomplish this goal, a mixed integer programming model (PLIM) was proposed, using the C# language and the GUROBI software. The results indicate that varying the quantity of operators is more computationally hard compared to docks or vehicles. Also, for managers it is a new method to allocate the workforce and improves the efficiency of cross-docking activities.



**Keywords:** allocation. workforce scheduling. *cross-docking*. Vehicle scheduling. linear programming.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 — ETAPAS DO PROCESSO DE DESCARGA DE UM VEÍCULO .....20
FIGURA 2 — COMPARAÇÃO DE MAKESPAN.....22
FIGURA 3 — ALOCAÇÃO DA FORÇA DE TRABALHO CTOTAL (4 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 10 OPERADORES) .....26
FIGURA 4 — ALOCAÇÃO DA FORÇA DE TRABALHO CMÁX (4 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 10 OPERADORES) .....26
FIGURA 5 — ALOCAÇÃO DE 4 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 16 OPERADORES (INSTÂNCIA 37).....37
FIGURA 6 — ALOCAÇÃO DE 8 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 32 OPERADORES (INSTÂNCIA 38).....37
FIGURA 7 — ALOCAÇÃO DE 8 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 16 OPERADORES .....38

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 — PARÂMETROS DE VEÍCULOS PARA PROCESSAMENTO.....21
TABELA 2 — SEQUÊNCIAMENTO DE VEÍCULOS .....25
TABELA 3 — TAMANHO DAS INSTÂNCIAS .....32
TABELA 4 — MODOS DE TRABALHO .....33
TABELA 5 — INSTÂNCIAS PARA TESTE DA DISPONIBILIDADE DE OPERADORES .....33
TABELA 6 — INSTÂNCIAS PARA TESTE DA DISPONIBILIDADE DE VEÍCULOS 34
TABELA 7 — INSTÂNCIAS PARA TESTE DA DISPONIBILIDADE DE DOCAS.....34
TABELA 8 — RESULTADO DA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE OPERADORES .....35
TABELA 9 — RESULTADO DA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE VEÍCULOS .....36
TABELA 10 — RESULTADO DA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE DOCAS.....38

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO ..... 10**
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO ..... 12
1.1.1 Objetivo Geral ..... 12
1.1.2 Objetivos Específicos ..... 12
1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO ..... 13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO ..... 13
**2 REVISÃO DA LITERATURA ..... 14**
2.1 O SEQUENCIAMENTO DE VEÍCULO E A FORÇA DE TRABALHO ..... 14
**3 METODOLOGIA ..... 25**
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ..... 25
3.2 MODELO MATEMÁTICO ..... 28
**4 TESTES COMPUTACIONAIS ..... 32**
4.1 GERAÇÃO DE CENÁRIOS ..... 32
4.1.1 Teste de disponibilidade de operadores ..... 35
4.1.2 Teste de quantidade de veículos ..... 36
4.1.3 Teste de quantidade de docas ..... 37
**5 CONCLUSÃO ..... 39**
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 41**

# 1 INTRODUÇÃO

Para padronizar e facilitar o entendimento, nesta pesquisa foi considerado que o Centro de distribuição (CD) ou terminal *cross-dock* (TCD) são expressões que definem o local que o produto é descarregado, manuseado, armazenado e carregado em outro veículo. Dentro do centro de distribuição há docas e estas recebem veículos para descarregamento e carregamento. O primeiro tipo de veículo pode ser chamado de veículo de descarregamento, recebimento ou veículo de entrada. O segundo tipo de veículo pode ser chamado de veículo de carregamento, expedição ou veículos de saída. O tempo entre o momento que os produtos saem dos veículos de entrada e vão até os veículos de saída é chamado de transbordo. A força de trabalho ou número de funcionários/operários são o que movimentam os produtos dentro do TCD.

A logística é um aglomerado de atividades (transportes, controle de estoques etc.) que se repetem inúmeras vezes ao longo do canal pelo qual matérias-primas passam, agregando valor ao consumidor (Ballou, 2004). O maior desafio da logística é oferecer um nível de serviço adequado por um custo que o cliente esteja disposto a pagar.

Um centro de distribuição pode auxiliar nesta redução de custos, pois é um elo da cadeia logística onde as mercadorias são recebidas de diversas origens e são consolidadas ou separadas conforme seus destinos (Liao *et al*., 2013). Os CDs são importantes na cadeia de suprimentos pois desempenham funções valiosas que colaboram com o movimento dos materiais. Dentre estas funções estão o armazenamento de mercadorias, transporte interno de produtos, consolidação de cargas para o transporte de produtos, criação de sortimentos e montagem de remessas (Higginson & Bookbinder, 2005).

O *cross-docking* é uma estratégia que tem como objetivo melhorar a eficiência do centro de distribuição. O principal objetivo desta estratégia é transferir de maneira ágil os produtos dentro do CD. Quando um ou mais veículos chegam para descarregar no setor de recebimento, os produtos transferidos para o centro de distribuição, são movidos diretamente para o setor de expedição, onde são destinados para serem

carregados em outros veículos para saírem o mais breve possível. Deste jeito, evita-se estoques e reduz o tempo que o produto permanece no CD (Boysen, 2010).

Van Belle *et al*., (2012) classificou os estudos de *cross-docking* em três diferentes abordagens: estratégica, tática e operacional. A parte estratégica é relacionada a decisões de longo prazo e decidido durante o processo de planejamento da cadeia logística, como a criação de um novo centro de distribuição ou o seu design. Após decidido a parte estratégica, vem as decisões táticas. Estas, decidem qual o fluxo que os produtos devem seguir durante o processo da cadeia logística. O estudo de fluxo de produtos não se limita necessariamente a um centro de distribuição, mas a toda a cadeia logística.

A decisão dentro deste nível é encontrar o melhor fluxo que os produtos devem seguir, respeitando as capacidades, custos e outros fatores dentro de um ou mais centros de distribuição que utilizam o *cross-docking*. A última parte, a operacional, é relacionada a decisões de curto prazo como: roteirização, sequenciamento de veículos, alocação de recursos, custos com fretes, entre outros. Estes problemas são decisões de curto prazo e podem afetar diretamente o custo e a qualidade da entrega. Dentre os três modelos de decisões apresentados, até 2008, o menos explorado foi a de escopo operacional (Yu & Egbelu, 2008). O Problema de Agendamento de Veículos (PAV) se enquadra dentro deste escopo e uma das primeiras pesquisas realizadas neste problema foi o de Yu & Egbelu, (2008).

O Problema de Alocação da Força de Trabalho (PAFT) está diretamente ligado ao Problema de Agendamento de Veículos. O objetivo do PAV é reduzir o tempo que um produto fica no centro de distribuição, a quantidade de manuseio que um produto sofre dentro dele e a distância total percorrida pelos trabalhadores (Ladier & Alpan, 2016). O objetivo do PAFT é alocar da melhor maneira possível a quantidade disponível de operadores, reduzindo o custo da mão de obra e o tempo de processamento das atividades de carga ou descarga. Entretanto, parte dos estudos do Problema de Agendamento de Veículos negligenciam a alocação da força de trabalho para o processamento dos veículos (Wolff *et al*., 2021). No melhor do nosso conhecimento, 77% dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica deste trabalho não consideram a força de trabalho dentro do problema de agendamento,

apesar haver um crescimento nesta área de pesquisa. O PAV considera que as docas são recursos escassos e tem em quantidade menor que o número de veículos. Se caso o número de docas seja maior ou igual ao número de veículos, torna-se um Problema de Designação de Veículos para Docas (Van Belle *et al*., 2012).

Dentro da literatura apresentada até o momento, existem divergências entre o que é pesquisado e o que acontece em prática, tornando possível um estudo que se mostre mais próximo do que os gestores das empresas enfrentam em suas rotinas. Ladier & Alpan, (2016) apontam a capacidade dos recursos internos (força de trabalho e outros recursos) uma das principais lacunas entre a indústria e as pesquisas acadêmicas, onde apenas 3% dos trabalhos acadêmicos consideram os recursos internos do centro de distribuição um limitante. O Problema de Alocação da Força de Trabalho tem alto impacto na gestão de um centro de distribuição e se mal planejado afeta no custo e ociosidade dos trabalhadores.

Está pesquisa teve como objetivo apresentar uma proposta de um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o Problema de Alocação da Força de Trabalho para descarga de veículos na estratégia de *cross-docking*. O modelo matemático criado, complementa o Problema de Agendamento de Veículos. O conjunto de testes realizados demonstrou como a quantidade de docas, veículos e operadores influenciam a alocação da força de trabalho, além de delimitar uma regra que ajuda gestores na hora de alocar a força de trabalho nas atividades de descarga.

## 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Criar um modelo matemático para a solução do Problema da Alocação da Força de Trabalho para o setor de recebimento de um centro de distribuição que utiliza *cross-docking.*

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Investigar o Problema de Alocação da Força de Trabalho na estratégia de *cross-docking*;
- Comparar os principais métodos utilizados para resolver o problema;
- Descrever e delimitar o problema investigado;
- Elaborar o modelo PLIM e as instâncias de teste;
- Comparar o resultado do modelo matemático nas instâncias geradas;
- Analisar as respostas e encontrar os principais limitantes operacionais, do modelo e da aplicação real.

## 1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Primeiramente, o escopo do trabalho está limitado exclusivamente ao Problema de Alocação da Força de Trabalho no setor de recebimento, não influenciando quaisquer outras decisões diretamente. Outros tipos de recursos como paletes, empilhadeiras não foram considerados, assim como o custo de mão de obra e outras atividades.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. O capítulo 2 investiga a literatura do PAV e PAFT e compara os principais método de alocação da força de trabalho. O capítulo 3 elabora o problema e o modelo PLIM criado. O capítulo 4 apresenta os testes computacionais e explica os resultados. Por último o capítulo 5, no qual é feita a conclusão e sugestões para pesquisas futuras.

# 2 REVISÃO DA LITERATURA

A organização deste capítulo mostra uma revisão bibliográfica do estudo do Problema de Sequenciamento de Veículos e como o Problema da Alocação da Força de Trabalho é implementado. A revisão iniciou-se com a busca das palavras-chaves: *cross-docking*, agendamento de veículo e sequenciamento de veículos. A partir disto, notou-se que as primeiras pesquisas referente ao PAV iniciaram em 2008. Portanto, deste ano em diante foi realizado toda a revisão bibliográfica.

Dentro da bibliografia estudada do PAV, o Problema da Alocação da Força de Trabalho mostrou-se com diversas oportunidades. Isto porque nem todas as pesquisas relacionadas ao Problema de Agendamento de Veículos alocam a força de trabalho para o cumprimento das atividades de carga e descarga. Neste trabalho, as pesquisas que não consideram o PAFT são aquelas no qual seu modelo matemático não aloca operadores ou não há necessidade de uma quantidade mínima de força de trabalho para realizar as atividades. Então, de todos os trabalhos descritos na revisão bibliográfica 77% não consideram a alocação dos operadores.

## 2.1 O SEQUENCIAMENTO DE VEÍCULO E A FORÇA DE TRABALHO

O Problema de Agendamento de Veículos na estratégia de *cross-docking*, é um dos 7 problemas de decisão apontado por Boysen & Fliedner (2010) conforme lista a seguir:

- Localização do centro de distribuição;
- Layout do centro de distribuição;
- Designação dos destinos nas docas;
- Roteirização de Veículos;
- **Agendamento de veículos;**
- Agendamento de recursos dentro do centro de distribuição;
- Carregamento e descarregamento dos veículos

As pesquisas relacionadas ao agendamento de veículos é definido por buscar soluções de **quando** e **onde** um veículo deve estacionar para (des)carregar (Wolff *et al*, 2021). Cada veículo tem uma quantidade de produtos que precisa ser descarregada ou carregada.

Yu & Egbelu (2008) criaram uma das primeiras configurações de agendamento de veículos, onde há uma doca exclusiva de entrada e outra de saída. Para cada produto dentro dos veículos de entrada que chega para descarregar, sabe-se em qual veículo de saída ele deve ser carregado. Cada veículo só pode embarcar uma vez na doca e apenas sair quando sua (des)carga estiver completa. Durante o tempo de processamento e transporte do produto, não é considerado a força de trabalho ou outro tipo de recurso. Se caso o veículo de saída não estiver em doca e os produtos já foram descarregados dos veículos de entrada, é possível que os produtos fiquem estocados até sua chegada. Os tempos de carga e descarga são constantes, ou seja, a quantidade de produtos não interfere no tempo de processamento. O tempo para troca de veículo não é considerado assim como o tempo de transporte dentro do TCD.

Shakeri *et al*. (2008) considerou um centro de distribuição de contêineres de múltiplas docas com serviço misto. Este tipo de serviço permite que em apenas uma doca, o serviço de carga e descarga possa ser feito. Um contêiner pode conter múltiplos produtos e estes serem designados para mais de um contêiner. Para este cenário, os produtos são descarregados e transferidos para os novos contêineres sem interferência de qualquer tipo de recurso. Ainda, devido ao serviço misto, o mesmo contêiner que foi descarregado pode ter produtos designados para receber de outros contêineres. Então, há possibilidade de carregamento de produtos no mesmo contêiner após a descarga, respeitando a capacidade total.

A pesquisa proposta por Boysen (2010), apresentou um modelo de agendamento de docas para produtos perecíveis. Para este tipo de produto, foi considerado que existe um prazo de vencimento a ser respeitado e por isso foi adotado uma política de zero estoque (Boysen, 2010). Cada produto que chega no centro de distribuição através dos veículos de entrada, sabe-se para qual veículo de saída deve ir. Para seguir a política de zero estoque, assim que um veículo de

entrada inicia o processo de descarga, os respectivos veículos de saída que receberão os produtos, devem também estar em processamento. Assim, os produtos são movidos diretamente de um veículo ao outro. Os veículos de saída só terminam o processamento quando o último produto do último veículo de entrada for carregado. Durante todo o processo, desde o descarregamento até o carregamento, não há interferência de mão de obra ou quaisquer outros tipos de recursos para mover os produtos no centro de distribuição.

Na pesquisa de Larbi *et al*. (2011) foram criado três cenários distintos para entender as incertezas do Problema de Agendamento de Veículos. Nos três cenários foram considerados apenas uma doca para descarregamento e outra para carregamento. A função objetivo minimiza os custos totais da operação e compara os três cenários a seguir:

- **Agendamento com informação completa:** É conhecido previamente para cada veículo o horário de chegada no TCD, a sequência de descarga, assim como a quantidade de produtos e seus respectivos destinos;
- **Agendamento com nenhuma informação:** Não é conhecido o agendamento dos veículos de chegada, a sequência de descarga, a quantidade de produtos que devem ser carregados, assim como os seus destinos. Após a chegada do veículo, sabe-se as informações e é redefinido o sequenciamento;
- **Agendamento com informação parcial:** O agendamento dos veículos é parcialmente conhecido, ou seja, sabe-se previamente a chegada de alguns veículos do total, quantidade de produtos e o destinos deles. A quantidade de produtos e os destinos dos veículos não conhecidos, são identificados na chegada do veículo ao centro de distribuição, assim redefinindo o sequenciamento da descarga.

Todos os veículos de saída estão disponíveis desde o tempo zero e mais de um veículo pode realizar entregas para cada destino. Os recursos são considerados suficientes para não interferir no modelo de decisão para os três cenários estudados.

Shakeri *et al*. (2012) realizou uma pesquisa de agendamento de veículos com a alocação de empilhadeiras para cada descarga. A primeira decisão realizada pelo modelo matemático é alocar os veículos para as docas e assim que são designados inicia-se o processo de descarga. Os paletes que precisam ser descarregados levam uma unidade de tempo para realizarem o processo. Após o descarregamento a empilhadeira alocada leva um palete por vez para o veículo destinado e as distancias entre todas as docas são iguais. A força de trabalho é considerada suficiente e apenas os paletes são recursos limitantes no centro de distribuição.

Dinçer Konur & Golias(2013), apresentam uma nova configuração para estudar a incerteza da chegada de veículos nas docas de descarregamento. Há múltiplas docas e o tempo de chegada dos veículos é desconhecido, mas sabe-se o tempo mínimo e máximo que ele deve chegar. Após a chegada dos veículos, cada um é alocado para uma doca e segue uma sequência de descarga definida pelo modelo matemático. Os recursos internos do centro de distribuição não foram considerados.

Diferente dos demais trabalhos, Liao *et al*. (2013) estudaram o sequenciamento de veículos de múltiplas docas tanto para o setor de recebimento quanto para o de expedição. Cada produto dentro dos veículos de entrada, já tem um veículo de saída previamente definido assim como o tempo que o produto irá percorrer no TCD. O tempo que o produto irá percorrer depende da distância entre a doca de recebimento e expedição. Sabe-se com antecedência a chegada de cada veículo de entrada e assim que os produtos descarregam podem ser transferidos e carregados diretos nos veículos de saída ou ficarem estocados no setor de expedição. O estoque serve para produtos que não conseguem ser carregados antes da partida do veículo de saída e precisam permanecer estocados até o próximo veículo que atende o mesmo destino. Cada produto que não consegue ser carregado tem um custo de penalidade contabilizado na função objetivo. Para a descarrega, transporte interno e carregamento não foi considerado os recursos internos.

Mohtashami (2015) explora o agendamento de veículos com preempção. O uso da preempção permite que um veículo que está em processo de (des)carregamento, seja substituído por outro antes que ele seja completamente (des)carregado. Após a (des)carga do substituto, o substituído pode retornar para terminar a (des)carrega. Só há uma doca para cada setor e os produtos podem ser estocados nas docas do setor de carregamento até a chegada do veículo. Durante todo o processo a mão de obra e demais recursos não são considerados.

Gelareh *et al*. (2016) criou uma configuração de múltiplas docas para o setor de carregamento e expedição. Ao invés de lidar com produtos lidou com paletes, que por sua vez tem uma quantidade máxima para estoque no centro de distribuição. Os paletes podem ficar estocados até a chegada do veículos e se possível são movidos direto para o setor de expedição para serem carregados. O tempo que o produto leva para ser transferido da doca de recebimento para a expedição depende das distancias entre elas. Entretanto, o modelo não contempla quaisquer tipos de recursos para movimentar os produtos dentro do centro de distribuição.

Dincer Konur & Golias (2017) formulou uma pesquisa relacionada aos veículos de expedição com a alocação da força de trabalho. Há um conjunto de veículo de expedição vazios que são alocados nas docas e em sequência carregados. É considerado que para cada doca há uma disponibilidade de operadores diferente e o gestor de *cross-docking* decide qual é a quantidade ideal para carregar cada veículo. Se para um veículo há mais operadores que a quantidade ideal definida, o tempo de carregamento do veículo mantem-se o mesmo da quantidade ideal e devido ao excesso de operadores é considerado congestionamento. Ainda, a pesquisa considera o Problema de Agendamento de Veículos como não linear e utiliza algoritmo genético para resolvê-lo. O objetivo da pesquisa é encontrar a melhor alocação de funcionários a partir do que é definidor pelo gestor de *cross-docking*.

Molavi *et al*. (2018) contribuíram com o estudo de agendamento de veículos mostrando como reduzir a quantidade de pedidos atrasados. Nele é considerado que o agendamento dos veículos é planejado para os setores de

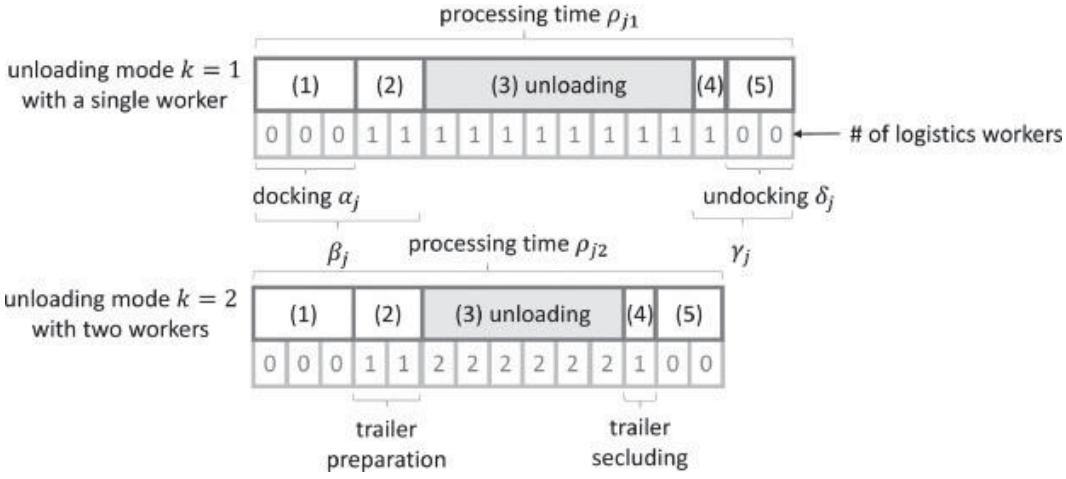
recebimento e expedição. Cada produto tem um destino previamente conhecido sendo possível que haja mais de um veículo de expedição para realizar a entrega no destino. Cada veículo de expedição tem um tempo fixo para acabar o carregamento, independentemente da quantidade. Os produtos que chegaram depois do tempo de largada do veículo, são considerados atrasos e devem permanecer estocados até o próximo veículo com o mesmo destino. Os processo de descarregamento, carregamento e transporte interno não tem restrição de qualquer recurso.

Tadumadze *et al.* (2019) em sua pesquisa utiliza a força de trabalho como uma variável no modelo do Problema de Agendamento de Veículos. A configuração apresentada na pesquisa abrange o setor de recebimento do centro de distribuição. Nele, sabe-se quando os veículos devem chegar e qual o tempo limite que o veículo deve finalizar a descarga. Após saber qual será o agendamento dos veículos em cada doca, a segunda decisão é alocar a força de trabalho para cada um dos veículos. Quanto maior for a força de trabalho para um veículo, menor será o tempo que ele ficará em descarga. Entretanto, há alguns limitantes na hora de fazer a alocação começando pelas 5 etapas no processo de descarregamento descrito na pesquisa:

(1) Manobra do veículo para dentro da doca;
(2) Preparar o descarregamento: Nesta etapa os autores contemplam, romper o selo, abrir as portas, remover as proteções e posicionar o transportador;
(3) Remoção da carga do veículo;
(4) Fechamento do veículo;
(5) Saída do veículo para a doca;

Nestas 5 atividades sequenciadas por Tadumadze *et al.* (2019), apenas a terceira pode ser otimizada com o aumento de mais trabalhadores devido a limite de espaço e tipo de atividade. As demais atividades são realizadas por 1 operador, porém o modelo matemático considera que todos os operadores alocados para a descarga só podem ser liberados após o final da quinta etapa.

FIGURA 1 — ETAPAS DO PROCESSO DE DESCARGA DE UM VEÍCULO




*Fonte: Giorgi Tadumadze (2019)*

O transbordo dos produtos de uma doca a outra é instantânea e não necessita da mão de obra. Os veículos de expedição têm uma hora definida para serem liberados e cada produto que chega para carregar após este horário é considerado atraso. Estes atrasos ficam em estoque até a chegada do próximo veículo que atende seus destinos. A função objetivo tenta reduzir esta quantidade de atrasos além de diminuir o tempo de processamento de todos os veículos.

Wolff *et al*. (2021) apresentaram uma pesquisa relativa apenas ao agendamento dos veículos no setor de carregamento com alocação da força de trabalho. Cada veículo que chega para descarregar no centro de distribuição, tem um horário de chegada conhecido e a data limite para ser liberado. Os operadores do centro de distribuição descarregam os veículos e levam os produtos para o setor de expedição. Há um estoque neste setor para os produtos que não são carregados antes da saída do veículo de expedição definido. Então, ficam estocados até a chegada de um novo veículo que atenda para a mesmo destino. A quantidade de mão de obra alocada para cada veículo de descarregamento é definida por um parâmetro de nível de serviço.

O parâmetro de nível de serviço ajuda a definir a quantidade de produto que podem ficar em atraso no setor de expedição. Então, quanto maior for o nível de

serviço maior será a mão de obra disponível para descarregar os veículos. Com o aumento da mão de obra os veículos descarregam em menos tempo e a quantidade de produtos em atraso é reduzida. Ainda, é apresentado na pesquisa a diferença do *makespan* (ou Cmáx) quando é levado em consideração a força de trabalho. O *makespan* é considerado como o tempo entre o primeiro produto que descarrega no primeiro veículo, até a descarga do último produto do último veículo. Para o exemplo, foram considerados três docas e cinco veículos para realizar a descarga. Cada um dos veículos tem um tempo de descarga diferente dependendo da doca e precisa de um operador para completar o processo. O tempo de chegada e saída do veículo também é informado, conforme tabela a seguir:

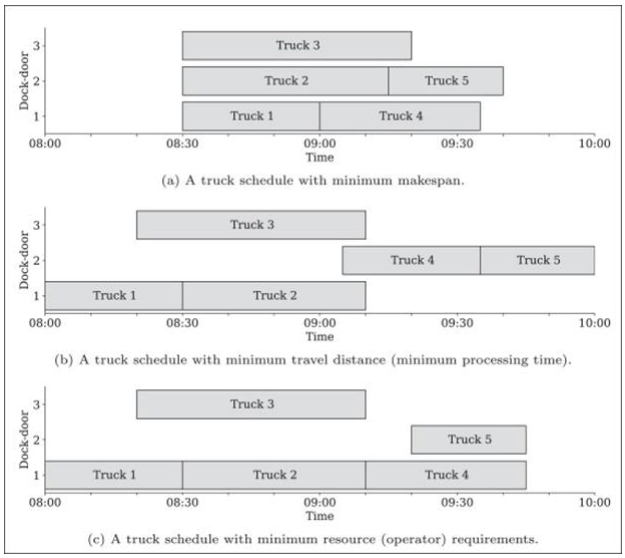
TABELA 1 — PARÂMETROS DE VEÍCULOS PARA PROCESSAMENTO

| | | | Processamento dos veículos em cada doca | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Veículo | Tempo de chegada | Tempo de saída | Doca 1 | Doca 2 | Doca 3 |
| 1 | 08:00 | 09:00 | 30 | 35 | 35 |
| 2 | 08:20 | 09:20 | 40 | 45 | 50 |
| 3 | 08:20 | 09:20 | 60 | 60 | 50 |
| 4 | 08:50 | 09:50 | 35 | 30 | 35 |
| 5 | 09:15 | 10:15 | 30 | 25 | 30 |

*Fonte: Wolff (2021)*

Para entender a diferença entre os 3 objetivos que minimizam o *makespan* a amostra apresentada foi testada em 3 cenários: A função objetivo focada somente na redução do *makespan*, a redução do tempo de processamento de cada veículo ou a otimização da quantidade de recursos necessários, conforme figura a seguir:

FIGURA 2 — COMPARAÇÃO DE MAKESPAN




*Fonte: Wolff (2021)*

Quando o objetivo é reduzir o *makespan* os autores apresentam que o agendamento de docas ocorre de forma compacta, começando mais tarde e finalizando mais cedo. O número de operadores que são necessários para cumprir este objetivo, são três. Quando o foco do problema é reduzir o tempo total de processamento dos veículos, cada um é alocado para a doca que terá o menor tempo de processamento. Diferente da redução de *makespan*, o segundo teste utiliza um horizonte de tempo maior. Devido a sobreposição de tempo do veículo 2 e 3 com 4, também foram necessários três operadores. Por último, objetivando a redução do número de operadores, foram necessários apenas dois para cumprir os descarregamentos respeitando todos os tempos de saída dos veículos. Portanto, quando o foco do agendamento de veículo é na alocação da mão de obra, tem-se uma redução de custos e eficiência similar aos demais objetivos.

Daniels *et al*. (1996) fizeram uma pesquisa referente a alocação de operadores para a realização de *t* tarefas que devem ser realizadas em *m* máquinas de manufatura. Para estes serviços serem concluídos, pelo menos um operador deve ser alocado. Foi apresentado duas formas de alocar os operadores as máquinas: A primeira chamada de Problema de Recursos Flexíveis para Máquinas Paralelas Estáticas, no qual aloca somente os operadores para as máquinas fazendo esta distribuição permanecer igual durante todo o horizonte de tempo. Então, se os

operadores finalizam todos as tarefas de uma máquina, eles não podem ser alocados para outra que tenham serviços pendentes. O segundo problema chamado Problema de Recursos Flexíveis para Máquinas Paralelas Dinâmicas, aloca os funcionários para as tarefas *t* e após a finalização da tarefa os operadores podem ser alocados para as demais tarefas, independente da máquina. Adaptando esta pesquisa para o Problema de Alocação da Força de Trabalho para a estratégia de *cross-docking*, o primeiro problema de alocação seria alocar os operadores para as docas, impossibilitando a transição dos operadores entre elas. O segundo modelo, possibilitaria a transição dos operadores entre as docas até a finalização do último veículo.

Dincer Konur & Golias (2017) realizou a alocação da força de trabalho do setor de carregamento através de algoritmo genético com auxílio do conhecimento do gestor de *cross-docking* para encontrar a melhor alocação dos operadores. Para esta pesquisa, o gestor de *cross-docking* não interfere na decisão do modelo matemático além de ser considerado um problema linear para o setor de recebimento.

Similar a Tadumadze *et al.* (2019), este trabalho mostrou o Problema de Alocação da Força de Trabalho sendo diretamente ligado ao de agendamento de veículos. O principal objetivo da pesquisa foi a redução do tempo de processamento sabendo previamente o horário de início de descarga e horário limite para liberar cada veículos. Entretanto, para esta pesquisa os horários de início e fim serão definidos pelo modelo matemático apresentado.

Wolff *et al*. (2021) também definiu a alocação da força de trabalho para reduzir o tempo total de processamento dos veículos. Entretanto, foi utilizado um nível de serviço previamente conhecido para determinar a quantidade pedido em atrasos e consequentemente a quantidade disponível de operadores. De maneira diferente, esta pesquisa aloca a quantidade de operadores para cada veículo através de modos de trabalho visando reduzir o *makespan*.

Através da configuração apresentada por Daniels *et al*. (1996) no Problema de Recursos Flexíveis para Máquinas Paralelas Dinâmicas, foi apresentado um modelo para adaptar ao Problema da Alocação da Força de Trabalho na estratégia de *cross-docking*. Então, será proposto um novo modelo para a resolução do PAFT através de um modelo de alocação de operadores para máquinas de manufaturas. Esta pesquisa

irá contribuir com mais uma opção para o Problema da Alocação da Força de Trabalho nas estratégias de *cross-docking,* além de ajudar os gestores na hora de tomar esta decisão.

# 3 METODOLOGIA

## 3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O modelo matemático criado será para o setor de recebimento de um centro de distribuição com estratégia *cross-docking*. Este modelo devido a uma das restrições tornou-se não linear, entretanto dentro do ambiente de modelagem esta restrição foi linearizada através dos métodos computacionais do GUROBI e explicado no capítulo 3.2. Todos os produtos que são deslocados do veículo para dentro do TCD, são feitos por operadores. Os veículos estão disponíveis desde o instante zero e sabe-se quando e onde são alocados. Cada veículo é alocado para uma doca começando pela primeira e avançando até a última disponível. Caso todas as docas estejam ocupadas, o próximo veículo é alocado novamente à primeira doca e aguarda a conclusão da descarga do veículo que o precede. Isto acontece para todas as docas conforme tabela 2. Após a finalização do descarregamento, o veículo é liberado e os operadores estão disponíveis para serem alocados para outro veículo, independente da doca.

TABELA 2 — SEQUÊNCIAMENTO DE VEÍCULOS

| **VEÍCULO** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DOCA 1** | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| **DOCA 2** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **DOCA 3** | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **DOCA 4** | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

*Fonte: Autor (2023)*

A quantidade de operadores está disponível desde o tempo zero e é conhecida. Os operadores são alocados através de modos de trabalho previamente definidos e dependendo da quantidade de operadores no modo, o tempo de descarregamento do veículo é diferente conforme tabela a seguir:

TABELA 3 — TABELA GENÉRICA DE MODOS DE TRABALHO

| **Modos de trabalho (k)** | **Tempo de processamento (u)** | **Quantidade de operadores (o)** |
|---|---|---|
| 1 | 19 | 2 |
| 2 | 17 | 3 |
| 3 | 15 | 4 |

*Fonte: Autor (2023)*

Cada veículo deve realizar a descarga através de um modo de trabalho e respeitar a quantidade total de operadores disponíveis em cada instante de tempo. Os instantes, são discretizações em unidades de tempo em relação ao tempo total disponível.

O modelo matemático, através dos modos de trabalho visa reduzir o *makespan*, desde o início do primeiro veículo ao fim do último (Cmáx). Este objetivo, foi comparado com o objetivo de minimizar o tempo de conclusão de todos os veículos (Ctotal). A seguir há um exemplo de como o descarregamento de veículos se comporta otimizando o Ctotal e o Cmáx. Para cada exemplo foi considerado um total de 4 docas, 10 veículos e 10 operadores utilizando o modelo descrito no capítulo 3.2. Ao comparar os resultados, houve duas formas de alocar os operadores aos veículos dependendo da função objetivo.

FIGURA 3 — ALOCAÇÃO DA FORÇA DE TRABALHO CTOTAL (4 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 10 OPERADORES)

| Veiculo I | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |

*Fonte: Autor (2023)*

FIGURA 4 — ALOCAÇÃO DA FORÇA DE TRABALHO CMÁX (4 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 10 OPERADORES)

| Veiculo I | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |

*Fonte: Autor (2023)*

A otimização do Ctotal, aconteceu através da soma dos instantes de conclusão de cada veículo resultando em 314, diferente da soma do segundo objetivo (Cmáx) que resultou em 328. Entretanto, a conclusão do último veículo para o Ctotal foi no instante 53 e para o Cmáx 49, conforme figuras 3 e 4. Esta pesquisa definiu a

função objetivo como a redução do Cmáx, porém esta escolha depende do objetivo do gestor de TCD.

Para realizar a alocação dos veículos o tempo total disponível para realizar todas as descargas foi previamente definido com 100 unidades de tempo para cada teste. Nota-se que a alocação da força de trabalho acontece nos tempos em laranja onde é considerado que o veículo *i* está em processamento (etapa (3) do descarregamento). Os tempos que estão em verde são as etapas (1) e (2) do processo e o tempo que se encontram em vermelho são as etapas (4) e (5), onde não é considerado a alocação. Utilizou-se, aqui, as mesmas etapas listadas em Tadumadze *et al.* (2019).

## 3.2 MODELO MATEMÁTICO

O modelo proposto foi inspirado no trabalho de Daniels *et al*. (1996) para a alocação de operadores a maquinas de manufatura. A quantidade de docas e veículos, pode variar de acordo com o problema estudado assim como o número disponível de operadores. Portanto, a decisão a ser tomada é designar para cada veículo qual o melhor modo de descarga, respeitando a quantidade de operadores e processando todos os veículos dentro do período preestabelecido.

CONJUNTOS

- I conjunto de veículos (i, i' = {1, ..., |I|})
- J conjunto de docas (j, ..., |J|)
- K conjunto de modos de descarga (k, ..., |K|)
- T conjunto de instantes de tempo (t, ..., |T|)

PARÂMETROS

- W Número total de operadores
- $u_k$ Tempo de processamento no modo *k*
- $o_k$ Quantidade de operadores no modo *k*
- *M* Número inteiro grande

VARIÁVEIS CONTÍNUAS

- $p_i$ Quantidade de tempo necessário para descarregar o veículo *i*
- $c_i$ Instante de finalização do descarregamento do veículo *i*
- $c_{i'}$ Instante de finalização do descarregamento do veículo *i'*
- $s_i$ Instante de início do descarregamento do veículo *i*
- $r_{it}$ Quantidade de operadores necessários para descarregar o veículo *i* no instante de tempo *t*
- $R_t$ Quantidade disponível de operadores no instante *t*

VARIAVEIS BINÁRIAS

$y_{ii'}$ 1, se o veículo *i* precede o veículo *i',*
*0,* se não

$x_{ikt}$ 1, se o veículo *i* finalizou a descarga no modo *k* no instante *t*
0, se não

$z_{ikt}$ 1, se o veículo *i* iniciou a descarga no modo *k* no instante *t*
0, se não

$E_{it}$ 1, se o veículo *i* está em processamento no instante *t*
0, se não

$e1_{it}$ 1, se o instante de tempo *t* do veículo *i* for maior que o instante de início da descarga. 0, se não

$e2_{it}$ 1, se o instante de tempo *t* do veículo *i* for menor que o instante de finalização da descarga. 0, se não

MODELO MATEMÁTICO

$$Min\ C_{máx} \tag{1}$$

sujeito à:

$$\sum_{k=1}^{K} u_k \sum_{t=1}^{T} x_{ikt} = p_i \qquad \forall\ i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{t=1}^{T} t \sum_{k=1}^{K} x_{ikt} = c_i \qquad \forall\ i \in I \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{t=1}^{T} x_{ikt} = 1 \qquad \forall\ i \in I \tag{4}$$

$$(c_i - c_{i'}) + M * (1 - y_{ii'}) \geq p_i \qquad \forall\ i \in I, \forall\ i' \in I \tag{5}$$

$$y_{ii'} - y_{i'i} = 1 \qquad \forall\ i \in I, \forall\ i' \in I \tag{6}$$

$$\sum_{k=1}^{K} o_k \sum_{I=1}^{I} z_{ikt} \leq R_t \qquad \forall\ t \in T \tag{7}$$

$$s_i = c_i - p_i \qquad \forall\ i \in I \tag{8}$$

$$\sum_{t=1}^{T} t \sum_{k=1}^{K} z_{ikt} = s_i \qquad \forall\, i \in I \qquad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{t=1}^{T} z_{ikt} = 1 \qquad \forall\, i \in I \qquad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{K} o_k \sum_{t=1}^{T} z_{ikt} = \sum_{k=1}^{K} o_k \sum_{t=1}^{T} x_{ikt} \qquad \forall\, i \in I \qquad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{K} o_k \sum_{t=1}^{T} z_{ikt} * E_{it} = r_{it} \qquad \forall\, i \in I,\ \forall\, t \in T \qquad (12)$$

$$t - (M * e1_{it}) \leq s_i \qquad \forall\, i \in I,\ \forall\, t \in T \qquad (13)$$

$$(C_i - t) - (M * e2_{it}) \leq 0 \qquad \forall\, i \in I,\ \forall\, t \in T \qquad (14)$$

$$(e1_{it} + e2_{it}) - E_{it} = 1 \qquad \forall\, i \in I,\ \forall\, t \in T \qquad (15)$$

$$W - \sum_{i=1}^{I} r_{it} = R_t \qquad \forall\, t \in T \qquad (16)$$

$$C_{máx} \geq C_i \qquad \forall\, i \in I \qquad (17)$$

A função objetivo (1) é definida para reduzir o *makespan*. A restrição (2) garante o tempo de processamento de cada veículo e a restrição (3) que cada veículo tenha um instante de conclusão. A quarta restrição garante que cada veículo conclua a descarga em apenas um instante de tempo. As restrições (5) e (6) garantem o sequenciamento dos veículos em cada doca. Restrição (7) garante que a soma da quantidade de operadores alocada em cada instante para cada veículo, não exceda o total disponível. A (8) garante que o tempo de início é igual o instante de conclusão menos o tempo de processamento. Restrição (9) garante que cada veículo deve ter um instante de início. A restrição (10) garante que cada veículo tenha apenas um instante de início. A restrição (11) garante que a quantidade de funcionários alocada no início da descarga seja igual a quantidade no final da descarga, para cada veículo.

Em (12) assume-se que em cada instante de tempo em que o veículo está em processamento, a quantidade de funcionários alocada seja igual a quantidade no instante de início de descarga. (13) utiliza uma variável auxiliar para saber quais instantes de tempo são maiores que o início da descarga de cada veículo e a (14)

através de outra variável auxiliar, para saber quais instantes são menores que o tempo de conclusão da descarga. A restrição (15) garante que os instantes que estão entre o início e o fim da descarga são instantes em que o veículo está em processamento. A restrição (16) subtrai a quantidade alocada de operadores de cada veículo no instante t do número total de operadores e a (17) garante que o tempo de conclusão total seja maior que o tempo de conclusão de cada veículo. Para adaptar adequadamente o modelo de Daniels *et al*. (1996) ao PAFT, as restrições (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15) e (16) foram adicionadas.

Toda a programação do modelo foi realizada dentro do Visual Studio utilizando o C# com a biblioteca GUROBI. A primeira etapa foi recriar o modelo de Daniels *et al*. (1996). Após a replicação, iniciou-se o processo de adaptação para o problema do PAFT. Neste processo, foram necessários controlar alguns fatores dentro do ambiente de modelagem. As restrições (5) e (6) não fazem a diferenciação das docas por veículo, então para fazer o sequenciamento de descarregamento dos veículos por doca utilizou-se do uso de condicionais no ambiente de programação. Para seguir o que foi descrito na tabela 2, a informação dos veículos as docas foram armazenadas em uma matriz binária de docas e veículos. Então, para conseguir realizar o sequenciamento para cada doca, os veículos i e i' para a matriz binária, deveriam ter o valor 1, ou seja, ser verdadeiro. Sendo eles verdadeiros, as restrições (5) e (6) são inseridas fazendo o sequenciamento para cada doca.

Os instantes de tempo de início e fim da descarga (variáveis $z_{ikt}$ e $x_{ikt}$) foram gerados, entretanto os instantes de processamento (variável $E_{it}$) necessitou de duas variáveis auxiliares para encontrá-los ($e1_{it}\ e\ e2_{it}$). A restrição (12) dentro de todo o modelo é a única restrição em que acontece a multiplicação de variáveis binárias, tornando-a quadrática. Devido ao crescimento exponencial da matriz por causa desta restrição, foi necessário utilizar algumas ferramentas do próprio ambiente de modelagem. Estas ferramentas podem parametrizar o ambiente computacional e foram utilizadas para linearizar a restrição. Para realizar a linearização foi utilizado o método *Parameters.PreQLinearize* igual a 1 e para não exceder a capacidade de memória RAM, foi utilizado o método *Parameters.NodefileStart* igual a 0.5.

# 4 TESTES COMPUTACIONAIS

Nesta seção será descrito como o modelo matemático foi testado. Todos os testes foram realizados em um Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v2 Core i7-4790 CPU com 2.80GHz cores e 63,9 GB RAM. Os algoritmos foram implementados em C# e utilizado o GUROBI como o solver de PLIM.

## 4.1 GERAÇÃO DE CENÁRIOS

Para entender os objetivos da pesquisa foi necessário gerar um conjunto de instâncias de teste. Foi gerado um total de 48 instâncias e estas dívidas em tamanhos diferentes. A categorização dos tamanhos seguiu a mesma linha debatida na pesquisa de Boysen et al. (2017) e também utilizada no trabalho de Tadumadze *et al.* (2019) para recebimento de veículos na estratégia *cross-docking*. Nesta pesquisa, para entender a variação dos parâmetros, a categorização seguiu conforme tabela 3:

TABELA 3 — TAMANHO DAS INSTÂNCIAS

| TAMANHO | QUANTIDADE DE DOCAS | QUANTIDADE DE VEÍCULOS |
|---|---|---|
| **PP** | Menor que 10 | menor que 15 |
| **P** | Entre 10 até 19 | entre 15 até 49 |
| **M** | Entre 20 até 49 | entre 50 até 109 |
| **G** | Maior ou igual à 50 | Maior ou igual à 110 |

*Fonte: Autor (2023)*

As instâncias utilizadas foram testadas 10 vezes com as mesmas suposições básicas: 1) Todos os veículos estão disponíveis desde o tempo zero, 2) os sequenciamentos para cada doca são gerados previamente e 3) os modos de trabalhos são fixos. O tempo computacional máximo para encontrar o resultado foi determinado em 3600 segundos e o tempo total T para concluir as atividades para todas as instâncias foi 100. O número grande M foi definido como 1000.

Os parâmetros utilizados para a realização dos testes foram: 1) a quantidade de docas, 2) a quantidade de veículos e 3) o número de operadores disponíveis. A

tabela 3 mostra os modos de trabalho para descarregar os veículos e cada um deles deve descarregar em algum dos modos K, com os respectivos tempo de processamento e quantidade de operadores.

TABELA 4 — MODOS DE TRABALHO

| Modos de trabalho (K) | Tempo de processamento(u) | Quantidade de operadores(o) |
|---|---|---|
| 1 | 19 | 2 |
| 2 | 17 | 3 |
| 3 | 15 | 4 |

*Fonte: Autor (2023)*

O intuito dos testes foi entender como os parâmetros influenciam o desempenho computacional e o *makespan*. As 48 instâncias foram divididas em três grupos para testar isoladamente a variação da quantidade de operadores, veículos e docas, conforme tabelas a seguir:

TABELA 5 — INSTÂNCIAS PARA TESTE DA DISPONIBILIDADE DE OPERADORES

| Tamanho | Instâncias | T | j | i | k | w |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PP | Instância 1 | 100 | 4 | 10 | 3 | 20 |
| PP | Instância 2 | 100 | 4 | 10 | 3 | 16 |
| PP | Instância 3 | 100 | 4 | 10 | 3 | 10 |
| PP | Instância 4 | 100 | 8 | 10 | 3 | 40 |
| PP | Instância 5 | 100 | 8 | 10 | 3 | 32 |
| PP | Instância 6 | 100 | 8 | 10 | 3 | 24 |
| P | Instância 7 | 100 | 10 | 15 | 3 | 50 |
| P | Instância 8 | 100 | 10 | 15 | 3 | 40 |
| P | Instância 9 | 100 | 10 | 15 | 3 | 30 |
| M | Instância 10 | 100 | 25 | 80 | 3 | 120 |
| M | Instância 11 | 100 | 25 | 80 | 3 | 100 |
| M | Instância 12 | 100 | 25 | 80 | 3 | 80 |
| G | Instância 13 | 100 | 50 | 110 | 3 | 220 |
| G | Instância 14 | 100 | 50 | 110 | 3 | 200 |
| G | Instância 15 | 100 | 50 | 110 | 3 | 160 |
| G | Instância 16 | 100 | 100 | 220 | 3 | 420 |
| G | Instância 17 | 100 | 100 | 220 | 3 | 400 |
| G | Instância 18 | 100 | 100 | 220 | 3 | 380 |

*Fonte: Autor (2023)*

TABELA 6 — INSTÂNCIAS PARA TESTE DA DISPONIBILIDADE DE VEÍCULOS

| Tamanho | Instâncias | T | j | i | k | w |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PP | Instância 19 | 100 | 4 | 10 | 3 | 16 |
| PP | Instância 20 | 100 | 4 | 12 | 3 | 16 |
| PP | Instância 21 | 100 | 4 | 14 | 3 | 16 |
| PP | Instância 22 | 100 | 8 | 10 | 3 | 32 |
| PP | Instância 23 | 100 | 8 | 12 | 3 | 32 |
| PP | Instância 24 | 100 | 8 | 14 | 3 | 32 |
| PP | Instância 25 | 100 | 10 | 10 | 3 | 40 |
| P | Instância 26 | 100 | 10 | 15 | 3 | 40 |
| P | Instância 27 | 100 | 10 | 20 | 3 | 40 |
| M | Instância 28 | 100 | 25 | 80 | 3 | 100 |
| M | Instância 29 | 100 | 25 | 90 | 3 | 100 |
| M | Instância 30 | 100 | 25 | 105 | 3 | 100 |
| G | Instância 31 | 100 | 50 | 110 | 3 | 200 |
| G | Instância 32 | 100 | 50 | 130 | 3 | 200 |
| G | Instância 33 | 100 | 50 | 155 | 3 | 200 |
| G | Instância 34 | 100 | 100 | 220 | 3 | 400 |
| G | Instância 35 | 100 | 100 | 250 | 3 | 400 |
| G | Instância 36 | 100 | 100 | 320 | 3 | 400 |

*Fonte: Autor (2023)*

TABELA 7 — INSTÂNCIAS PARA TESTE DA DISPONIBILIDADE DE DOCAS

| Tamanho | Instâncias | T | j | i | k | w |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PP | Instância 37 | 100 | 4 | 10 | 3 | 16 |
| PP | Instância 38 | 100 | 8 | 10 | 3 | 32 |
| PP | Instância 39 | 100 | 10 | 10 | 3 | 40 |
| M | Instância 40 | 100 | 25 | 80 | 3 | 100 |
| M | Instância 41 | 100 | 30 | 80 | 3 | 120 |
| M | Instância 42 | 100 | 35 | 80 | 3 | 140 |
| G | Instância 43 | 100 | 50 | 110 | 3 | 200 |
| G | Instância 44 | 100 | 60 | 110 | 3 | 240 |
| G | Instância 45 | 100 | 70 | 110 | 3 | 280 |
| G | Instância 46 | 100 | 100 | 220 | 3 | 400 |
| G | Instância 47 | 100 | 120 | 220 | 3 | 480 |
| G | Instância 48 | 100 | 140 | 220 | 3 | 560 |

*Fonte: Autor (2023)*

### 4.1.1 Teste de disponibilidade de operadores

Para realizar o primeiro teste referente a variação da disponibilidade de operadores, os parâmetros de veículos e docas foram controlados para entender somente como a variação de operadores afeta a função objetivo:

TABELA 8 — RESULTADO DA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE OPERADORES

| Tamanho | Instância | T | j | i | k | w | Tempo s | FO | BD | GAP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PP | Instância 1 | 100 | 4 | 10 | 3 | **20** | 1,6 | 45 | 45 | 0 |
| PP | instância 2 | 100 | 4 | 10 | 3 | **16** | 1,5 | 45 | 45 | 0 |
| PP | Instância 3 | 100 | 4 | 10 | 3 | **10** | 22 | 47 | 47 | 0 |
| PP | Instância 4 | 100 | 8 | 10 | 3 | **40** | 1,8 | 30 | 30 | 0 |
| PP | Instância 5 | 100 | 8 | 10 | 3 | **32** | 1,6 | 30 | 30 | 0 |
| PP | Instância 6 | 100 | 8 | 10 | 3 | **24** | 3,7 | 30 | 30 | 0 |
| P | Instância 7 | 100 | 10 | 15 | 3 | **50** | 2,7 | 30 | 30 | 0 |
| P | Instância 8 | 100 | 10 | 15 | 3 | **40** | 2,5 | 30 | 30 | 0 |
| P | Instância 9 | 100 | 10 | 15 | 3 | **30** | 7,1 | 30 | 30 | 0 |
| M | Instância 10 | 100 | 25 | 80 | 3 | **120** | 18,3 | 60 | 60 | 0 |
| M | Instância 11 | 100 | 25 | 80 | 3 | **100** | 26,5 | 60 | 60 | 0 |
| M | Instância 12 | 100 | 25 | 80 | 3 | **80** | 310 | 60 | 60 | 0 |
| G | Instância 13 | 100 | 50 | 110 | 3 | **220** | 25,7 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 14 | 100 | 50 | 110 | 3 | **200** | 26,1 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 15 | 100 | 50 | 110 | 3 | **160** | 130,2 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 16 | 100 | 100 | 220 | 3 | **420** | 206,5 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 17 | 100 | 100 | 220 | 3 | **400** | 246 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 18 | 100 | 100 | 220 | 3 | **380** | 286,7 | 45 | 45 | 0 |

*Fonte: Autor (2023)*

Os testes foram divididos em grupos de três, e a cada instância testada do grupo foi reduzido a quantidade de operadores do total. Percebe-se que quando há redução de operadores há um aumento do tempo computacional, mas não necessariamente altera o *makespan*. Ainda com o aumento das instâncias, o tempo computacional é elevado, mas não surge *GAPs* na função objetivo.

### 4.1.2 Teste de quantidade de veículos

Para realizar os testes relativos à variação de veículos foram testadas 18 instâncias, também variando em grupos de três e mantendo os demais parâmetros fixos:

TABELA 9 — RESULTADO DA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE VEÍCULOS

| Tamanho | Instância | T | j | i | k | w | Tempo s | FO | BD | GAP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PP | Instância 19 | 100 | 4 | **10** | 3 | 16 | 1,5 | 45 | 45 | 0 |
| PP | Instância 20 | 100 | 4 | **12** | 3 | 16 | 1,4 | 45 | 45 | 0 |
| PP | Instância 21 | 100 | 4 | **14** | 3 | 16 | 2,1 | 60 | 60 | 0 |
| PP | Instância 22 | 100 | 8 | **10** | 3 | 32 | 1,7 | 30 | 30 | 0 |
| PP | Instância 23 | 100 | 8 | **12** | 3 | 32 | 2,1 | 30 | 30 | 0 |
| PP | Instância 24 | 100 | 8 | **14** | 3 | 32 | 2,3 | 30 | 30 | 0 |
| PP | Instância 25 | 100 | 10 | **10** | 3 | 40 | 1,6 | 15 | 15 | 0 |
| P | Instância 26 | 100 | 10 | **15** | 3 | 40 | 2,7 | 30 | 30 | 0 |
| P | Instância 27 | 100 | 10 | **25** | 3 | 40 | 4,3 | 45 | 45 | 0 |
| M | Instância 28 | 100 | 25 | **80** | 3 | 100 | 25,2 | 60 | 60 | 0 |
| M | Instância 29 | 100 | 25 | **90** | 3 | 100 | 31,5 | 60 | 60 | 0 |
| M | Instância 30 | 100 | 25 | **105** | 3 | 100 | 38,6 | 75 | 75 | 0 |
| G | Instância 31 | 100 | 50 | **110** | 3 | 200 | 38,2 | 75 | 75 | 0 |
| G | Instância 32 | 100 | 50 | **130** | 3 | 200 | 22,1 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 33 | 100 | 50 | **155** | 3 | 200 | 27,6 | 60 | 60 | 0 |
| G | Instância 34 | 100 | 100 | **220** | 3 | 400 | 245,2 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 35 | 100 | 100 | **250** | 3 | 400 | 293,5 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 36 | 100 | 100 | **320** | 3 | 400 | 395,7 | 60 | 60 | 0 |

*Fonte: Autor (2023)*

Ao analisar os testes referentes a variação de veículos, percebe-se que houve um aumento no *makespan*. Quando não há mais possibilidade para veículos serem descarregados em paralelo há criação de filas, fazendo com que haja este aumento. O tempo computacional não varia da mesma forma que acontece com a redução de operadores, entretanto ao aumentar o tamanho da instancia o tempo computacional também é acrescido.

### 4.1.3 Teste de quantidade de docas

A variação das docas também foi analisada para entender o quanto impacta no *makespan e* tempo computacional. Para esta análise, foi considerado uma regra para não alterar a quantidade de operadores por doca. A regra implementada é a multiplicação da quantidade de operadores do modo três (tabela 3) com o número de docas de cada instância, assim a quantidade de operadores por doca permanece igual. Se caso haja aumento de docas sem variação dos operadores, ter-se-ia uma alteração da alocação dos operadores influenciado pelo número total disponível da mão de obra, mas não pelo número de docas. Para explicitar este comportamento, foi comparado a variação da alocação dos operadores entre as instância 37 e 38, e a 37 com mais uma instância que aumenta a quantidade de docas, mas permanece com a mesma quantidade de operadores:

FIGURA 5 — ALOCAÇÃO DE 4 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 16 OPERADORES (INSTÂNCIA 37)

| *Veículo i* | t0 | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | t10 | t11 | t12 | t13 | t14 | t15 | t16 | t17 | t18 | t19 | t20 | t21 | t22 | t23 | t24 | t25 | t26 | t27 | t28 | t29 | t30 | t31 | t32 | t33 | t34 | t35 | t36 | t37 | t38 | t39 | t40 | t41 | t42 | t43 | t44 | t45 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |

*Fonte: Autor (2023)*

FIGURA 6 — ALOCAÇÃO DE 8 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 32 OPERADORES (INSTÂNCIA 38)

| *Veículos i* | t0 | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | t10 | t11 | t12 | t13 | t14 | t15 | t16 | t17 | t18 | t19 | t20 | t21 | t22 | t23 | t24 | t25 | t26 | t27 | t28 | t29 | t30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |

*Fonte: Autor (2023)*

Percebe-se que a diferença da alocação entre a instância 37 e 38 é exclusivamente influenciada pelo número de docas, sem interferência da quantidade de operadores. Entretanto, ao comparar a figura 7, onde não há variação de operadores, com a figura 5, percebe-se que a alocação dos operadores é influenciada pela quantidade disponível de mão de obra, afetando diretamente o *makespan:*

FIGURA 7 — ALOCAÇÃO DE 8 DOCAS, 10 VEÍCULOS E 16 OPERADORES

| *Veiculos i* | t0 | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | t10 | t11 | t12 | t13 | t14 | t15 | t16 | t17 | t18 | t19 | t20 | t21 | t22 | t23 | t24 | t25 | t26 | t27 | t28 | t29 | t30 | t31 | t32 | t33 | t34 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 5 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 |

*Fonte: Autor (2023)*

Portanto, para esta pesquisa, foi considerada a regra descrita para realizar a análise da variação de docas.

TABELA 10 — RESULTADO DA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE DOCAS

| Tamanho | Instância | T | j | i | k | w | Tempo s | FO | BD | GAP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PP | Instância 37 | 100 | **4** | 10 | 3 | 16 | 1,5 | 45 | 45 | 0 |
| PP | Instância 38 | 100 | **8** | 10 | 3 | 32 | 1,8 | 30 | 30 | 0 |
| PP | Instância 39 | 100 | **10** | 10 | 3 | 40 | 1,6 | 15 | 15 | 0 |
| M | Instância 40 | 100 | **25** | 80 | 3 | 100 | 26,2 | 60 | 60 | 0 |
| M | Instância 41 | 100 | **30** | 80 | 3 | 120 | 11,5 | 45 | 45 | 0 |
| M | Instância 42 | 100 | **35** | 80 | 3 | 140 | 13,3 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 43 | 100 | **50** | 110 | 3 | 200 | 25,1 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 44 | 100 | **60** | 110 | 3 | 240 | 19,8 | 30 | 30 | 0 |
| G | Instância 45 | 100 | **70** | 110 | 3 | 280 | 21,6 | 30 | 30 | 0 |
| G | Instância 46 | 100 | **100** | 220 | 3 | 400 | 244,8 | 45 | 45 | 0 |
| G | Instância 47 | 100 | **120** | 220 | 3 | 480 | 52,2 | 30 | 30 | 0 |
| G | Instância 48 | 100 | **140** | 220 | 3 | 560 | 77,3 | 30 | 30 | 0 |

*Fonte: Autor (2023)*

Para a variação de docas, com o aumento do número há uma redução do *makespan* pois há mais veículo sendo descarregados em paralelo. Ainda, dos testes realizados, a única instancia que aumentou o tempo computacional com o aumento das docas foi a instancia 48, devido ao tamanho.

# 5 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, foi proposto um modelo exato para o Problema da Alocação da Força de Trabalho para o processo de descarga num centro de distribuição com *cross-docking*. A configuração apresentou um método para alocar a força de trabalho para a otimização do *makespan*, sendo um complemento para o Problema de Agendamento de Veículos.

Dentro da literatura, o Problema de Agendamento de Veículos mostrou-se com oportunidades principalmente no quesito alocação da força de trabalho. Como descrito, muito das pesquisas realizadas ainda negligenciam a alocação dos operadores nos processos de descarga. Então, o intuito do modelo matemático elaborado foi otimizar esta decisão dentro dos centros de distribuição com *cross-docking*. Ainda, todos os trabalhos listados na revisão bibliográfica que alocam a força de trabalho, realizaram esta decisão junto ao agendamento de veículos. Diferentes destes, esta pesquisa desenvolveu o modelo matemático para a solução exclusiva do Problema de Alocação da Força de Trabalho. Então, para os gestores que somente querem implementar um novo modelo de decisão para a alocação de operadores, tornou-se possível. Além disso, devido a flexibilidade de alocar somente os operadores, o modelo matemático também pode ser uma opção para realizar o mesmo processo no setor de expedição.

A parte exata da solução proposta foi resolvida pelo GUROBI através do Visual Studio, com programação controlada na linguagem C#. Foram implementadas restrições referente a quantidade de operadores para conseguir planejar operacionalmente a alocação da mão de obra disponível no TCD.

Com os resultados, foi possível identificar uma nova forma para alocar a força de trabalho e entender quais dos parâmetros influenciam mais a alocação dos operadores. Conforme as comparações, nota-se que o modelo matemático necessita de mais tempo para conseguir alocar a mão de obra quando há menos operadores disponíveis. Já para o aumento da quantidade de veículos ou docas, não apresentou um divergência grande. Além disso, todas as instâncias testadas convergiram para o ótimo global.

Portanto, o trabalho possibilitou para os gestores alocarem a mão de obra de maneira mais assertiva em um tempo computacional pequeno. Ainda, contribuindo para as atividades de *cross-docking* para dentro dos TCD, acompanhando as pesquisas e as práticas atuais de operações.

Sugestão para trabalhos futuros:

- Inclusão do custo de mão de obra e análise da ociosidade de operadores, para monetizar o valor do recurso;
- Adaptar o modelo ao setor de expedição do TCD, para otimizar os carregamentos;
- Incluir outros recursos junto a mão de obra para otimizar as descargas, como paletes, empilhadeiras ou esteireiras, para assim entender o impacto que estes têm nos processos de *cross-docking*;
- Aprimorar os estudos dos modos de trabalho, com finalidade de se aproximar mais das decisões reais do gestor;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ballou, R. H., 2004. Ronald H. Bailou. In **Business logistics/supply chain management : planning, organizing, and controlling the supply chain.**

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

Boysen, N., Fedtke, S., & Weidinger, F., 2017. **Truck scheduling in the postal service industry**. Transportation Science, 51(2), 723–736. https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0722

Boysen, N., & Fliedner, M., 2010. **Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda**. Omega, 38(6), 413–422. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2009.10.008

Daniels, R. L., Hoopes, B. J., & Mazzola, J. B., 1996. **Scheduling Parallel Manufacturing Cells with Resource Flexibility**. September 2015.

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. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2015.09.049

Higginson, J. K., & Bookbinder, J. H. Distribution centres in supply chain operations. **Logistics Systems: Design and Optimization,** June 2015, 67–91. https://doi.org/10.1007/0-387-24977-X_3

Konur, Dincer, & Golias, M. M. (2017). ScienceDirect Konur, D., & Golias, M. M, 2017. **Loading Time Flexibility in Cross-docking Systems**. Procedia Computer Science, 114, 491–498. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.011Loading Time Flexibility in C. Procedia Computer Science, 114, 491–498. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.011

Konur, Dinçer, & Golias, M. M.,2013. **Analysis of different approaches to cross-dock truck scheduling with truck arrival time uncertainty.** Computers & Industrial Engineering, 65(4), 663–672. https://doi.org/10.1016/J.CIE.2013.05.009

Ladier, A. L., & Alpan, G., 2016. **Cross-docking operations: Current research versus industry practice**. Omega, 62, 145–162. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2015.09.006

Larbi, R., Alpan, G., Baptiste, P., & Penz, B., 2011. **Scheduling cross docking operations under full, partial and no information on inbound arrivals.** Computers & Operations Research, 38(6), 889–900. https://doi.org/10.1016/J.COR.2010.10.003

Liao, T. W., Egbelu, P. J., & Chang, P. C., 2013. **Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door cross docking operations**. International Journal of Production Economics, 141(1), 212–229. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2012.03.037

Mohtashami, A., 2015. **Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks**. Applied Soft Computing, 36, 468–486. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2015.07.021

Molavi, D., Shahmardan, A., & Sajadieh, M. S. , 2018. **Truck scheduling in a cross docking systems with fixed due dates and shipment sorting.** Computers & Industrial Engineering, 117, 29–40. https://doi.org/10.1016/J.CIE.2018.01.009

Shakeri, M., Low, M. Y. H., & Zhengping, L. , 2008. **A generic model for crossdock truck scheduling and truck-to-door assignment problems**. IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 857–864. https://doi.org/10.1109/INDIN.2008.4618221

Shakeri, M., Yoke, M., Low, H., John, S., & Wah, E., 2012. **A robust two-phase heuristic algorithm for the truck scheduling problem in a resource-constrained crossdock**. Computers and Operation Research, 39(11), 2564–2577. https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.01.002

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. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2019.04.024
Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2012). **Cross-docking: State of the art.** Omega, 40(6), 827–846. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2012.01.005

Wolff, P., Emde, S., & Pfohl, H. C. ,2021. **Internal resource requirements: The better performance metric for truck scheduling?** Omega, 103, 102431. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2021.102431

Yu, W., & Egbelu, P. J. ,2008. **Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage.** European Journal of Operational Research, 184(1), 377–396. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2006.10.047