



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Especialização em Ciência de Dados



# **Heurística para o problema de alocação de cargas de produtos siderúrgicos acabados via modal rodoviário**

**Henrique Moreira Lustosa de Souza**  
**Igor Barros Mairinck**  
**Leonardo Miaki**  
**Thiago Henrique Marques de Menezes**

João Monlevade, MG  
2024

Henrique Moreira Lustosa de Souza  
Igor Barros Mairinck  
Leonardo Miaki  
Thiago Henrique Marques de Menezes

## **Heurística para o problema de alocação de cargas de produtos siderúrgicos acabados via modal rodoviário**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Ciência de Dados do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados.

Orientador: Prof. Dr. Paganini Barcellos de Oliveira

João Monlevade, MG

2024

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M228h Mairinck, Igor Barros.

Heurística para o problema de alocação de cargas de produtos siderúrgicos acabados via modal rodoviário. [manuscrito] / Igor Barros Mairinck. et al. - 2024.

64 f.

Orientador: Prof. Dr. Paganini Oliveira.

Produção Científica (Especialização). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Armazenamento e transporte de carga. 2. Heurística. 3. Siderurgia. 4. Transporte rodoviário de carga. I. Menezes, Thiago Henrique Marques de. II. Miaki, Leonardo. III. Souza, Henrique Moreira Lustosa de. IV. Oliveira, Paganini. V. Universidade Federal de Ouro Preto. VI. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Henrique Moreira Lustosa de Souza**

**Igor Barros Mairinck**

**Leonardo Miaki**

**Thiago Henrique Marques de Menezes**

### **Heurística para o problema de alocação de cargas de produtos siderúrgicos acabados via modal rodoviário**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Ciência de Dados da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados.

Aprovada em 08 de fevereiro de 2024

#### Membros da banca

Doutor - Paganini Barcellos de Oliveira - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Doutor - Thiago Augusto de Oliveira Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Doutor - Allexandre Fortes da Silva Reis - Universidade Federal de São João del-Rei

Paganini Barcellos de Oliveira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Paganini Barcellos de Oliveira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/02/2024, às 08:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0666842** e o código CRC **13B1F7DE**.

# Agradecimentos

Agradecemos profundamente à empresa e à universidade pela valiosa oportunidade concedida para a expansão de nossos conhecimentos, permitindo-nos aplicá-los de maneira prática em um contexto real.

Gostaríamos de expressar nossa gratidão especial àqueles que estiveram mais próximos ao longo desta jornada, contribuindo significativamente para o desenvolvimento deste trabalho. Aos Professores Paganini B. de Oliveira, Alexandre X. Martins e Thiago A. de O. Silva, e aos nossos colegas da área empresarial, especialmente da gerência de Logística Integrada, Marco Bonelli, Clayton Marcio, Elison Edson, Samuel Gandra, Rafael Ávila, Guilherme Castro, Marcelo Coriolano, Magno Frade, Tancredo Patrocínio, Eri da Silva .

Agradecemos à equipe de Suprimentos da empresa, nas pessoas do João Paulo e Gilson Antônio, interessados e parceiros nesse tema.

Um reconhecimento especial é dedicado ao suporte da equipe de Tecnologia da Informação da empresa, em particular, aos colegas André Melo, André Sampaio, Elaine Regia, Rodrigo Dias, Jefferson Souza, Artur Freitas, Prisciany Machado e Alexandre Farah.

Expressamos nossa gratidão aos “padrinhos internos” da empresa, Heuler Moreira, Fausto Figueiredo, Cleider Costa, Maurício César P. Rodrigues e Humberto Marin, que reforçaram a importância deste trabalho, compreendendo profundamente sua relevância dentro da organização.

Este trabalho não seria o mesmo sem o apoio fundamental desses mais que colegas, verdadeiros parceiros da empresa e da Universidade Federal de Ouro Preto. Agradecemos sinceramente por tornarem esta jornada ainda mais enriquecedora.

# Resumo

Este trabalho aborda o Problema de Alocação de Cargas Heterogêneas de produtos siderúrgicos acabados por meio do modal rodoviário, com foco na proposição de uma heurística construtiva para resolução do problema. O estudo se inicia a partir da caracterização e descrição das particularidades operacionais relacionadas à alocação dessas cargas no assoalho dos veículos, bem como são apresentada algumas das limitações e simplificações adotadas para a realização do estudo. A etapa seguinte consiste na construção da heurística, seguida pela realização de um conjunto de experimentos computacionais para validar e avaliar a capacidade de geração de boas soluções para diferentes instâncias do problema, considerando questões como o total de itens e a soma dos pesos alocados aos veículos e o percentual de frete morto dos veículos. Os resultados computacionais mostram que, em geral, quando se analisa as melhores soluções a partir dos indicadores de desempenho estudados, não é possível estabelecer uma relação de dominância para uma solução exclusiva. Além disso, constatou-se que alguns parâmetros da heurística como o número de iterações e o total de tentativas de alocação de itens aos veículos, pode contribuir para a obtenção de melhores soluções. Por fim, são apresentadas as principais conclusões e contribuições do trabalho, bem como um conjunto de sugestões para pesquisas futuras.

**Palavras-chaves:** Problema de alocação de cargas heterogêneas. Cargas metálicas. Heurística construtiva.

# Abstract

This work addresses the Heterogeneous Loads Allocation Problem of finished steel products through road transport, focusing on proposing a constructive heuristic to solve the problem. The study begins with the characterization and description of the operational particularities related to the allocation of these loads on the vehicle floor, as well as presenting some of the limitations and simplifications adopted to carry out the study. The next step consists of building the heuristic, followed by carrying out a set of computational experiments to validate and evaluate the ability to generate better solutions for different instances of the problem, considering issues such as the total number of items and the sum of the weights allocated to the vehicles and the percentage of dead vehicle freight. The computational results show that, in general, when analyzing the best solutions based on the performance indicators studied, it is impossible to establish a dominance relationship for an exclusive solution. Furthermore, it was found that some heuristic parameters, such as the number of iterations and the total number of attempts to allocate items to vehicles, can contribute to obtaining better solutions. Finally, the main conclusions and contributions of the work are presented, as well as a set of suggestions for future research.

**Keywords:** Heterogeneous loads allocation problem. Steel cargo. Constructive heuristic.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa mental que descreve as etapas metodológicas da pesquisa . . . . .	10
Figura 2 – Topologia geral da solução . . . . .	12
Figura 3 – Imagem da planilha de disponibilidade de veículos . . . . .	13
Figura 4 – Fluxo carregamento do processo de expedição . . . . .	15
Figura 5 – Agregação de Unidade Metálica (UM)s em veículos . . . . .	16
Figura 6 – Fluxograma do processo de expedição de UMs . . . . .	18
Figura 7 – Fluxograma que representa a sequência de tomadas de decisão da heurística	21
Figura 8 – Mapa das funções da heurística - Parte 1 . . . . .	24
Figura 9 – Mapa das funções da heurística - Parte 2 . . . . .	25
Figura 10 – Exemplo de um veículo carregado com 3 itens em um <i>bucket</i> . . . . .	29
Figura 11 – Exemplo de saída da heurística ordenada pela melhor solução em relação ao total de itens alocados, quando o total de iterações ( $n$ ) é igual a 20 . . . . .	33
Figura 12 – Saída tabulada da heurística, ordenada pela sequência de iterações de 0 a 19	34
Figura 13 – Indicador de saída que registra a soma de itens alocados por iteração . . . . .	35
Figura 14 – Indicador de saída que registra a soma de peso alocado por iteração . . . . .	35
Figura 15 – Indicador de saída que registra o percentual de frete morto médio por iteração	36
Figura 16 – Hierarquia circular de decisão dos <i>Key Performance Indicator</i> (KPI)s para uso como critério de desempate . . . . .	38

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Capacidade de carga dos veículos . . . . .	13
Tabela 2 – Características das instâncias propostas para o trabalho . . . . .	32
Tabela 3 – Melhores valores dos indicadores de desempenho monitorados, considerando todas as soluções obtidas ao variar o número de iterações ( $n$ ) em 100, 200 e 400, para 10 diferentes sementes . . . . .	40
Tabela 4 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro $t$ para a instância 1 com $n = 100$ . . . . .	42
Tabela 5 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro $t$ para a instância 2 com $n = 100$ . . . . .	42
Tabela 6 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro $t$ para a instância 3 com $n = 100$ . . . . .	42
Tabela 7 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro $t$ para a instância 4 com $n = 100$ . . . . .	43
Tabela 8 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro $t$ para a instância 5 com $n = 100$ . . . . .	43

# Lista de quadros

Quadro 1 – Conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo matemático . . . . .	28
---	----

# Lista de abreviaturas e siglas

**2L-CVRP** *Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints*

**3L-CVRP** *Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-dimensional Loading Constraints*

**ERP** *Enterprise Resource Planning*

**KPI** *Key Performance Indicator*

**OV** Ordem de Venda

**PA** Produto Acabado

**PCV** Problema de Carregamento de Veículo

**PE** Programa de Embarque

**SAP** *System Applications and Products*

**SKU** *Stock Keeping Unit*

**UM** Unidade Metálica

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>2</b>
1.1.1	Objetivos específicos	2
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Problema de alocação de cargas em sistemas logísticos</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Técnicas de solução para o problema de alocação de carga</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Classificação metodológica da pesquisa</b>	<b>8</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimentos metodológicos</b>	<b>9</b>
3.2.1	Procedimentos para se obter os resultados da pesquisa	11
3.2.2	Levantamento e organização de dados	12
3.2.3	Ferramentas e pacotes computacionais	14
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>Descrição do processo da alocação de cargas</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA</b>	<b>20</b>
<b>5.1</b>	<b>Sequência de tomadas de decisão da heurística</b>	<b>20</b>
<b>5.2</b>	<b>A heurística no ambiente computacional</b>	<b>23</b>
5.2.1	Distribuição da carga no caminhão	27
<b>5.3</b>	<b>Simplificações e limitações do método de solução</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>31</b>
<b>6.1</b>	<b>Caracterização das instâncias</b>	<b>31</b>
<b>6.2</b>	<b>Dados de saída da heurística</b>	<b>32</b>
<b>6.3</b>	<b>Experimentos computacionais</b>	<b>36</b>
6.3.1	Análise de indicadores de desempenho em função do número de iterações da heurística	39
6.3.2	Análise da alteração no parâmetro que estabelece o número de tentativas de alocação de itens aos veículos	41
6.3.3	Discussão dos resultados em função do processo real	44
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>46</b>

<b>7.1</b>	<b>Trabalhos futuros</b> . . . . .	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>49</b>

# 1 Introdução

Segundo [Reis \(2017\)](#) as empresas, de maneira geral, buscam apresentar um conjunto de atributos de valor em seus produtos/serviços para despertar nos consumidores a sensação de maior grau de qualidade dos bens ofertados. Por outro lado, a qualificação dos produtos/serviços podem resultar em custos adicionais para os produtores, considerando os diversos elos da cadeia de suprimentos, o que pode comprometer a margem de retorno esperado pela organização e tornar a disputa pelo cliente ainda mais acirrada no mercado em questão ([REIS, 2017](#)).

Dentre os diversos tipos de custos vinculados aos processos produtivos, destaque para os custos logísticos, que incluem todas as questões vinculadas a movimentação dos mais variados tipos de insumos, que vão desde a compra de matéria-prima, armazenagem, utilização e movimentação desses itens ao longo do processo produtivo, até a entrega e atendimento do cliente final e uma empresa ([ARVIS; RABALLAND; MARTEAU, 2010](#)). Em especial, os custos de transporte representam cerca de 51% dos custos logísticos totais, o que, conseqüentemente, afeta de forma direta o custo unitário e o preço dos produtos ofertados ([FERNANDES, 2019](#)). Por se tratar de um percentual relevante, entende-se que tal informação não possa ser negligenciada pelos gestores das empresas, uma vez que eles são os responsáveis por conduzir os processos de tomadas de decisão sobre o tema.

Conforme [De Lima, Fernandes e Oliva \(2019\)](#), as tomadas de decisão envolvem uma série de *trade-offs*. Assim, escolher uma dentre as várias alternativas de solução do problema, torna-se uma tarefa difícil, mas que pode impactar positivamente o resultado da organização. Este processo de escolha pode ser uma tarefa complexa em função da dependência de questões subjetivas vinculadas aos responsáveis pela tomada de decisão e outros tipos de fatores internos e externos à organização. Ademais, [De Lima, Fernandes e Oliva \(2019\)](#) destacam que o horizonte de tempo, por se um fator limitante, também tende a impactar significativamente a definição de uma boa escolha, ou a melhor escolha possível, para a solução de um problema.

Quando se fala na proposição de boas soluções para resolução de problemas logísticos no escopo de empresas vinculadas ao primeiro setor, tal como explorado neste trabalho, a busca por estratégias e ferramentas de otimização exatas ([DUTTA; FOURER, 2001](#)) ou aproximadas ([KORZENOWSKI \*et al.\*, 2023](#)) tende a ser uma boa estratégia empresarial. Mais especificamente, quando se deseja estudar questões logísticas associadas a alocação de carga de produtos acabados, deve-se ter em mente que o grau de complexidade do problema, em função do elevado número de variáveis como o tipo de carga, o tipo de veículo, a capacidade de carga do veículo, a posição dos produtos em cada veículo, a definição de rotas e o tempo disponível para a tomada de decisão tornam essa tarefa ainda mais desafiadora ([KORZENOWSKI \*et al.\*, 2023](#)).

Diversos estudos têm abordado a otimização da alocação de cargas em diferentes contextos logísticos, como em terminais de contêineres (BIERWIRTH; MEISEL, 2010; KORZENOWSKI *et al.*, 2023), otimização inteira em alocação de cargas metálicas (bobinas) e sequenciamento em veículos rodoviários (DA SILVA NETO, 2013), problemas de roteamento de veículos com múltiplos usos (TAILLARD; LAPORTE; GENDREAU, 1996), bem como o uso de meta-heurísticas e outras técnicas aproximadas baseadas em procedimentos de refinamento de soluções via buscas locais para diferentes variantes de problemas de transporte e alocação de carga (LIU, 2013; FERNANDES, 2019; SÁNCHEZ-ORO; LÓPEZ-SÁNCHEZ; COLMENAR, 2020).

No ambiente estudado, atualmente, boa parte do processo de tomada de decisão em relação a questões associadas à alocação de carga de produtos acabados (cargas metálicas), se baseia em um conjunto de dados disponíveis no sistema de gestão da empresa e na experiência dos operadores que atuam no setor. Tal situação torna o processo ainda mais complexo e suscetível a erros humanos, podendo acarretar em subutilização de recursos e ineficiência operacional. Além disso, por se tratar de uma empresa siderúrgica brasileira, o modal rodoviário acaba sendo o principal meio de escoamento da produção, o que torna as tomadas de decisão ainda mais complexas (BETARELLI; DOMINGUES; HEWINGS, 2020). Assim, entende-se que um caminho para superar esses desafios seja o uso de técnicas de otimização exatas e/ou aproximadas.

Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso aborda a proposição de uma heurística que permita auxiliar nos processos de tomadas de decisão vinculados ao sistema de alocação de cargas metálicas em veículos rodoviários de uma empresa siderúrgica de aços especiais, localizada no interior de Minas Gerais, considerando um conjunto de dados e restrições internas à organização, que inclui o peso, o volume, a forma, a localização e a área ocupada pela carga, bem como informações externas à empresa, como a frota e o tipo de veículos disponível, a capacidade de peso e área dos veículos, as condições de embalagem requeridas, e a ordem de prioridade de atendimento dos clientes, em função do no horizonte de tempo disponível e a macrorregião do destino final.

## 1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral propor um algoritmo heurístico do tipo construtivo capaz de modelar e resolver o problema de programação do escoamento de cargas metálicas de uma siderúrgica de aços especiais, considerando um conjunto de dados e restrições internas e externas à organização.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir esse objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Descrever e caracterizar o problema e suas particularidades operacionais vinculadas ao processo de escoamento das cargas metálicas produzidas pela empresa;
- Elaborar uma heurística capaz de representar e resolver o problema e em tempo apropriado;
- Propor e analisar um conjunto de testes computacionais capazes de validar e mostrar a eficácia do algoritmo desenvolvido.

## 1.2 Justificativa

Embora o sistema *Enterprise Resource Planning (ERP)* adotado pela empresa, o *System Applications and Products (SAP)*, permita o controle de entrada e saída de materiais na expedição, as etapas do processo de alocação e sequenciamento dos itens nos caminhões, anteriores ao carregamento, ainda prevalecem sendo realizadas com base na interpretação e capacidade de análise técnica do responsável do setor, adquirida ao longo do tempo. Tal situação pode levar a riscos de ineficiência no uso dos recursos. Como exemplo, pode-se citar situações em que alguns caminhões possam sair abaixo ou um pouco acima da capacidade de carga, acarretando em custos adicionais.

Assim, espera-se que com a proposição de uma ferramenta computacional, capaz de auxiliar no processo de construção de boas soluções, e que atendam aos requisitos mínimos exigidos, permita melhorar a performance da empresa em decisões de alocação dos recursos, redução da capacidade ociosa dos caminhões e, conseqüentemente, redução de custos. Além disso, a heurística proposta poderá fornecer *insights* valiosos para aprimoramento contínuo da gestão do sistema logístico, tornando-a mais eficiente.

Ademais, espera-se que haja também uma melhora no sistema de alocação com base nas soluções propostas pelo algoritmo, o que poderá contribuir na rotina de serviço do responsável pelo setor, liberando-o para a realização de outras atividades-chave para a organização, o que justifica a proposta deste trabalho.

## 1.3 Organização do Trabalho

Visando cumprir com os objetivos propostos, os demais capítulos deste trabalho estão organizados conforme descrito a seguir. O Capítulo 2 tem como objetivo demonstrar as bases teóricas que elucidam conceitos abordados no trabalho, disponíveis em diferentes repositórios da internet, e que servirão de alicerce para a pesquisa. O Capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos com o qual o trabalho foi moldado. O Capítulo 4 tem como propósito descrever e caracterizar o ambiente estudado e o processo de carregamento das cargas metálicas, bem como apresentar algumas das limitações e simplificações adotadas. O capítulo 5 apresenta a heurística desenvolvida para o problema, assim como o Capítulo 6 sumariza os resultados computacionais obtidos no processo de validação e testes do algoritmo proposto. Por fim, o Capítulo 7 expõe as considerações finais, resgata quais foram as principais contribuições do trabalho e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão da Literatura

De forma a buscar entender como está registrado na literatura técnico-científica que trata de problemas análogos ao estudado no presente trabalho, foram levantados um conjunto de trabalhos que abordam o problema de alocação de carga e algumas de suas variantes, bem como diferentes abordagens de resolução dos problemas, baseadas em métodos de modelagem matemática, otimização (exata e/ou aproximada) e simulação.

### 2.1 Problema de alocação de cargas em sistemas logísticos

De acordo com [Fernandes \(2019\)](#), a logística é uma área que abrange a gestão estratégica da transferência e armazenamento de materiais, componentes e produtos acabados, desde os fornecedores até os consumidores. Um dos desafios enfrentados nesse contexto é o controle dos custos de movimentação dos recursos ao longo de toda a cadeia de suprimentos, em especial os custos de transporte, os quais representam a maior parte dos custos logísticos totais de uma organização, e podendo variar de um a dois terços deste valor ([FERNANDES, 2019](#)). Neste contexto, a busca por uma estratégia mais eficiente para a gestão de questões logísticas acaba por envolver o aprimoramento de atividades de carregamento dos veículos, alocação e distribuição de carga, critérios e restrições de atendimento dos clientes, entre outros elementos que estão interligados ao problema ([KORZENOWSKI \*et al.\*, 2023](#)).

O carregamento dos veículos, no caso da utilização de caminhões, é um processo que envolve decisões como a forma de organização da carga, possibilidade ou não de empilhamento dos itens e a distribuição do peso por eixo, por exemplo ([DOS SANTOS \*et al.\*, 2016](#)). Assim, pode-se dizer que na fase de carregamento, é crucial posicionar os produtos de maneira adequada, considerando limitações de peso e distribuição equilibrada para garantir a segurança durante o transporte ([DOS SANTOS \*et al.\*, 2016](#)).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, [De Araújo e Armentano \(2007\)](#) argumentam que o problema de alocação de cargas se mostra um assunto importante e estratégico em empresas cujas atividades logísticas envolvem armazenamento, distribuição e/ou coleta de mercadorias, por estar orientado a propor soluções que permitam um melhor aproveitamento do espaço e capacidade disponível dos veículos, visando a redução de custo e tempo na carga e descarga. Assim, para melhor alocação de cargas é preciso entender as restrições e complexidades dos veículos que serão utilizados no transporte das cargas.

O problema de roteamento de veículos capacitados com restrições de carregamento bidimensional (IORI; SALAZAR-GONZÁLEZ; VIGO, 2007), também conhecido como *Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints (2L-CVRP)*, por exemplo, trata da presença de veículos com compartimentos retangulares destinados ao transporte, os quais devem ser ocupados pelos produtos de variadas dimensões solicitados pelos clientes. O 2L-CVRP ocorre na prática quando os itens não podem ser empilhados uns sobre os outros, devido às suas fragilidades ou formas (FERNANDES, 2019).

Gendreau *et al.* (2006) propuseram uma variante do 2L-CVRP que opera que que incorpora a complexidade do empilhamento da carga, também conhecida como *Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-dimensional Loading Constraints (3L-CVRP)*. Em ambas variantes, o Problema de Carregamento de Veículo (PCV) envolve a alocação otimizada de cargas na carroceria de um veículo, visando a maximização de critérios como a capacidade de carga, enquanto respeita as restrições do problema.

Segundo Marciano (2023) o PCV é frequentemente modelado como um Problema de Empacotamento ou como um Problema de Carregamento de Contêineres. Tratam-se de problemas combinatórios de otimização que envolvem a organização de itens dentro dos ambientes de carga, seguindo condições específicas que podem envolver a dimensionalidade, o tipo de atribuição, o sortimento de itens e/ou objetos, e a forma dos itens (MARCIANO, 2023).

## 2.2 Técnicas de solução para o problema de alocação de carga

Ao investigar sobre as técnicas e métodos de solução mais utilizadas para o PCV e algumas de suas variantes, foi constatado que, a depender do grau de complexidade do problema e do objetivo da pesquisa, é possível utilizar estratégias que vão desde o uso de simuladores (DOS SANTOS *et al.*, 2016) até algoritmos heurísticos (DE ARAÚJO; ARMENTANO, 2007; DA SILVA NETO, 2013; FERNANDES, 2019) para problemas mais robustos e métodos exatos de otimização no caso de variantes mais simplificadas (MARCIANO, 2023).

Dos Santos *et al.* (2016), por exemplo, estudaram um problema problema de carregamento de caminhões sob a perspectiva de um modelo de simulação de eventos discretos, estruturado dentro do software Anylogic 7.3, com o objetivo avaliar diferentes cenários de interesse e a utilização dos recursos produtivos em cada um deles, em uma tentativa de visualizar as necessidades de investimento e possíveis reduções dos custos operacionais. Além disso, Dos Santos *et al.* (2016) destacam que a simulação de eventos discretos oferece a chance de experimentar diversas situações sem a necessidade de aplicação prática imediata, permitindo a análise dos tempos de espera, períodos de carregamento dos caminhões e movimentação de notas fiscais.

No estudo conduzido por [De Araújo e Armentano \(2007\)](#) é examinada e proposta a utilização de uma heurística construtiva que se baseia na utilização de múltiplas soluções iniciais aleatórias para o Problema de Carregamento de Contêineres. O processo de alocação das cargas no algoritmo desenvolvido por [De Araújo e Armentano \(2007\)](#) se baseia na organização de cuboides<sup>1</sup>, selecionados de maneira probabilística, a partir de uma lista restrita de possíveis cargas candidatas. Assim, a ideia consistia em colocar em um único contêiner o máximo de cubos, considerando restrições de orientação, estabilidade e o volume do contêiner.

Em se tratando de utilização de técnicas exatas e heurísticas para variantes do PCV, [Fernandes \(2019\)](#) resolve o Problema Integrado de Carregamento e Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea e Janela de Tempo por meio de um modelo de programação matemática elaborado a partir da junção de diferente modelos da literatura e resolvido via solver CPLEX, bem como uma meta-heurística VNS-VND para o problema. [Fernandes \(2019\)](#) destaca a questão do horizonte de tempo para resolver o problema, que, em alguns casos, será muito maior do que 2 horas para se encontrar a solução ótima do problema, em especial as instâncias de maior dimensão, enquanto o algoritmo VNS-VND apresenta boas soluções em poucos segundos.

[Da Silva Neto \(2013\)](#) estudou uma variante do problema de montagem de cargas casado com um problema de sequenciamento dos caminhões em um centro de distribuição de uma empresa siderúrgica. Como metodologia, a etapa de alocação de cargas foi feita via modelagem matemática em linguagem AMPL com o auxílio do resolvidor comercial CPLEX. As demais partes do problema foram resolvidas de forma aproximada ao utilizar uma heurística integrada com uma relaxação lagrangeana. Essa estratégia de particionar o problema em etapas menos complexas se mostrou uma boa alternativa, uma vez que, os resultados computacionais indicaram uma capacidade relevante de redução do frete morto para algumas instâncias em relação às soluções reais empregadas pela empresa ([DA SILVA NETO, 2013](#)).

Em um trabalho mais recente, [Marciano \(2023\)](#) desenvolveu um algoritmo baseado na meta-heurística Iterated Local Search (ILS), implementado em linguagem Python, para a resolução de 41 diferentes instâncias do Problema Integrado de Carregamento e Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea. Além disso, um modelo matemático baseado no trabalho de [Candido \(2016\)](#) foi utilizado para mostrar o limite alcançado pelo resolvidor comercial CPLEX, considerando um tempo limite de 3 horas de processamento. Para os casos em que o método exato não foi capaz de alcançar a solução ótima em tempo apropriado, verificou-se que o ILS foi capaz de apresentar boas soluções em um curto espaço de tempo, situação essa comum para justificar a escolha de uma heurística para um problema tão complexo ([MARCIANO, 2023](#)).

---

<sup>1</sup> Objetos em formato de cubos, que são utilizados para representar as dimensões da carga no trabalho de [De Araújo e Armentano \(2007\)](#).

## 3 Metodologia

O exame da literatura sumarizado no Capítulo 2 demonstra a complexidade combinatória e computacional vinculada a resolução de problemas de alocação de carga em veículos, em especial, diante de diferentes desafios logísticos que podem estar associados ao problema. Neste sentido, considerando a necessidade da empresa foco deste estudo iniciar um processo de sistematização do processo de tomadas de decisão no setor de alocação de cargas e melhorar a dinâmica do processo, a proposta de metodologia deste trabalho se concentra em elaborar uma heurística construtiva para o problema, conforme descrito nos procedimentos a seguir.

### 3.1 Classificação metodológica da pesquisa

Para enquadrar uma pesquisa científica em relação às características do processo de investigação, levantamento e tratamento de dados e análise dos resultados, [Turrioni e Mello \(2011\)](#) propõem uma classificação baseada na natureza, nos objetivos, na abordagem e no método de pesquisa. Assim, como este trabalho se trata de uma proposta de construção de uma heurística para resolução de um problema real, pode-se dizer que a pesquisa se trata de uma pesquisa de natureza aplicada, com objetivos descritivos e normativos, baseados em uma abordagem empírico-quantitativa, cujo método de solução pertence à área de modelagem e simulação.

Uma pesquisa aplicada é um tipo de investigação que se concentra em resolver problemas práticos ou aplicar conhecimentos teóricos para lidar com desafios do mundo real ([TURRIONI; MELLO, 2011](#)). Geralmente, seu objetivo principal é fornecer soluções úteis e práticas para questões específicas. Esse tipo de pesquisa busca contribuir diretamente para a melhoria de processos, produtos ou práticas em diversos campos, como negócios, ciência e tecnologia.

A pesquisa quantitativa é um método de investigação que se baseia na coleta e análise de dados numéricos e mensuráveis ([BERTRAND; FRANSOO, 2002](#)). Ela se concentra em quantificar fenômenos, variáveis ou relações entre elas, usando técnicas estatísticas. A pesquisa quantitativa é amplamente utilizada para obter informações objetivas e precisas sobre um determinado assunto, permitindo a análise estatística para identificar padrões, tendências e correlações ([BERTRAND; FRANSOO, 2002](#)).

A pesquisa descritiva é um tipo de investigação que tem como objetivo principal a descrição de fenômenos, eventos ou características (TURRIONI; MELLO, 2011). Ela busca responder a perguntas como "o que", "quem", "quando" e "onde". Ademais, a pesquisa descritiva não busca explicar ou avaliar as causas dos fenômenos, mas sim documentá-los de forma detalhada e sistemática. Trata-se de um tipo de pesquisa frequentemente usada para criar um panorama claro e preciso de um tópico de pesquisa, fornecendo uma base sólida para conhecimento sobre o assunto (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018).

Note que, parte da estrutura do trabalho se concentra em caracterizar e apresentar o entendimento do processo de programação e alocação de cargas na área de logística da empresa estudada, obtido por meio de diversas reuniões de escopo, acompanhamento operacional e sessões de *brainstorming*. Ao descrever o processo, a ideia é deixar evidente as particularidades do problema, bem como expor alguns dos desafios e oportunidades de atuação para melhoria do sistema.

Pesquisas classificadas como empírico-normativas são comuns quando se deseja construir soluções baseadas em conhecimento técnico e experimentação, com foco na projeção de resultados (prescrição), a depender das entradas do problema (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018). Neste sentido, como a proposta deste trabalho se baseia no conhecimento dos autores sobre o processo e a capacidade de proposição de um algoritmo que descreva e permita apresentar uma mais configurações de resposta para o problema de alocação de carga de uma siderúrgica de aços especiais, pode-se dizer que a pesquisa tem caráter empírico-normativo.

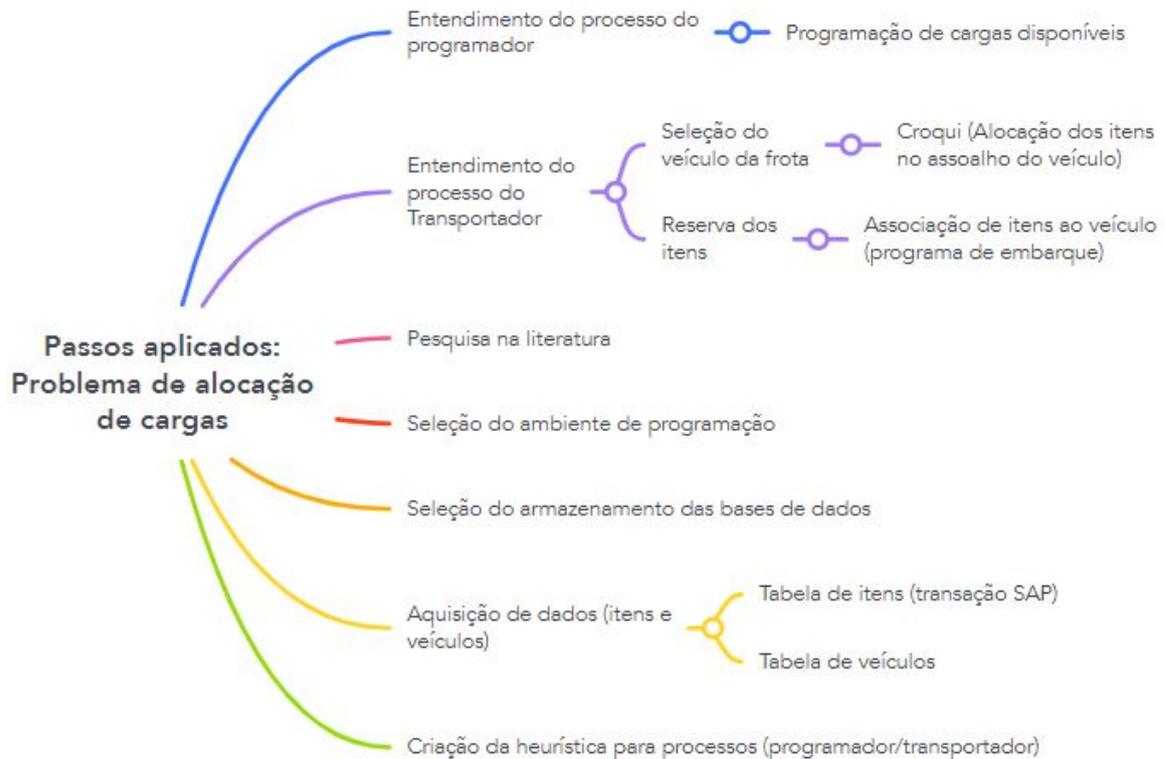
Por fim, em relação ao método, este estudo se propõe a desenvolver uma heurística construtiva, ou seja, aplicar métodos matemáticos aliados à programação computacional a fim de se obter uma solução para o problema de alocação de cargas. Note que, embora o estudo seja focado em uma empresa siderúrgica de aços especiais, é de se esperar que a heurística proposta possa ser adaptada em outros problemas semelhantes de que trabalhem com cargas heterogêneas.

## 3.2 Procedimentos metodológicos

A Figura 1 apresenta um mapa mental que organiza, ilustra e sistematiza o processo de condução das etapas necessárias para o cumprimento dos objetivos desta pesquisa, desde a concepção da ideia até a formulação da heurística e a realização de testes computacionais para validação e análise das soluções obtidas.

O trabalho teve seu início a partir do entendimento em detalhes do processo do programador de área de logística de transporte, realizado por meio de diversas reuniões de entendimento de escopo, acompanhamento operacional, reuniões de *brainstorming*. Nesta etapa, ficou claro algumas das dificuldades e oportunidades vinculadas ao problema.

Figura 1 – Mapa mental que descreve as etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma vez conhecido o ambiente e o processo de tomada de decisão do programador de logística da empresa, a etapa seguinte consistia em conhecer as questões associadas ao processo de seleção dos veículos e criação dos programas de embarque (ou documento de transporte) por parte das empresas transportadoras envolvidas.

Diante disso, a etapa seguinte consistia no levantamento de trabalhos relacionados ao problema, tal como exposto no Capítulo 2 de revisão da literatura. A ideia desse levantamento bibliográfico se sustenta na necessidade de se buscar modelos e métodos de solução para diferentes variantes do problema, bem como entender qual seria o melhor caminho para modelagem e implementação computacional de um método adequado para o objetivo do trabalho, o que resultou na escolha da implementação de uma heurística construtiva.

A escolha de implementação de uma heurística se baseou na necessidade de ter um primeiro ferramental técnico para apoio nas tomadas de decisão, que, de forma rápida apresentá-se boas soluções ao operador. Ademais, é importante destacar que o fato de se ter um problema com muitas particularidades como diversidade de carga (itens heterogêneos), frota de veículos diversificada e vinculada à terceiros, bem como questões de prazos e prioridades de carregamento aumentavam muito o grau de complexidade do problema, o que dificultaria, em um primeiro momento, a elaboração de um modelo matemático para resolução ótima. Essa escolha está alinhada com a proposta de [Dos Santos et al. \(2016\)](#) optaram pelo desenvolvimento de uma heurística para uma variante do problema de alocação de roteirização de carga, o **3L-CVRP**.

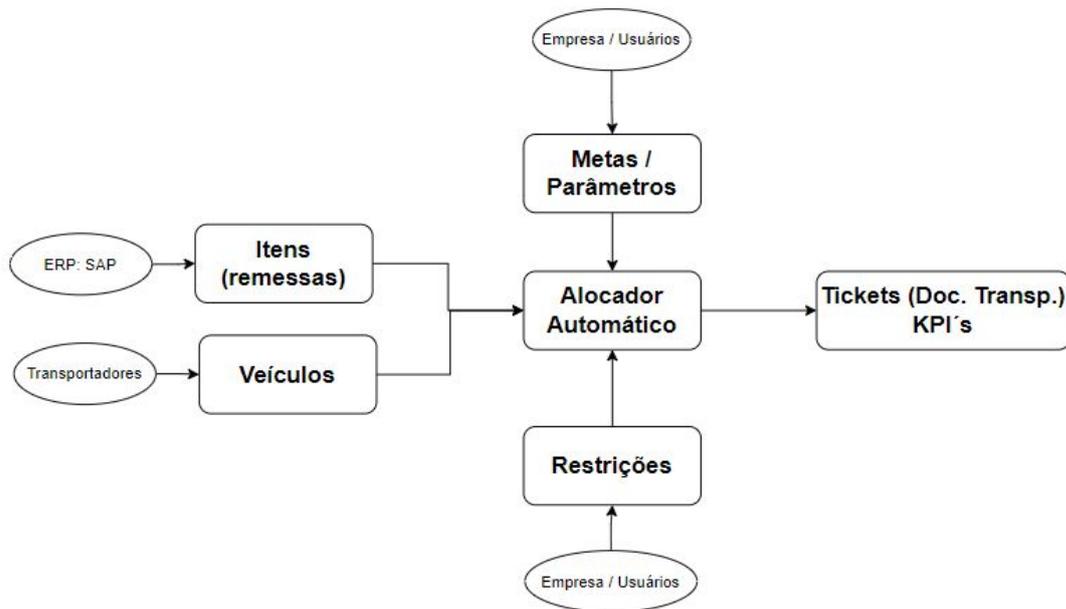
Após definido o método, as etapas seguintes consistem no levantamento e organização dos dados do sistema de gestão da empresa, considerando um horizonte de tempo pré-definido, seguido pela aquisição de dados dos veículos no mesmo período, e, por fim, a construção da heurística em si. Tais etapas são melhor detalhadas na sequência.

### 3.2.1 Procedimentos para se obter os resultados da pesquisa

A Figura 2 sumariza uma topologia geral que ilustra uma solução do problema estudado por meio de um fluxograma. Para facilitar a compreensão deste fluxograma é importante começar sua interpretação e leitura da esquerda para direita. Os dados de entrada são simbolizados por duas elipse, mais à esquerda, que representam os itens (unidades metálicas embaladas) e veículos que precisarão ser devidamente alocados. Ambos os dados são repassados ao setor de expedição, que, por sua vez, deverá usar as metas e restrições estabelecidas pelas partes interessadas, parte superior e inferior do fluxograma, respectivamente, para a tomada de decisão sobre o processo de alocação dos itens e em cada veículo via alocador automático (heurística proposta, simbolizada pelo bloco central da Figura 2).

Cada veículo selecionado para ser carregado deverá receber as remessas de unidade metálica que se adéquem de acordo com as metas e restrições pré-estabelecidas e tratadas pela heurística. A saída, como resposta da heurística, são os agrupamentos propostos à direita do fluxograma da Figura 2, na caixa denominada “*Tickets*” (ou documento de transporte), que estabelecem uma relação única dos produtos acabados com cada veículo e que contêm um ou mais programas de embarque. Ademais, cabe destacar que, o resultado obtido com a solução proposta pela heurística permitirá avaliar o percentual de frete morto e a quantidade de itens ou peso faturados, indicadores-chave (KPIs) investigados pela organização.

Figura 2 – Topologia geral da solução



Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.2.2 Levantamento e organização de dados

Como instrumento de coleta de dados do presente estudo foram utilizados dados colhidos diretamente do sistema **ERP** que hospeda as informações gerais sobre as variáveis mapeadas do processo de expedição de carga e demais processos produtivos da empresa. Para a realização dos testes computacionais foram extraídos dados diários de alocação dos produtos acabados e dos veículos disponíveis, organizados em planilhas eletrônicas. O sistema **ERP** apresenta um conjunto de relatórios, que auxiliam no gerenciamento da atividade de programação de carga de veículos.

Os dados coletados abrangem um 1(um) dia do ano, focando especificamente em transportes realizados no modal rodoviário, para clientes do mercado brasileiro. Além disso, as estratégias adotadas pela empresa para tratamento dos dados brutos das planilhas eletrônicas, também foram mantidos, a fim de assegurar um comportamento mais próximo procedimento de programação de carga de veículos.

O processo de levantamento dos dados dos tipos de caminhões começa pela análise de uma tabela que apresenta a disponibilidade de veículos por transportador no dia em questão, conforme mostrado na Figura 3. A tabela ilustra o caso de três transportadoras para um determinado dia de operação. Note que, no dia em questão (dia D) havia um total de 47 veículos disponíveis e o próximo dia (D+1) quando observada a totalidade dos transportadores. De forma complementar, a Tabela 1 mostra a capacidade dos veículos mais comuns para um determinado dia de operação.

Figura 3 – Imagem da planilha de disponibilidade de veículos

TRANSPORTADOR - A												
Tipo de Veículo	PLACAS			Veículos no Pátio (s/ transporte)	Veículos em descarga	Em trânsito (D)	Previsão (D+1)	Observações	Frota	Agregado	Terceiro	Ult. Atualização
	Cavalo	1ª Carreta	2ª Carreta									
VANDERLEIA CARGA SECA	xyz-0123	xyz-0124					1	SÃO PAULO	1			02/08/2022 07:52:30
VANDERLEIA CARGA SECA	xyz-0125	xyz-0126				1		SÃO PAULO	1			02/08/2022 07:52:42
VANDERLEIA CARGA SECA	xyz-0127	xyz-0128					1	SÃO PAULO	1			02/08/2022 07:52:39
BITREM - 7 EIXOS	xyz-0129	xyz-0131	xyz-0132				1	BOBINAS-5999	1			02/08/2022 07:53:31
BITREM - 7 EIXOS	xyz-0133	xyz-0134	xyz-0135				1	BOBINAS-5999	1			02/08/2022 07:54:47
RODOTREM	xyz-0136	xyz-0137	xyz-0138				1		1			02/08/2022 07:59:07

TRANSPORTADOR - B												
Tipo de Veículo	PLACAS			Veículos no Pátio (s/ transporte)	Veículos em descarga	Em trânsito (D)	Previsão (D+1)	Observações	Frota	Agregado	Terceiro	Ult. Atualização
	Cavalo	1ª Carreta	2ª Carreta									
VANDERLEIA CARGA SECA	xyz-0123	xyz-0124				1				X		29/07/2022 07:34:55
CARRETA CARGA SECA TRUCADA	xyz-0125	xyz-0126				1					X	29/07/2022 07:35:18
VANDERLEIA CARGA SECA	xyz-0127	xyz-0128										29/07/2022 08:16:11

TRANSPORTADOR - C												
Tipo de Veículo	PLACAS			Veículos no Pátio (s/ transporte)	Veículos em descarga	Em trânsito (D)	Previsão (D+1)	Observações	Frota	Agregado	Terceiro	Ult. Atualização
	Cavalo	1ª Carreta	2ª Carreta									
BITREM CARGA SECA	xyz-0123	xyz-0124	xyz-0132				2				2,00	02/08/2022 10:18:10
VANDERLEIA	xyz-0125	xyz-0126				1				1		02/08/2022 10:18:35
VANDERLEIA	xyz-0127	xyz-0128			1					1,00		02/08/2022 10:18:38
CARRETA TRUCADA (LS)	xyz-0129	xyz-0124		1						1,00		02/08/2022 10:18:46
VANDERLEIA	xyz-0125	xyz-0126										02/08/2022 10:18:49
VANDERLEIA	xyz-0127	xyz-0128			1				12.999.000,00			02/08/2022 10:19:26
VANDERLEIA				3				PARANA		3,00		02/08/2022 10:19:52

Fonte: Adaptado de dados internos à empresa.

Tabela 1 – Capacidade de carga dos veículos

Tipo de Veículo	Capacidade (ton)
Bi-trem Carga Seca	36
Bi-trem Especializado	36
Bi-truck	18
Carreta L	25
Carreta trucada (LS)	30
Rodotrem Carga seca	48
Rodotrem Especializado	48
Truck	13
Vanderléia	34
Sem recursos	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto ao formato de saída dos arquivos da heurística e a forma de representação da solução, pode-se considerar que o algoritmo entrega todos os veículos aproveitados (selecionados pelo algoritmo) com as respectivas unidades metálicas designadas. Os veículos que não forem aproveitados são classificados como veículos “rejeitados”.

Para cada veículo aproveitado, ou seja, que tiveram itens alocados e que cumpriram os critérios estabelecidos, há uma taxa de ocupação limite, em percentual, baseado em sua capacidade de carga, tal como destacado na Tabela 1. Ademais, como saídas do sistema ainda é possível conhecer a quantidade total de itens selecionados para serem carregados (faturados), a quantidade total de veículos aproveitados e a macrorregião selecionada. Estes dados são impressos na saída do algoritmo no ambiente Python e também são exportados em formato “.xlsx”, sendo que, cada veículo é representado em formato de tabela contendo os itens a ele alocados.

### 3.2.3 Ferramentas e pacotes computacionais

Para a construção da heurística, todo o algoritmo foi projetado em linguagem Python compatível com o ambiente de execução do Google Colab<sup>2</sup>, e também com o auxílio de algumas bibliotecas disponíveis pelo resolvidor comercial do Gurobi<sup>3</sup> em sua versão de estudante. Em relação às bibliotecas do Python, utilizou-se a XlsxWriter<sup>4</sup>, de código aberto que permite a criação de arquivos em formato .xlsx a partir do zero ou a modificação de arquivos existentes. Com o XlsxWriter, é possível gerar planilhas, gráficos de forma programática, sendo útil para a automação de tarefas que envolvam a produção de relatórios ou a manipulação de dados em um formato amplamente utilizado no ambiente corporativo.

Para auxiliar na filtragem de nome de arquivos, utilizou-se a biblioteca fnmatch<sup>5</sup>, que fornece uma função fnmatch(), que permite comparar *strings* com padrões específicos, tornando mais fácil identificar padrões em listas de nomes de arquivos. Foi utilizado também o NumPy<sup>6</sup>, que desempenha um papel importante no cenário da computação científica e análise de dados em Python. Essa biblioteca oferece suporte a construção de vetores multidimensionais e funções matemáticas eficientes, sendo essencial para operações numéricas e algébricas.

Para possibilitar uma melhor organização e análise dos dados a biblioteca Pandas<sup>7</sup> também foi utilizada. Com estruturas de dados flexíveis, como o DataFrame, o Pandas simplifica a importação, limpeza, transformação e análise de conjuntos de dados complexos. Para a criação de visualizações gráficas, a biblioteca utilizada foi o Matplotlib<sup>8</sup>. Com uma ampla gama de opções de personalização, o Matplotlib oferece flexibilidade e controle sobre o *design*, permitindo aos usuários comunicar efetivamente informações complexas por meio de representações visuais.

<sup>2</sup> Serviço de nuvem gratuito hospedado pela empresa Google que possibilita a implementação e execução de algoritmos. Disponível em: <<https://colab.research.google.com/>>. Acesso em: 03 nov. 2023.

<sup>3</sup> Solucionador de programação matemática para resolver problemas lineares, inteiros mistos, quadráticos e de programação linear. Disponível em: <<https://www.gurobi.com/>>. Acesso em: 03 nov. 2023.

<sup>4</sup> Módulo Python para gravar arquivos no formato .xlsx. Disponível em: <<https://pypi.org/project/XlsxWriter/>>. Acesso em: 07 nov. 2023.

<sup>5</sup> Módulo Python que fornece suporte para curingas no estilo *shell* do Unix. Disponível em: <<https://docs.python.org/pt-br/3/library/fnmatch.html>>. Acesso em 07 nov. 2023.

<sup>6</sup> Biblioteca Python que utiliza conceitos de vetorização, indexação e transmissão de dados. Disponível em: <<https://numpy.org/>>. Acesso em: 07 nov. 2023.

<sup>7</sup> Biblioteca Python muito útil para análise de dados. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/>>. Acesso em: 11 nov. de 2023.

<sup>8</sup> Biblioteca abrangente para criar visualizações estáticas, animadas e interativas em Python. Disponível em: <<https://matplotlib.org/>>. Acesso em: 07 nov. 2023.

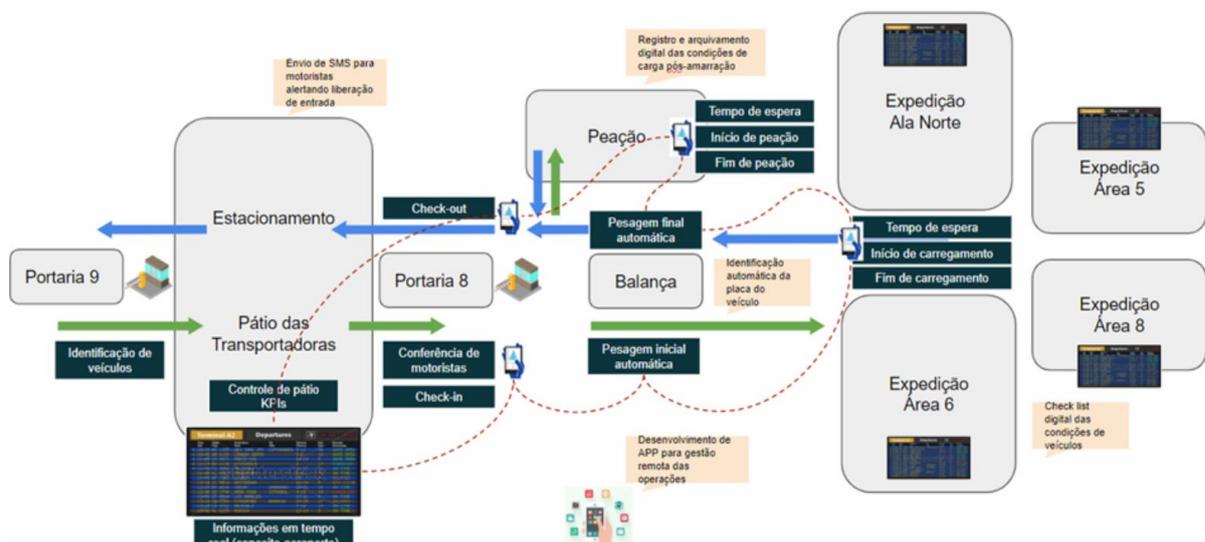
## 4 Caracterização do problema

A empresa foco deste estudo opera uma planta industrial estrategicamente localizada no interior de Minas Gerais, servindo tanto o mercado nacional como o Mercosul e o mercado internacional. A área de logística da empresa é suportada principalmente pelo modal rodoviário, com um complemento ferroviário para atender às demandas de transporte. A exportação dos produtos é realizada via navios nos portos do Rio de Janeiro e do Espírito Santo.

Mais especificamente, a área de expedição de produtos acabados da empresa desempenha um papel crucial na cadeia de suprimentos da empresa em função da ampla variedade de aços especiais. O processo de expedição começa com o recebimento dos produtos acabados da planta industrial, onde a verificação de qualidade e a preparação para o transporte são realizadas de forma criteriosa. Após a inspeção e preparação, os materiais são despachados, garantindo que cheguem aos destinos de acordo com as demandas e especificações de cada cliente.

O carregamento dos veículos no processo de expedição se dá nas Docas, situadas nos galpões da expedição, conforme mostrado no fluxo apresentado na Figura 4. Neste fluxo estão representados 4 galpões distintos para carregamento de veículos (galpões da Área 6, Ala norte, Área 5 e Área 8). Todos os veículos entram pela Portaria 9 para terem acesso ao pátio externo da empresa. Assim que são liberados para entrar, estes se dirigem para a Portaria 8 para realizar o pré cadastro e conferências iniciais. Em seguida, o veículo precisa pesar na balança de entrada e então se dirige para as Docas de carregamento. Após concluir o carregamento, o mesmo se dirige para a pesagem de saída e amarração externa.

Figura 4 – Fluxo carregamento do processo de expedição



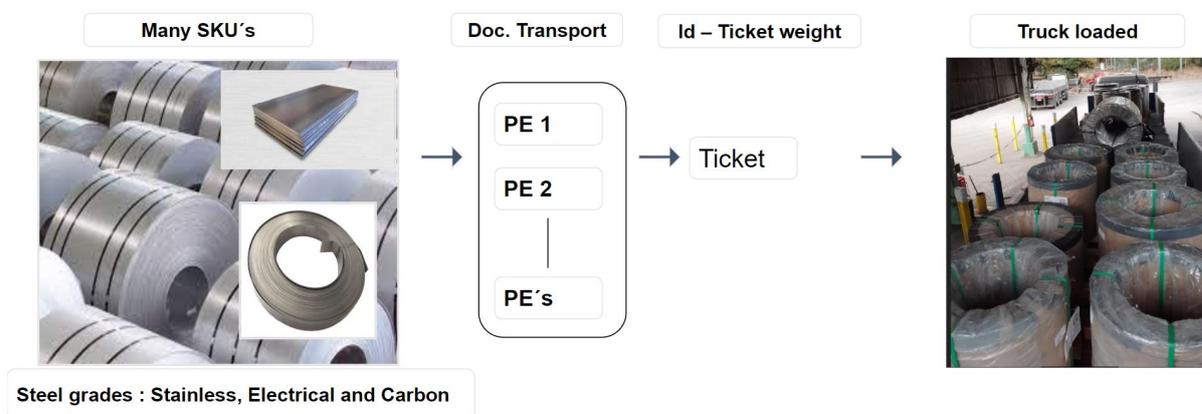
Fonte: Elaborado pelos autores.

## 4.1 Descrição do processo da alocação de cargas

Em linhas gerais, pode-se dizer que, o processo de expedição de carga abordado nesse trabalho se trata de uma variante específica do problema de alocação de cargas heterogêneas. Há milhares de unidade de manutenção de estoque, conhecidas como *Stock Keeping Unit (SKU)*, com peso, forma e necessidades distintas, ampla diversidade de tipos e capacidades de veículos rodoviários e condições específicas de prazo e qualidade da carteira de clientes, composta por centenas de empresas. Tal situação, expõe um cenário desafiador para a melhor programação e distribuição de carga no assoalho de cada veículo.

Neste contexto, para atender à carteira de demandas, a empresa contabiliza cerca de 15 mil veículos expedidos anualmente, superando mais de 100 unidades metálicas carregadas e faturadas nos diversos formatos e tamanhos, alocados majoritariamente no modal rodoviário. A Figura 5 mostra a composição de carga que integra o programa de embarque, que, por sua vez, agrega em 1 *ticket* de transporte. A relação de *ticket* por veículo é unitária, e um mesmo *ticket* pode ter um ou mais programas de embarque. Em média, os *tickets* saem carregando cerca de 7 *UMs*. Pode-se notar a diversidade de forma, peso e volume das *UMs* devido à diversidade existente de *SKU* dos estoques de produtos acabados.

Figura 5 – Agregação de *UMs* em veículos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Note que, a imagem de veículo carregado (à direita da Figura 5) exemplifica as combinações possíveis no assoalho da carreta, com *UMs* lado a lado e também podendo ser empilhadas como ocorre com tiras e chapas.

Como destacado anteriormente, o despacho de materiais ocorre predominantemente por meio do modal rodoviário, no qual as transportadoras cadastradas efetuam a coleta de materiais no setor de expedição e realizam as entregas aos seus respectivos clientes. Essas transportadoras geralmente operam com uma variedade de veículos de transporte, cada qual com sua própria capacidade, e concentram suas atividades em regiões específicas, como a região metropolitana de Belo Horizonte, São Paulo, Caxias do Sul ou Campinas, por exemplo.

Apesar de cada tipo de caminhão ter sua capacidade máxima de transporte, foi estabelecida uma tabela de cargas mínimas em comum acordo entre as partes interessadas, a empresa e as transportadoras. Dessa forma, quando uma carga é montada e seu peso está situado entre a carga mínima e a capacidade do caminhão, a transportadora recebe pagamento com base no peso real da carga (conhecido como lotação). No entanto, quando a carga montada fica aquém da carga mínima, a transportadora é remunerada com o frete correspondente à carga mínima. A diferença entre a carga mínima e a carga real transportada é denominada frete morto, resultando em custos adicionais no transporte em tais situações.

Diariamente, é executada a entrega de cargas pela equipe de programação de transporte, que estabelece quais lotes e clientes serão atendidos ao longo do dia, dentro de um intervalo de 24 horas, ou conforme a liberação de material realizada pela área de Acompanhamento de Pedidos e Vendas, assim como por meio de novos recebimentos por via ferroviária. Além disso, a quantidade de produtos disponíveis para expedição em um dia pode ser inferior ou superior à capacidade diária de despacho do setor de expedição.

Independentemente da situação, o programador se esforça para alocar a maior quantidade possível de produtos às transportadoras cadastradas, mesmo que isso exceda a capacidade do setor. Os materiais que não podem ser despachados no dia são incorporados à programação do dia seguinte. Além disso, durante a elaboração do [Programa de Embarque \(PE\)](#), as cargas dos veículos de transporte são definidas pelo responsável pela atividade, levando em consideração prioridades de atendimento, capacidades dos clientes, capacidades dos veículos, prazos de entrega e todas as restrições de incompatibilidade, como a correspondência entre veículos e clientes ou entre transportadoras e regiões, por exemplo.

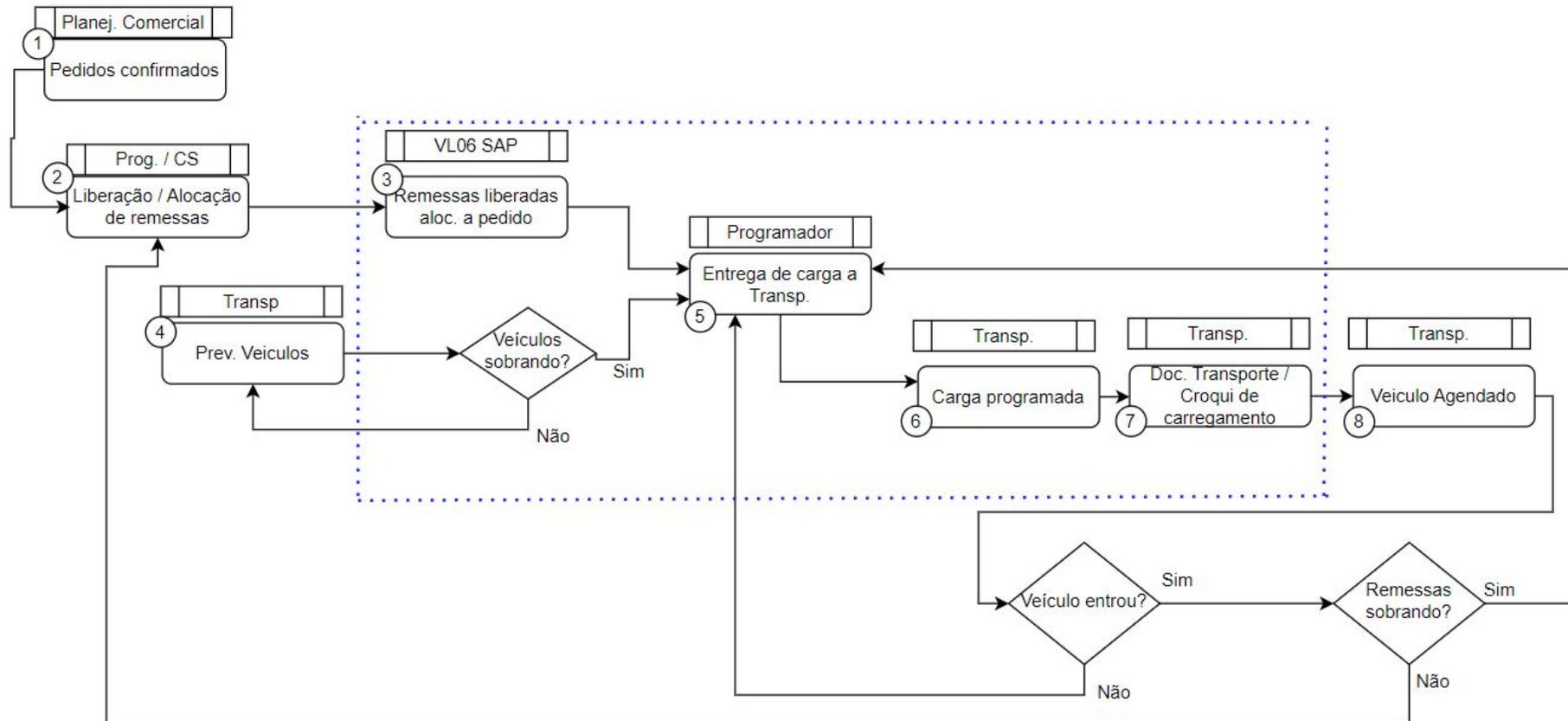
O fluxograma do processo apresentado na [Figura 6](#) ilustra quais são as etapas do processo de tomada de decisão do operador responsável pela alocação das [UMs](#) no setor de expedição. A primeira etapa consiste na confirmação da carteira do mês com a equipe comercial e de planejamento e controle da produção (passo 1). Na sequência, o sistema de *Customer Service* libera as [UMs](#) para os pedidos, gerando as remessas a serem alocadas pelo sistema [SIGA](#)<sup>9</sup>, que associa as [UMs](#) aos pedidos (passo 2).

Na etapa seguinte, cada transportador preenche a tabela de disponibilidade de veículos (passo 3). Pela transação do [SAP](#) o programador de transporte consegue ver a relação das remessas liberadas. Desse modo, o operador seleciona um grupo de remessas e envia para algum transportador, mediante conhecimento prévio da rota, tipo de produto, disponibilidade de veículos e prazos de pedidos (passo 4).

---

<sup>9</sup> SIGA: Sistema de alocação de unidades metálicas na produção à pedidos finais de clientes, fornecedor OMP

Figura 6 – Fluxograma do processo de expedição de UMs



Fonte: Elaborado pelos autores.

Note que, a partir da disponibilidade dos veículos o transportador recebe as cargas direcionadas pelo programador e deve providenciar veículo (passo 5). O transportador aloca grupo de cargas em um determinado veículo criando o *ticket* que pode ter um ou mais documentos de transporte, isto é, associando uma placa da carreta à um grupo de remessas. Ao criar o documento de transporte é necessário gerar o croqui de carregamento de cargas no assoalho da carreta (responsabilidade do transportador), que detalha quantas e como as remessas devem ser carregadas, respeitando os limites dimensionais e de distribuição de peso por eixo (passo 6). Após criação do documento de transporte, é feito o agendamento para entrada. Mediante a pesagem de entrada, finda-se o processo de alocação de cargas a veículos (passo 7).

As etapas anteriormente destacadas, pertencentes à área interna da linha pontilhada da Figura 6, compreendem o grupo de tomadas de decisão que serão atribuídas à heurística de alocação de cargas proposta. Assim, considerando as remessas e veículos disponíveis, deve-se escolher a macrorregião com a maior quantidade de entregas, selecionar quais remessas e transportadoras atendem à respectiva região, selecionar aleatoriamente um veículo da lista disponível, e, por fim, selecionar as remessas, ordenadas das maiores para as menores.

Como há uma grande quantidade de condições a serem atendidas, como *i)* otimizar ao máximo a utilização das capacidades dos caminhões sem excedê-las, *ii)* evitar ou minimizar o pagamento de frete morto, *iii)* maximizar o transporte de produtos de clientes com prazos dentro do limite sem que haja atraso ou antecipação demasiada, *iv)* cumprir as restrições relacionadas ao tipo de caminhão e cliente, transportadora e região, *v)* levar em consideração a quantidade de produtos disponíveis para expedição e o número significativo de caminhões à disposição, o processo de tomada de decisão assume um caráter notavelmente complexo. É dentro deste contexto desafiador surge a proposta de solução do problema via heurística, conforme detalhamento apresentando no Capítulo 5.

## 5 Heurística para o problema

Aproveitar a capacidade de carga dos caminhões é, atualmente, uma tarefa realizada com base no conhecimento técnico do operador e os dados disponíveis para a tomada de decisão sobre uma combinação de cargas e caminhões que seja viável. A ideia é buscar utilizar eficientemente os veículos, respeitando as suas restrições. Essa missão desafiadora pode ser tratada como um problema de empacotamento, o qual, em geral, é classificado como NP-difícil (MARCIANO, 2023), ou seja, significa que a busca pela solução perfeita envolve um número tão vasto de possibilidades que torna inviável o uso de métodos exatos na maioria das situações reais, considerando o tempo disponível para a tomada de decisão.

Nesse contexto, este capítulo apresenta a estrutura de um algoritmo customizado, desenvolvido com foco em representar a dinâmica de tomadas de decisão do operador do setor de alocação de carga. Essa heurística leva em consideração as particularidades e restrições do processo em questão, visando proporcionar uma solução rápida para o problema prático.

### 5.1 Sequência de tomadas de decisão da heurística

A Figura 7 apresenta a macro sequência de tomadas de decisão da heurística, considerando toda a lógica do algoritmo para a alocação de cargas de UMs aos veículos. O fluxo começa pela tomada de decisão do homem, no caso o colaborador programador do turno de transportes da logística à esquerda da Figura 7 identificado na etapa 1 de “Início”. Em seguida o algoritmo faz a leitura e importação dos dados de entrada que devem alimentar o algoritmo (veículos e itens a carregar).

Na sequência realiza-se um pré tratamento dos dados de entrada, padronizando em formatos de dicionários. Com estes dados tratados e tabulados, o algoritmo faz a contabilização da macrorregião com maior quantidade de peso a ser atendida no horizonte de prazo em questão. Selecionada a macrorregião, há uma seleção de fornecedores (transportadoras) habilitados para este destino geográfico.

A cada iteração os veículos são atribuídos à uma transportadora de forma aleatória. Assim, em cada iteração, seleciona-se a macrorregião a ser priorizada, defini-se quais são as transportadoras que podem ser alocadas e também se estabelece quais são os veículos disponíveis. Uma vez definido este conjunto, é realizado um procedimento de seleção pontual e aleatória de um veículo disponível, conforme representado na etapa 2 do fluxo da Figura 7.



Após a seleção do veículo, parte-se para etapa de alocação física dos itens (cargas ou remessas de **UMs**) no veículo. A seleção obedece um critério de ordem decrescente de prioridade, ou seja, do maior para o menor peso. Existe um parâmetro que determina quantas tentativas de seleção de itens, que, por padrão inicial, foi setado em 20, e, posteriormente, estudado, variando este valor conforme detalhado nos experimentos computacionais apresentados na Seção 6.3.2.

Note que, ao selecionar o item, deve-se considerar todas as características relevantes da **UM**, dimensões, formatos, restrições estabelecidas pelo cliente, entre outras, e as características do assoalho do veículo. Neste momento, importa o formato da **UM**, dimensões de largura, comprimento e altura bem como o peso medido. Se o item couber no veículo, respeitando as regras de alocação preestabelecidas, ele é colocado em uma zona dentro do *bucket* (carreta). Esta zona pode estar aberta e disponível ou ser preciso realizar a abertura de uma nova zona.

As regras de alocação são as limitações e premissas de carregamento empregadas, observando limite de largura, limite de comprimento, forma do material condizente com tipo de assoalho da carreta. Assim, quando, por exemplo, o tipo de veículo é um veículo bobineiro especializado, somente será possível a alocação de **UMs** em formato de bobinas, com eixo na horizontal e sem ser acomodado em estrado de madeira. Outro exemplo é o acondicionamento de itens na forma de chapas, que deve ser empilhada verticalmente, obedecendo a regra “piramidal”, isto é, chapas de dimensões e espessura maior devem sempre estar abaixo da chapa das demais, no processo de empilhamento.

O laço A na Figura 7 é repetido até que se atinja os limites dimensionais e de peso do veículo com o acúmulo dos itens selecionados para este veículo. A próxima decisão é feita comparando a soma dos pesos dos itens selecionados e que couberam no veículo, ao verificar se o limite inferior de ocupação da lotação do veículo foi ultrapassado. Na heurística empregada, foi comparado com o parâmetro de 93% da capacidade de carga do veículo. Caso não atinja este limite (bloco identificado com o índice 3 na Figura 7) deve-se recusar o veículo e liberar as remessas previamente selecionadas, conforme mostrado no laço B, que direciona até a próxima seleção de veículo, desconsiderando àquele que foi recusado. Caso o limite inferior seja atingido, o caminho tomado é a distribuição uniforme e reserva do veículo e suas **UMs** atribuídas.

A etapa seguinte do processo (índice 4) é verificado se há (sim) ou não disponibilidade de mais itens e veículos. Caso existam itens e veículos disponíveis, o algoritmo implementa o laço C até esgotar as disponibilidades referente à macrorregião. A ideia é alocar o máximo de **UMs**, cobrindo, se possível, todos os itens que precisam ser faturados. Ao esgotar itens ou veículos disponíveis, o algoritmo entende que findaram-se as possibilidade de continuidade de realização de rodadas de alocação, sendo registrado o total de vezes que esse procedimento foi realizado em cada iteração da heurística.

O próximo passo de decisão do algoritmo (índice 5), se concentra em verificar se será (laço D) ou não realizada mais uma rodada de execução da heurística. Note que, o número de iterações da heurística é um parâmetro, que vai depender do tempo médio de execução completa das etapas anteriores da heurística e da disponibilidade de tempo disponível para tomada de decisão no escopo da empresa. Ao atingir o limite de iterações pré-estabelecido, os resultados são registrados e disponibilizados ao tomador de decisão.

## 5.2 A heurística no ambiente computacional

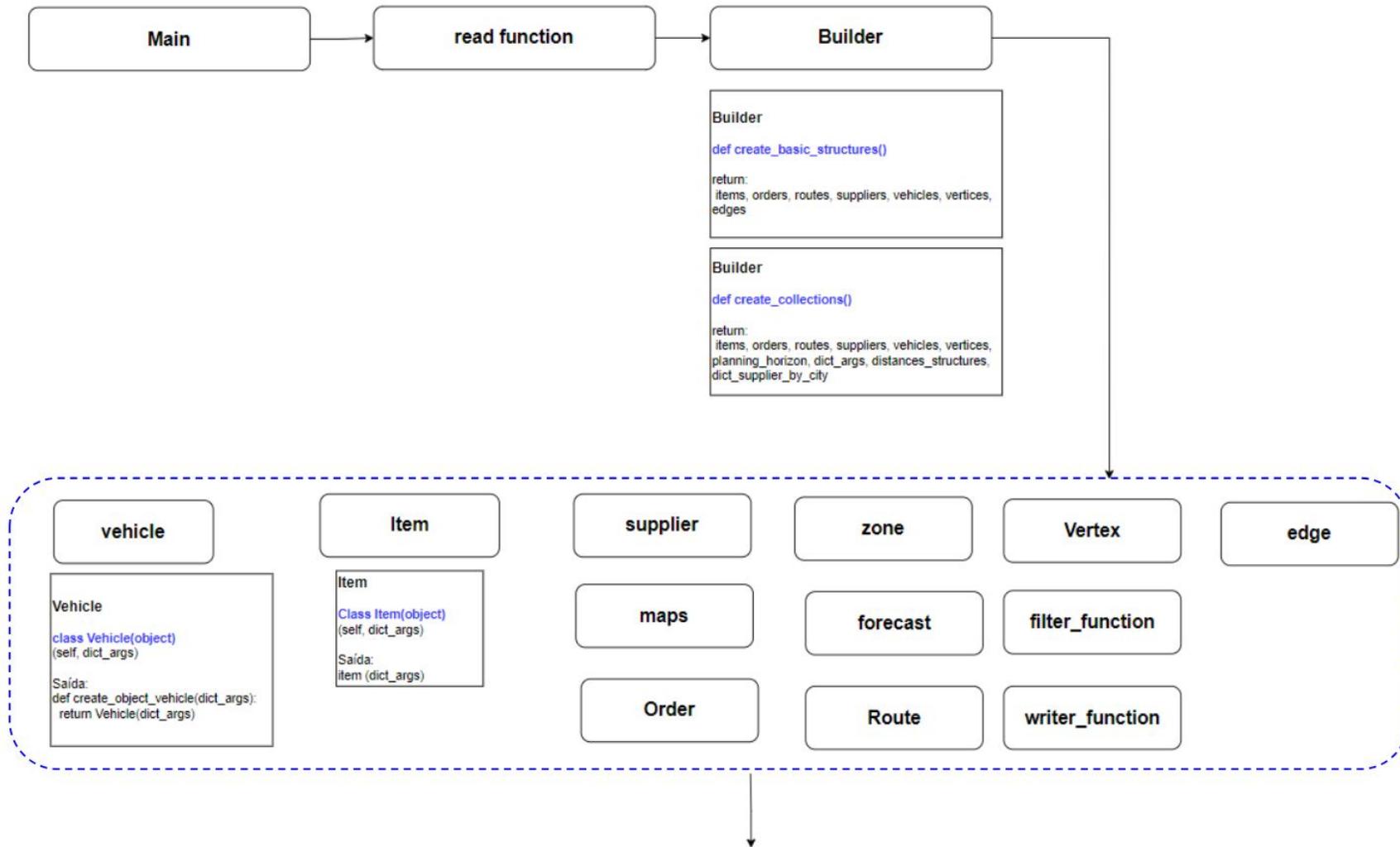
O programa em Python criado para representar o processo de alocação de cargas em veículos pode ser evidenciado como estruturado, de forma macro, nas Figuras 8 e 9. O objetivo da apresentação do algoritmo em forma de fluxo é apoiar na compreensão de como o programa foi concebido e a interligação das funções, objetos e classes usados internamente na heurística. Note que, há uma série de sub-rotinas de execução dentro do ambiente do Google Colab em linguagem Python. Por este motivo, optou-se por não estruturar as rotinas em pseudo-algoritmos, considerando que boa parte das atividades são sequenciais e por entender que a apresentação via fluxograma poderia facilitar a compreensão do leitor.

A Figura 8 inicia com representação do objeto “*Main*” como o código *master* do algoritmo, sendo o responsável por receber os dados de entrada e executar a heurística através dos demais objetos até a apresentação das soluções encontradas. O objeto *Main* aciona o código *Read function* que trata de fazer a leitura dos dados de entrada em formato “.xlsx”, importando-os para vetores e matrizes estruturadas no ambiente do Python. Esses dados são pré-tratados e interpretados para formar os dicionários (itens, veículos, cidades, macrorregiões, destino por transportador) no objeto *builder*.

Na etapa seguinte, representada pela área pontilhada da Figura 8, deve-se preparar a lógica de seleção dos veículos considerando os requisitos do problema. De forma resumida, cada item dentro da área pontilhada pode ser descrito como:

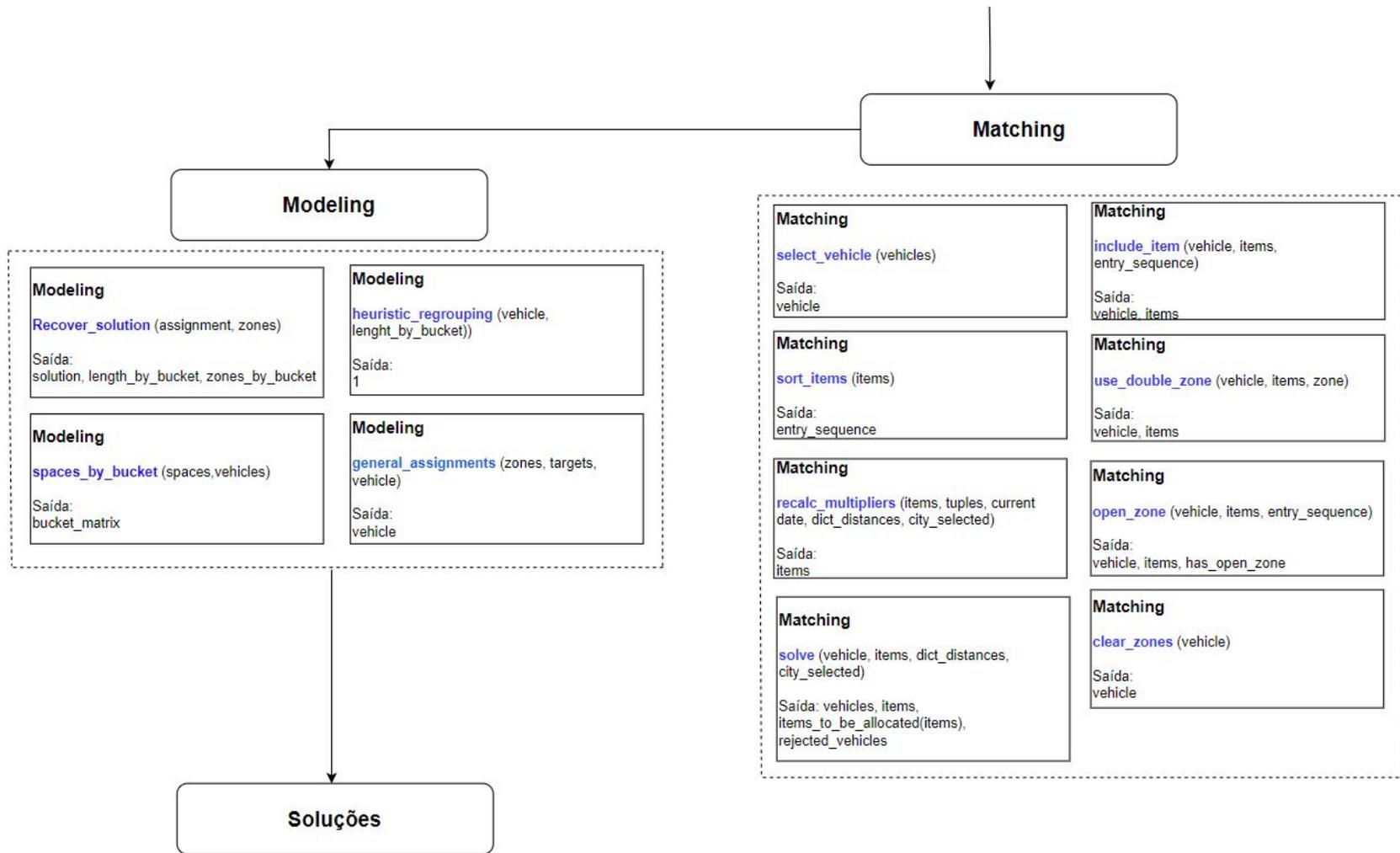
- **Vehicle:** Classe de veículos, contém atributos sobre os veículos;
- **Item:** Classe de Itens que contém os atributos para a remessa;
- **Supplier:** Classe onde contém atributos sobre as transportadoras;
- **Maps:** Classe onde existem métodos pra calcular a distância do frete em quilômetros (Km);
- **Zone:** Classe onde existem atributos que configuram a zona do veículo;
- **Forecast:** Classe que atribui custos adicionais por tonelada em rotas extras;
- **Route:** Define os dicionários de veículos por fornecedor e vértices de uma rota;

Figura 8 – Mapa das funções da heurística - Parte 1



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 – Mapa das funções da heurística - Parte 2



Fonte: Elaborado pelos autores.

- **Vertex:** Avalia a distância entre cidades para definição de vizinhança;
- **Filter function:** Filtra pedidos por data confirmada da **Ordem de Venda (OV)**;
- **Order:** Atributos do pedido (número do pedido ou “**OV** do item”, peso, data confirmada, status de faturamento);
- **Edge:** Cria dicionário de distâncias entre dois vértices (origem e destino);
- **Write Function:** Escreve a relação de itens por veículos para cada solução adotada ou descartada.

A sequência da lógica da heurística, apresentada na Figura 9, se dá no bloco do algoritmo identificado como “*Matching*”, responsável por realizar toda a alocação dos itens no assoalho da carroceria da carreta selecionada, considerando uma meta de no mínimo 93% de ocupação.

Dentre as principais funções do *Matching*, destaca-se a função *Recalc\_multipliers* que estima pesos para cada remessa das **OVs** de acordo com as datas de atendimento. Realiza-se também o cálculo dos multiplicadores relacionados à data de confirmação do pedido (data limite para atendimento). A função *Open\_zone* avalia cada item a ser adicionado pelo tipo (bobina, chapa ou tira), verifica as dimensões do item para saber se pode incluir na mesma zona ou uma nova. Note que, é nesta função que a estratégia de empilhamento é aplicada.

Em relação às restrições do problema, considera-se os limites de peso total, largura e comprimento do veículo. Uma função denominada *Solve* é então utilizada para selecionar o veículo que irá se associar a cada **UM**, considerando o seu tipo, capacidade, comprimento, o total de *buckets* (1 ou 2) disponíveis, a sequência de entrada da lista de **UMs** (ordenada de forma decrescente em função da data do pedido e pelo seu peso) e a distância da macrorregião. Uma vez selecionado um veículo que ainda não esteja cheio (*vehicle.is\_full*), a heurística vai inserindo remessas de **UMs** até atingir o limite máximo de capacidade do caminhão.

Uma vez que todos os itens selecionados estão alocados fisicamente (3D) à um veículo, o algoritmo aplica então um procedimento de rearranjo no veículo para tornar a distribuição mais uniforme, etapa esta denominada de *Modeling* na Figura 9. A distribuição dos produtos no veículo considera as zonas de um mesmo *bucket*, os critérios dimensionais e peso morto (frete morto). Assim, o conjunto de procedimentos codificados na etapas do *Modeling* é focado em distribuir os itens selecionados para o veículo de forma a minimizar a diferença para o valor alvo das carretas. Essa tarefa permite modificar o posicionamento das **UMs** respeitando as dimensões de largura, comprimento, altura e peso da carreta, bem como, definir o posicionamento em cada das zonas de cada carreta (*bucket*).

A primeira etapa na classe *Modeling* executa a rotina de *Recover\_solution*, que é a alocação recuperada, isto é, como se fosse uma repescagem final, antes de rodar o otimizador (modelo matemático descrito na Seção 5.2.1). Após completar o veículo no comprimento, verifica-se se o critério de peso carregado é maior do que os 93% da capacidade. Caso contrário, então é executada a rotina de recuperação para tentar encontrar alguma zona em que seja possível reorganizar os itens. Se constatado que ocupação é superior à 93%, determina-se alocação recuperada. Do contrário, o veículo precisa ser levado para a lista de veículos rejeitados. Note que, uma função *Heuristic\_regrouping* é utilizada para alocar as maiores remessas e garantir que não ultrapasse o comprimento do *bucket*, assim como a função *Spaces\_by\_bucket* faz a distribuição matricial do veículo.

Por fim, o algoritmo imprime o índice de alocação, peso e comprimento alocado, a saída (*has\_open\_zone*), identifica toda carreta que ainda está disponível para receber mais itens, mostra a distribuição de peso e o espaçamento final dentro dos *buckets*.

### 5.2.1 Distribuição da carga no caminhão

Na classe *Modeling*, a função *General\_assignment* recebe como parâmetro dados de zonas do veículo, seu tamanho total e a capacidade já alocada. Tais informações são utilizadas para distribuir a carga nos veículos, seguindo as restrições de cada zona e buscando a uniformização do peso no assoalho do veículo, via modelagem matemática.

A ideia é que o modelo retorne uma alocação mais uniforme dos itens nos veículos de forma reduzir o risco de excesso de peso por eixo do veículo. Assim, ao resolver o modelo por meio do resolver comercial do Gurobi, o fracionamento das carretas em zonas permite o remanejamento dos itens no assoalho, que, por sua vez, é dividido em hemisférios. Assim, o modelo de otimização busca minimizar os erros (diferenças) entre pesos das zonas de todas as carretas. Note que, cada veículo pode ter duas carretas (*buckets*). O Quadro 1 apresenta a descrição dos conjuntos, parâmetros e variáveis utilizadas para os modelos. O modelo (5.1)-(5.5) sintetiza as relações matemáticas do problema em que há um único *bucket* por veículo.

$$\min \sum_{j \in J} (\alpha \delta_j^- + \delta_j^+) \quad (5.1)$$

$$\text{s.a.: } \sum_{k \in K} x_{jk} p_k \leq c_j + \delta_j^+ \quad \forall j \in J \quad (5.2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} p_k \geq c_j - \delta_j^- \quad \forall j \in J \quad (5.3)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5.4)$$

$$x_{jk}, \delta_j^+, \delta_j^- \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, k \in K. \quad (5.5)$$

Quadro 1 – Conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo matemático

Tipo	Descrição
<i>Conjuntos</i>	
$I$	Conjunto de <i>buckets</i> $i$ de um veículo, que pode ser igual a 1 ou 2.
$J$	Conjunto de hemisférios $j$ de cada <i>bucket</i> $i \in I$ de um veículo.
$K$	Conjunto de zonas $k$ que contém uma <b>UM</b> ou mais, no caso de tiras e/ou chapas (considera-se a soma do peso total e suas dimensões agregadas).
<i>Parâmetros</i>	
$p_k$	Pesos total da(s) <b>UM</b> (s) alocada(s) em uma zona $k \in K$ .
$c_j$	Capacidade de carga de cada hemisfério $j \in J$ .
$f_i$	Capacidade de carga de cada <i>bucket</i> $i \in I$ .
$\alpha$	Penalidade atribuída às variáveis que são limites inferiores na função objetivo, setado em 1.1.
$\gamma$	Penalidade atribuída a parcela da função objetivo associada aos <i>buckets</i> , setado em 5.0.
<i>Variáveis</i>	
$x_{jk}$	Variável binária de ativação (1) ou não (0), que informa se eu estou alocando a zona $k \in K$ no hemisfério $j \in J$ .
$\delta_j^+$	Variável que contabiliza o desvio positivo no hemisfério $j \in J$ ;
$\delta_j^-$	Variável que contabiliza o desvio negativo no hemisfério $j \in J$ ;
$\beta_i^+$	Variável que contabiliza o desvio positivo no <i>bucket</i> $i \in I$ ;
$\beta_i^-$	Variável que contabiliza o desvio negativo no <i>bucket</i> $i \in I$ .

A função objetivo do modelo (5.1)-(5.5), tem como foco minimizar a soma dos desvios  $\delta_j^-$  e  $\delta_j^+$  de peso de cada hemisfério, considerando uma penalidade  $\alpha > 1$ , para que o desvio negativo seja superior ao desvio positivo, que, no caso prático, pode-se dizer que é um fator de maior relevância devido à limitação de peso do veículo. As restrições (5.2)-(5.3) estão estruturadas como forma de garantia de um limite mínimo e máximo de peso nos hemisférios da carreta, respectivamente. As restrições (5.4) garantem que se aloque apenas uma única **UM** (ou grupo no caso de tiras e/ou chapas) por hemisfério. As restrições (5.5) mostram o domínio das variáveis de decisão, que são binárias.

Quando o veículo selecionado possui dois *buckets* por veículo, o modelo matemático (5.6)-(5.9) é utilizado para que haja também um equilíbrio entre as cargas dos *buckets*.

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} (\alpha \delta_{j(i)}^- + \delta_{j(i)}^+) + \gamma \sum_{i \in I} (\alpha \beta_i^- + \beta_i^+) \quad (5.6)$$

s.a.: (5.2) – (5.5)

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{jk} p_k \leq f_i + \beta_i^+ \quad \forall i \in I \quad (5.7)$$

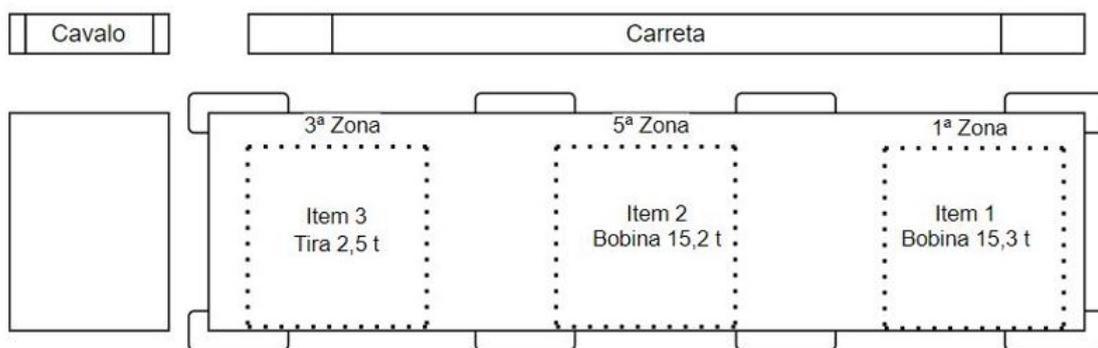
$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{jk} p_k \geq f_i - \beta_i^- \quad \forall i \in I \quad (5.8)$$

$$\beta_i^+, \beta_i^- \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I. \quad (5.9)$$

Na função objetivo do modelo (5.6)-(5.9), o parâmetro  $\gamma > 1$  é usado para priorização da distribuição da carga entre as carretas, em relação ao balanceamento nos hemisférios das carretas. As restrições (5.7)-(5.8) cumprem um papel semelhante às restrições (5.2)-(5.3), porém com foco em assegurar um limite mínimo e máximo de peso das carretas, respectivamente.

Após a execução do modelo matemático, há o retorno do posicionamento exato de cada item no assoalho do veículo, como exemplificado na Figura 10. Pode-se observar no exemplo ilustrativo do resultado do modelo após sua otimização, neste caso o veículo tem um comprimento limitado da carreta e o algoritmo vai determinar em qual região desses limite (metros) vai ficar cada um dos três itens selecionados, de forma a ter a melhor distribuição das UMs em função do peso e suas dimensões geométricas.

Figura 10 – Exemplo de um veículo carregado com 3 itens em um *bucket*



Fonte: Elaborado pelos autores.

### 5.3 Simplificações e limitações do método de solução

No desenvolvimento da heurística para o problema, é essencial reconhecer as simplificações e limitações incorporadas à proposta de solução. Pode-se destacar que a questão do tempo limitado para a realização deste trabalho seja um dos fatores limitantes para a exploração do problema real em sua completude. Algumas simplificações relevantes adotadas para o desenvolvimento do algoritmo são apresentadas a seguir:

1. **Foco em uma única macrorregião:** por questões de objetividade para o teste da lógica do problema, considerou-se somente uma macrorregião por instância de teste, considerando aquelas com o maior volume médio de carga.
2. **Aleatoriedade na apropriação da transportadora ao veículo:** embora tenha sido adotado uma seleção aleatória na etapa de atribuição do transportador de cada veículo, tal situação não representa a dinâmica do processo real.
3. **Aleatoriedade na seleção do veículo:** No momento de seleção do veículo, foi usada uma função de seleção aleatória, mas que na prática, funciona em função de prioridades estabelecidas pelo setor responsável pela seleção dos veículos.
4. **Não foi considerado o reaproveitamento de rotas em zonas distintas:** É comum que um frete seja fragmentado para duas cidades que estejam em duas zonas de macrorregiões, deixando parte da carga no meio do caminho e terminando o restante em outra cidade.

5. **Tarifa de frete mais econômica:** a tabela de custo tarifário varia em função dos tipos de veículos e transportadores, mas que para este trabalho foi tratada como um parâmetro.
6. **A distribuição do peso no assoalho dos veículos:** A alocação proposta no trabalho foi feita de maneira simples, preocupando em distribuir melhor os itens entre os *buckets* e buscando a distribuição uniforme ao longo da carreta. Todavia, em termos práticos, o problema é um pouco mais complexo em função de imposições legais estabelecidas pelo Contran<sup>10</sup>, que podem implicar em multas a depender da distribuição do peso por eixo do conjunto caminhão e carreta.

Os elementos destacados anteriormente são aspectos que, embora tenham facilitado a implementação da heurística proposta, exigem uma análise crítica. Essas simplificações podem impactar a fidelidade da solução em relação à complexidade logística do problema real, o que abre discussões para a implementação de estratégias de solução para o problema mais refinadas e robustas no futuro. Por outro lado, entende-se que a proposta de solução desenvolvida seja um elemento que possa auxiliar nas tomadas de decisão associadas ao problema.

---

<sup>10</sup> O descumprimento das regras estabelecidas pelo Conselho Nacional de Trânsito (Contran) e pelas agências de transporte correspondentes podem implicar em multas por excesso de peso. Os órgãos de trânsito e transporte, em conjunto com as forças de segurança, têm a responsabilidade de aplicar e fiscalizar essas regulamentações.

## 6 Resultados

Este capítulo tem como foco apresentar e caracterizar as instâncias de teste utilizadas neste trabalho, explicar como são registradas as saídas da heurística, bem como expor como foram conduzidos os experimentos computacionais, visando a validação do algoritmo proposto.

### 6.1 Caracterização das instâncias

Em linhas gerais, as instâncias foram geradas considerando dias distintos de operação do setor de montagem da carga dos caminhões. Cada dia analisado permitiu extrair uma base de dados que informava quais eram os “itens disponíveis” para abastecimento das carretas, o que incluía informações sobre peso, tipo de **Produto Acabado (PA)**, destino final, localidade do cliente, data do pedido, prazo de entrega e data de faturamento, por exemplo.

Para um item ser classificado como disponível no estoque de **PA** ele precisa estar alocado à algum pedido de cliente e também não ter nenhum bloqueio que o impeça de ser carregado e faturado. Pela transação VL06F do **SAP** é possível extrair a base de dados em tempo real que relaciona todos os itens (remessas) disponíveis no estoque de **PA**. Um total de cinco instâncias foram geradas com a ajuda de uma base no Power BI<sup>11</sup>, que permitia filtrar os dados registrados do sistema **SAP**. Para seleção dos conjuntos de itens de cada instância foram adotados critérios objetivos, buscando diversificar o perfil do material no estoque **PA** bem como os destinos, considerando regiões heterogêneas do Brasil. Esta estratégia de diversificação tem como foco verificar *a posteriori* se o algoritmo é capaz de manter seu desempenho mesmo em situações diferentes de necessidade de alocação dos **PA**.

Neste contexto, a variação do dia de referência da base consultada proporcionou a escolha de instâncias com foco em uma macrorregião em específico, definida em função da localidade com maior número de itens disponíveis do dia. Assim, para a composição das instâncias diversificadas foi feita uma pesquisa na base de dados completa da organização, com foco na seleção de dias em que as macrorregiões predominantes fossem distintas.

---

<sup>11</sup> O Power BI (*Power Business Intelligence*) é uma ferramenta de visualização de dados desenvolvida pela Microsoft, que permite aos usuários analisar e compartilhar *insights* a partir de conjuntos de dados, transformando dados brutos em informações visuais compreensíveis. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/pt-br/power-platform/products/power-bi/>>. Acesso em: 14 jan. de 2024

Em relação às informações sobre os veículos disponíveis, trata-se de um levantamento de dados diferente, pois esses dados não estão disponíveis no sistema **SAP**. A base de veículos foi gerada pela consulta ao sistema de pesagem, denominado PESA, que registra todos os veículos e cargas que foram faturadas e pesadas na balança de saída do setor de expedição. Note que, tais dados permitem estabelecer uma relativa associação de veículos com os itens liberados no estoque e os veículos que saíram da empresa em um dia  $D$  mas que tinha estoque disponível para carregamento no dia anterior ( $D-1$ ) e no dia ( $D$ ) em questão. É importante destacar que, para este trabalho, a base de veículos foi a mesma para todas as instâncias de testes, com a diferença de estar focada em atender remessas de **PA** de macrorregiões diferentes.

A Tabela 2 mostra as características de cada uma das cinco instâncias geradas por macrorregião, identificadas por um número (ID), o total de remessas de **PA** de **UMs** a serem alocadas e o seu respectivo o peso mínimo, máximo, médio e a mediana, em quilogramas (kg), bem como o total de veículos disponíveis. Nota-se que o conjunto de veículos disponíveis é fixo e o mesmo é aplicado para as cinco instâncias de itens (distintas macrorregiões).

Tabela 2 – Características das instâncias propostas para o trabalho

Macrorregião	ID	Remessas de <b>PA</b> das <b>UMs</b>	Peso (kg)			Média	Total de veículos
			Mínimo	Máximo	Mediana		
Campinas - SP	1	126	180	23595	2679	5079,73	52
Jundiaí - SP	2	193	320	23600	3550	5768,43	52
São João da Barra - RJ	3	220	320	24730	3810	6890,00	52
Jaraguá do Sul - SC	4	104	550	9960	4570	5391,00	52
Betim - MG	5	131	440	23400	7830	6691,95	52

## 6.2 Dados de saída da heurística

Como forma de ilustrar a saída da heurística empregada, esta seção se presta a explicar o produto da execução do programa elaborado para a solução da problemática apresentada. O procedimento de inteligência da heurística para a alocação dos itens aos *buckets* é realizado dentro de um laço de  $n$  iterações, considerando a possibilidade de alteração da sequência de seleção dos veículos disponíveis de cada instância estudada. Assim, um formato de alocação típica deve acontecer tal como mostrado na Figura 10, apresentada no Capítulo 5. A Figura 11 mostra um exemplo da tela que é impressa pelo algoritmo, considerando as iterações da heurística que são executadas para o caso em que  $n$  é igual a 20.

Note que a informação apresentada na Figura 11 é registrada de forma decrescente, considerando que a primeira linha representa a melhor solução observando o maior número de itens alocados ou o mesmo que ordem crescente de “Itens nao alocados”. No exemplo, há 220 itens disponíveis para alocar ou para serem carregados na macrorregião da instância escolhida, o algoritmo conseguiu alocar na melhor solução os 220 itens na iteração 1 (primeira iteração ou laço).

Figura 11 – Exemplo de saída da heurística ordenada pela melhor solução em relação ao total de itens alocados, quando o total de iterações ( $n$ ) é igual a 20

```

-----
Iteracao: 20
-----
Iteração : 1 => Itens nao alocados: 0/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 18 => Itens nao alocados: 1/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 12 => Itens nao alocados: 2/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 10 => Itens nao alocados: 8/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 11 => Itens nao alocados: 8/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 4 => Itens nao alocados: 11/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 5 => Itens nao alocados: 12/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 8 => Itens nao alocados: 12/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 15 => Itens nao alocados: 12/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 6 => Itens nao alocados: 13/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 9 => Itens nao alocados: 13/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 13 => Itens nao alocados: 13/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 19 => Itens nao alocados: 13/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 20 => Itens nao alocados: 13/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 21
Iteração : 7 => Itens nao alocados: 14/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 17 => Itens nao alocados: 15/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 14 => Itens nao alocados: 16/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 16 => Itens nao alocados: 16/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 3 => Itens nao alocados: 17/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22
Iteração : 2 => Itens nao alocados: 20/ Itens Disponíveis para alocar: 220 --> Veiculos Rejeitados: 22

```

Fonte: Elaborado pelos autores.

Por conseguinte, em cada iteração da heurística é feito um registro de todos os veículos aproveitados e rejeitados, considerando o total de veículos disponíveis, limitado a um máximo de 52. Ao término da iteração, tem-se a soma de veículos alocados e rejeitados. No caso da melhor iteração deste exemplo (iteração 1), o campo de “Veículos Rejeitados” foi de 21. Note que, ao selecionar uma determinada macrorregião de uma determinada instância, a heurística define aleatoriamente quais são as transportadoras/veículos que atendem determinada região, que, por sua vez, delimita uma quantidade de veículos dentro do conjunto de 52 veículos possíveis, que poderão ser usados para alocar carga pelo algoritmo.

A Figura 12 mostra a quantidade de “veículos aproveitados” (QtdVeiculo) em cada iteração, bem como a soma de itens alocados na coluna (SomaItems), bem como a soma dos pesos em quilogramas (SomaPeso) e o KPI de frete morto médio na coluna (MediaOcupacao). Assim, somando a quantidade de “veículos aproveitados” da Figura 12 com a quantidade de “veículos rejeitados” da Figura 11, chega-se na quantidade de “veículos selecionados” para esta macrorregião. Desta forma, na primeira iteração e a que mais alocou itens, foram selecionados 34 veículos para atender esta macrorregião. No final da iteração, somente 13 foram usados com carga e os outros 21 foram rejeitados por não atenderem ao critério de frete morto ou da taxa mínima de ocupação.

Figura 12 – Saída tabulada da heurística, ordenada pela sequência de iterações de 0 a 19

	Iteracao	QtdVeiculo	SomaItems	SomaPeso	MediaOcupacao
0	0	13	220	423590.0	4.46
1	1	12	200	401220.0	3.96
2	2	12	203	405430.0	3.52
3	3	13	209	413850.0	4.27
4	4	12	208	412930.0	3.06
5	5	13	207	411130.0	3.94
6	6	12	206	410350.0	4.19
7	7	13	208	412840.0	3.60
8	8	12	207	411080.0	4.44
9	9	13	212	416600.0	4.67
10	10	13	212	416680.0	4.16
11	11	13	218	421790.0	4.51
12	12	12	207	411920.0	4.29
13	13	12	204	407040.0	3.84
14	14	12	208	412930.0	4.50
15	15	12	204	407400.0	4.15
16	16	12	205	408670.0	3.64
17	17	13	219	422690.0	4.16
18	18	12	207	411920.0	3.72
19	19	13	207	410990.0	3.77

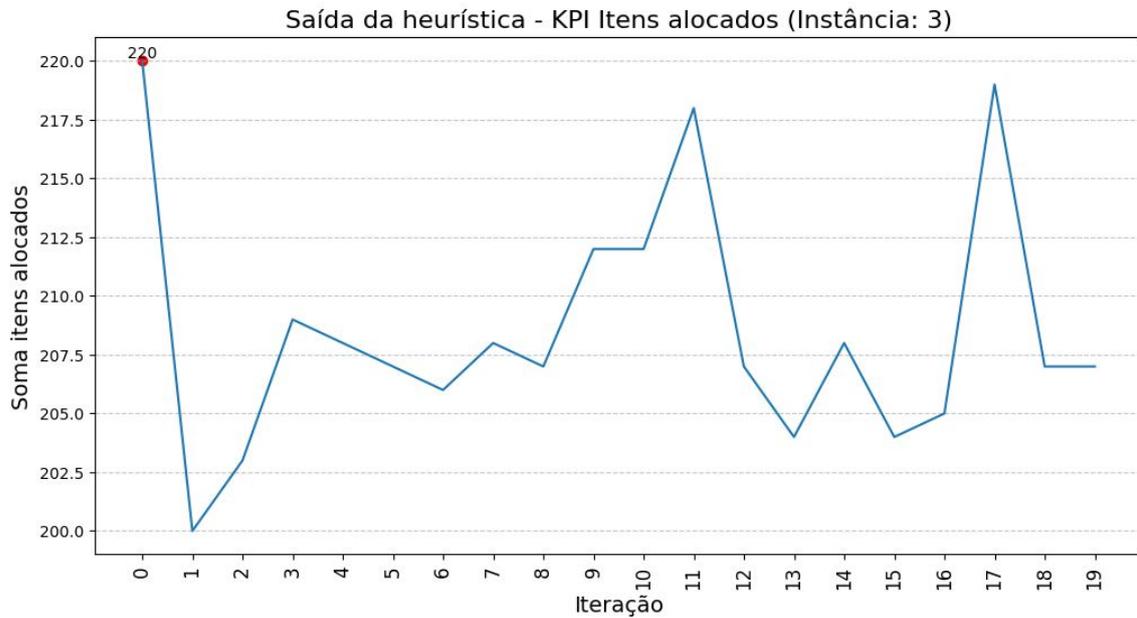
Fonte: Elaborado pelos autores.

É importante destacar que, o processo de seleção do melhor resultado pelo maior número de itens carregados pode não ser o foco principal da empresa para a tomada de decisão. Neste caso, como o algoritmo registra também outras informações sobre as soluções obtidas, possibilitando reordenar a solução apresentada em função de outros objetivos de desempenho, como a possibilidade de ranqueamento em função do máximo de soma de peso de itens alocados ou em função das soluções que mais utilizaram veículos, por exemplo.

Como uma forma complementar ao algoritmo proposto, foram elaborados um conjunto de gráficos que permitem ilustrar o comportamento das soluções geradas em função de indicadores-chave (KPIs) como o total de “itens alocados”, “peso total alocado” e “% de frete morto”, por exemplo, em cada iteração da heurística, conforme mostram as Figuras 13-15, respectivamente.

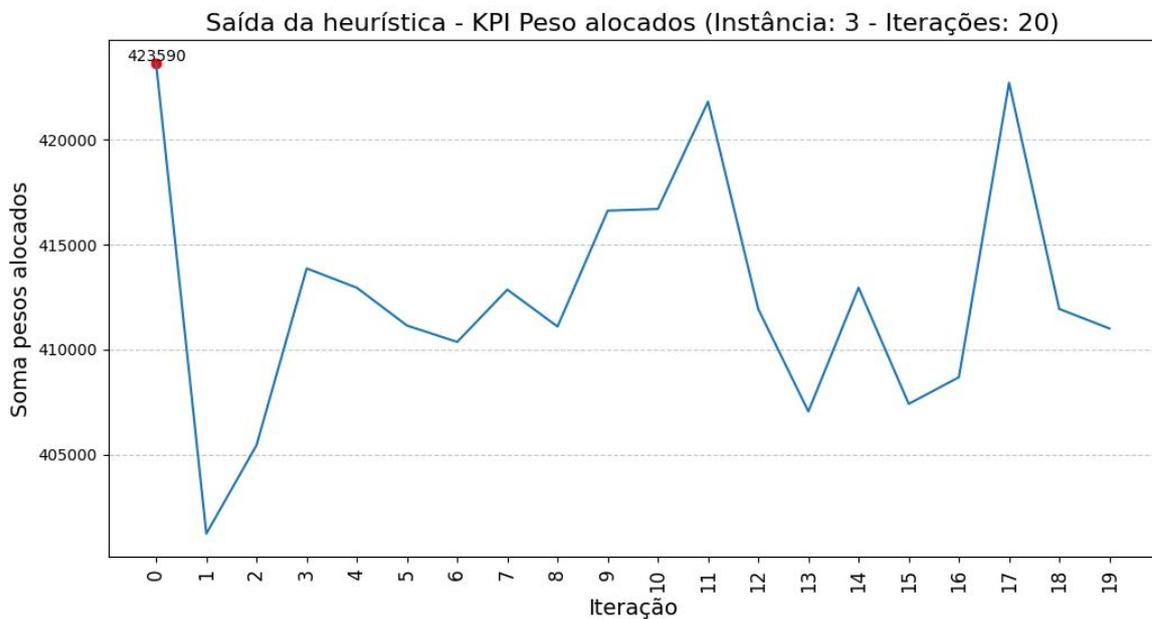
No exemplo ilustrado pelas Figuras 13-15, dentre as 20 iterações, é possível observar que a primeira iteração de número “0” na escala da abcissa do gráfico apresentou a melhor solução em termos de quantidade de itens carregados e peso total faturado, com 220 itens alocados e 423 toneladas de produto, respectivamente.

Figura 13 – Indicador de saída que registra a soma de itens alocados por iteração



Fonte: Elaborado pelos autores.

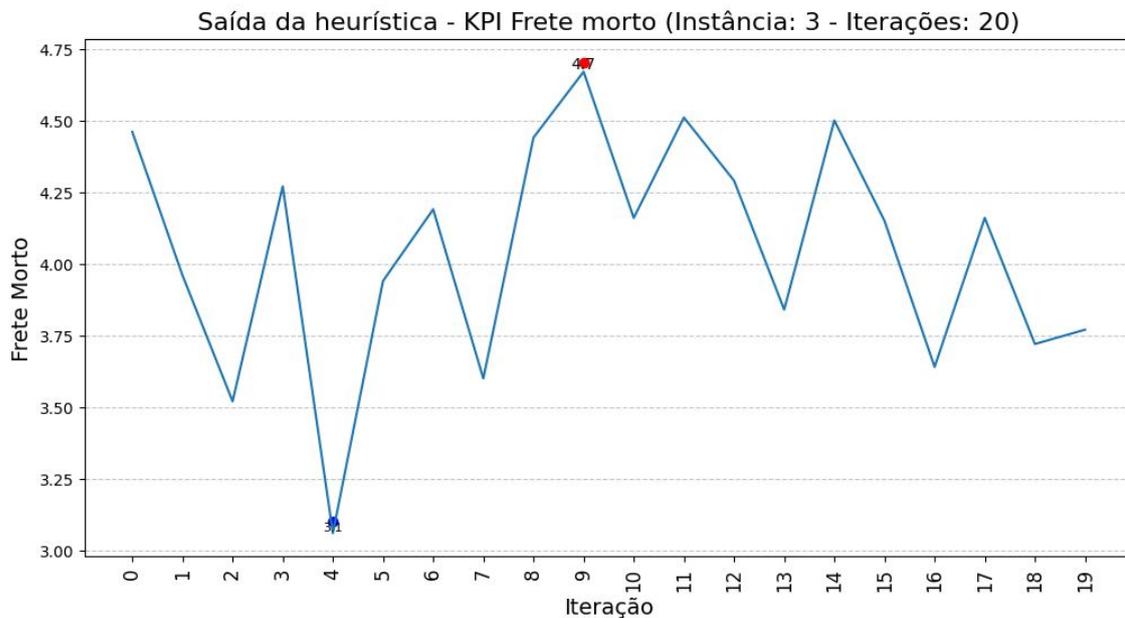
Figura 14 – Indicador de saída que registra a soma de peso alocado por iteração



Fonte: Elaborado pelos autores.

A situação descrita anteriormente se mostra coerente, na medida que se espera uma correlação entre a quantidade de itens e peso faturado, embora não precise ser, necessariamente, uma relação direta e obrigatória (pode se ter muito itens alocados, mas que juntos somam pouco peso), quando se observam todas as soluções.

Figura 15 – Indicador de saída que registra o percentual de frete morto médio por iteração



Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto à performance de ocupação, ou menor o percentual de frete morto, a iteração de melhor resultado foi a quarta, de número 3, apresentando um frete morto médio de 3,06%, que, quando comparado com os valores obtidos no contexto operacional real, pode ser considerada uma boa solução para este indicador. É relevante ressaltar que, apesar de melhor ocupação dos recursos de transporte, esta iteração não é a melhor solução em termos de quantidade faturada (itens/peso).

Em resumo, toda vez que a heurística é executada para uma instância, é gerada uma sequência aleatória de veículos e transportadoras que podem ser selecionados para aquela macrorregião. Essa sequência de veículos será utilizada para a tentativa de alocação do maior número de **UMs** possível, desde que assegurado o limite de 93% de ocupação da lotação dos veículos e demais restrições do problema.

### 6.3 Experimentos computacionais

O modelo matemático e heurística propostos foram implementados em linguagem Python e executados no Google Colab. A etapa de modelagem foi resolvida via resolvidor comercial Gurobi. Os experimentos computacionais foram conduzidos em um sistema equipado com um processador Intel(R) Core (TM) I5-7300 CPU 2,60 GHz e 16 GB de memória RAM.

Para garantir a possibilidade de replicação dos experimentos computacionais definiu-se um total de 10 sementes do computador, que foram utilizadas para cada conjunto de experimentos propostos, por instância. A fixação da semente é também um elemento importante e que permite a exploração e obtenção de soluções variadas para cada instância, em cada execução completa do algoritmo.

Para execução facilitada da heurística foi desenvolvido um *script* adaptado ao ambiente do Google Colab. Ao executar o *script* a solução para o problema de alocação e organização de cargas é obtida e impressa em um arquivo. Observe que, a seleção das informações de saídas foram definidas de forma a permitir analisar a performance de alocação dos itens, conforme descrito na Seção 6.2.

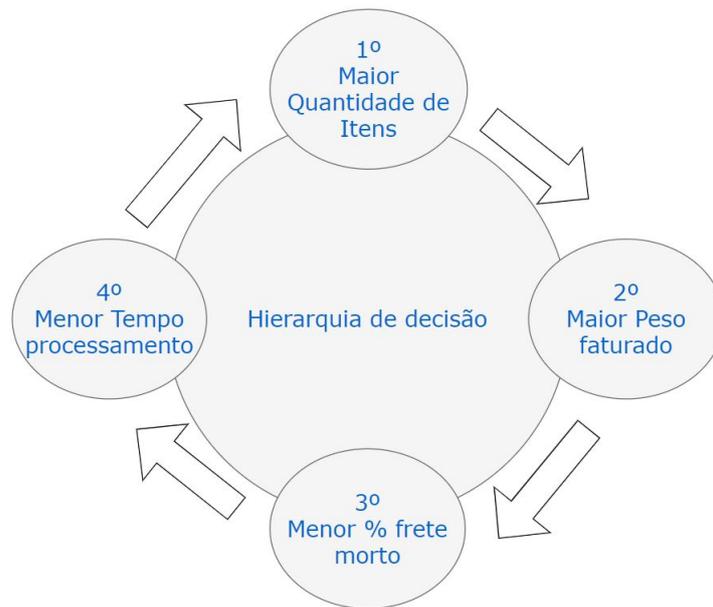
No tocante aos experimentos computacionais, o foco do trabalho consistiu em buscar validar o algoritmo em função de elementos-chave, isso é, de maior relevância, que poderiam contribuir no processo de tomada de decisão para a alocação dos itens aos veículos. Para cada execução completa do algoritmo, um número  $n$  de iterações deverá ser executada, resultando em um total de  $n$  soluções viáveis para o problema. Assim, em cada iteração calcula-se a soma de itens alocados, a soma de peso destes itens alocados e a média do frete morto ( $\frac{\text{Peso total alocado}}{\text{Capacidade total dos veículos}}$ ).

Após a execução completa do algoritmo para as  $n$  iterações vinculadas a cada semente fixada, três diferentes rankings são formados, considerando o total de itens, a soma de peso, e o percentual de frete morto, ordenados da melhor para a pior solução em cada quesito. Adicionalmente, como todas as soluções devem atender ao critério de percentual de frete morto preestabelecido, definiu-se um critério de hierarquia para questões de desempate entre as soluções para a estruturação dos rankings, conforme mostrado na Figura 16.

Na Figura 16 é mostrada a sequência de decisão para determinação dos rankings, a começar pela maior soma de itens alocados, seguido pela maior soma de peso alocado, menor percentual de frete morto médio, e, por fim o menor tempo de processamento. Como exemplo, caso o ranking seja elaborado a partir das soluções de maior número de itens alocados, se houver empate, observa-se aquele que tiver o maior peso faturado. Em persistindo o empate avalia-se aquele que possui menor percentual de frete morto e, se necessário, na sequência, avalia-se o tempo de processamento.

Note que, a avaliação do tempo de execução da heurística é um dado importante a se avaliar. É de conhecimento que, no ambiente real, há disponibilidade de, no máximo 60 minutos para definição de quais itens serão alocados a cada veículo. Assim, ficou estabelecido que um tempo limite 10 minutos de execução da heurística seria uma boa referência, considerando a necessidade de se ter tempo hábil para a análise dos resultados pelo(a) operador(a) e posterior alocação dos itens aos veículos na prática, embora o algoritmo proposto não tenha sido modelado tendo como critério de parada um limite de tempo prefixado.

Figura 16 – Hierarquia circular de decisão dos KPIs para uso como critério de desempate



Fonte: Elaborado pelos autores.

Neste contexto, o plano experimental foi realizado em duas etapas subsequentes: *i*) análise do comportamento da heurística frente a alterações no número  $n$  de iterações da heurística; e *ii*) análise da variação do parâmetro que estabelece o limite de checagens de tentativa de alocação de itens ao assolho de cada veículo selecionado. Em ambas etapas, além de avaliar o tempo médio de execução do algoritmo, os resultados brutos serão organizados em função de três diferentes indicadores de desempenho (KPIs), são eles:

- **Máx. itens faturados:** contabiliza o total de itens alocados na solução;
- **Máx. peso faturado:** contabiliza a soma dos pesos dos itens faturados na solução;
- **% mín. de frete morto:** indica o percentual de frete morto gerado em função dos itens alocados aos veículos da solução.

Ao final dessas duas etapas de experimentos é apresentada uma discussão dos resultados obtidos em relação ao contexto das soluções reais implementadas pela empresa.

### 6.3.1 Análise de indicadores de desempenho em função do número de iterações da heurística

No primeiro conjunto de testes computacionais, para cada uma das instâncias propostas, três diferentes valores para o parâmetro que estabelece o número de iterações ( $n$ ) da heurística foram adotados, são eles: 100, 200 e 400. Todos os demais parâmetros internos da heurística foram mantidos fixos. A Tabela 3 sumariza os melhores resultados obtidos, por instância (ID), à medida que se aumenta o total de iterações  $n$ , considerando as 10 execuções completas do algoritmo, uma para cada semente fixada.

Cada linha da Tabela 3 representa uma solução viável do problema instanciado, associada com uma das 10 diferentes execuções (sementes) do algoritmo. Para cada ID e  $n$ , três soluções são selecionadas em função do melhor desempenho para cada indicador monitorado (**Máx. itens faturados**, **Máx. peso faturado** e **% mín. de frete morto**) e o tempo total de execução de uma execução completa da heurística para uma dada semente (**Tempo (min)**).

É possível verificar que as três primeiras linhas de cada instância representam as melhores soluções para o indicador **Máx. itens faturados**, para  $n$  fixado em 100, 200 e 400 respectivamente. De maneira análoga, da quarta à sexta linhas associa-se ao indicador **Máx. peso faturado**, assim com as três últimas se associam com o indicador **% mín. de frete morto**.

Em relação à quantidade de itens alocados e a soma dos pesos dos veículos pode-se observar que, os melhores valores obtidos permanecem constantes, independentemente do aumento de iterações (100, 200 ou 400) em todas as instâncias avaliadas. Esse padrão indica que a variação de  $n$  não impactou diretamente na quantidade de itens alocados e pesos dos veículos, o que pode representar a identificação de ótimos locais ou globais para estes indicadores. Além disso, é possível observar que há sempre uma relação forte entre máximo de itens alocados e a soma dos pesos, o que, de certa forma, era um elemento esperado em função dos critérios estabelecidos para desempate (ver Figura 16), embora pudessem existir soluções com a mesma quantidade de itens alocados mas que a soma dos pesos fosse diferente (um exemplo pode ser visto na Tabela 8, obtido em um conjunto de experimentos computacionais posterior).

Quanto ao indicador **% mín. de frete morto**, nota-se que as melhores soluções para este indicador não são as mesmas que estão associadas com as melhores soluções de itens e peso faturados, o que demonstra o *trade-off* entre os indicadores de desempenho. Tal situação deixa claro que existem soluções não dominadas entre o conjunto de soluções viáveis identificadas, ou seja, não é possível indicar uma única solução que seja a melhor entre todas, quando se analisa todos os indicadores ao mesmo tempo. Como exemplo, pode-se citar a instância 3, no qual há uma solução com frete morto igual a zero, mas que não aloca todos os itens a faturar, assim como, há também uma solução em que se alocam todos os itens mas com percentual de frete morto maior que zero.

Tabela 3 – Melhores valores dos indicadores de desempenho monitorados, considerando todas as soluções obtidas ao variar o número de iterações ( $n$ ) em 100, 200 e 400, para 10 diferentes sementes

ID	$n$	Itens a faturar	Máx. itens faturados	Máx. peso faturado (t)	% min. de frete morto	Tempo (min)
			<b>114</b>	580,72	1,49	1,77
			<b>114</b>	580,72	1,49	3,49
			<b>114</b>	580,72	1,49	7,11
			114	<b>580,72</b>	1,49	1,77
1	200	126	114	<b>580,72</b>	1,49	3,49
			114	<b>580,72</b>	1,49	7,11
			104	453,30	<b>0,53</b>	0,74
			104	453,30	<b>0,53</b>	1,42
			104	453,30	<b>0,53</b>	2,99
			<b>182</b>	799,41	2,40	2,12
			<b>182</b>	799,41	2,07	4,10
			<b>182</b>	799,41	1,62	7,98
			182	<b>799,41</b>	2,40	2,12
2	200	193	182	<b>799,41</b>	2,07	4,10
			182	<b>799,41</b>	1,62	7,98
			177	781,80	1,41	2,12
			177	781,80	1,41	4,10
			172	677,21	<b>1,17</b>	3,52
			<b>220</b>	423,60	3,42	4,15
			<b>220</b>	423,60	3,42	7,70
			<b>220</b>	423,60	3,42	46,37
			220	<b>423,60</b>	3,42	4,15
3	200	220	220	<b>423,60</b>	3,42	7,70
			220	<b>423,60</b>	3,42	46,37
			112	248,31	<b>1,66</b>	3,47
			112	248,30	<b>1,66</b>	7,58
			112	248,31	<b>1,66</b>	15,20
			<b>104</b>	683,40	0,29	1,10
			<b>104</b>	683,40	0,29	1,38
			<b>104</b>	683,40	0,29	3,12
			104	<b>683,40</b>	0,29	1,10
4	200	104	104	<b>683,40</b>	0,29	1,38
			104	<b>683,40</b>	0,29	3,12
			103	679,70	<b>0,00</b>	1,10
			103	679,70	<b>0,00</b>	1,38
			103	679,70	<b>0,00</b>	3,12
			<b>78</b>	897,60	5,41	2,90
			<b>78</b>	897,60	5,41	3,47
			<b>78</b>	897,60	5,41	6,04
			78	<b>897,60</b>	5,41	2,90
5	200	131	78	<b>897,60</b>	5,41	3,47
			78	<b>897,60</b>	5,41	6,04
			7	80,80	<b>1,48</b>	1,05
			7	80,80	<b>1,48</b>	1,15
			7	80,80	<b>1,48</b>	2,06

Ainda sobre o indicador de percentual de frete morto, com a exceção da instância 2, não foi possível observar uma melhoria das soluções obtidas à medida que se aumenta o número de iterações. A expectativa inicial dos pesquisadores era que o padrão observado para a instância 2 no indicador de frete morto, pudesse também ser vista para outros indicadores e instâncias avaliadas, considerando que, ao aumentar o valor de  $n$ , espera-se que seja possível explorar um número maior de soluções. Por outro lado, sabe-se também que o algoritmo pode ter encontrado soluções que são ótimo locais ou globais para alguns indicadores, o que justificaria o padrão

Ao analisar o tempo de execução do algoritmo, verifica-se que à medida que o número de iterações aumenta o tempo computacional de execução tende a aumentar, como esperado. A única exceção, mas por uma diferença pequena, novamente a instância 2, quando avaliado o indicador de percentual de frete morto. Note também que, o aumento do tempo não segue necessariamente um comportamento linear, como acontece com a instância instância 3 para as 400 iterações, cujo tempo de execução supera os 10 minutos (meta preestabelecida). Acredita-se que tais particularidades sejam em função de questões vinculadas ao processo de uniformização da carga nos veículos que é resolvida por meio do resolvidor comercial Gurobi. A natureza combinatória dos problemas pode contribuir para um gasto de tempo que pode variar bastante entre os modelos resolvidos.

Em resumo, para os conjuntos de instâncias avaliadas, pode-se dizer que o aumento do número de iterações ( $n$ ) não foi capaz de propiciar melhorias significativas nas melhores soluções encontradas em cada indicador de desempenho. Além disso, ficou claro que nem sempre a melhor solução associada com um dos indicadores será àquela que dominará em todos os outros indicadores. Dessa forma, o tomador de decisão que utilizar a heurística proposta deverá criar um filtro para seleção entre as soluções não dominadas, considerando todos os indicadores de desempenho ou em função de prioridades estabelecidas pelo próprio setor.

### 6.3.2 Análise da alteração no parâmetro que estabelece o número de tentativas de alocação de itens aos veículos

O parâmetro da heurística selecionado para investigação nos resultados é uma constante inteira ( $t$ ) que determina o quantitativo de tentativas de alocação de **UMs** restantes na lista itens disponíveis. Ressalta-se que, na Seção 6.3.1 todos os testes computacionais foram realizados com o valor de  $t$  fixado em 20. O valor de 20 inicial foi escolhido por estar na ordem de grandeza entre a quantidade total de itens disponíveis em cada instância do problema (em média 150 itens) e a quantidade média de itens carregados em veículos (em média 10).

Neste contexto os experimentos apresentados nas Tabelas 4-8 mostram que as melhores soluções para os três indicadores de desempenho monitorados (**KPIs**), em função da variação do parâmetro  $t$ , que será avaliado para os valores de 20, 40, 60 e 80 para as instâncias de 1 a 5, respectivamente. Nesta seção de experimentos, a quantidade de iterações ( $n$ ) foi fixada 100, sendo executadas 10 execuções completas do algoritmo, vinculadas às mesmas sementes estabelecidas nos testes anteriores.

Ao analisar o comportamento das soluções obtidas para diferentes valores de  $t$  verifica-se que não há clareza em relação a um único valor de  $t$  que obtivesse os melhores resultados em todos os indicadores de desempenho, conforme destacado em negrito nas tabelas.

Tabela 4 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro  $t$  para a instância 1 com  $n = 100$ 

<b>KPI</b>	$t$	<b>Máx. itens faturados</b>	<b>Máx. peso faturado (t)</b>	<b>% mín. de frete morto</b>	<b>Tempo (min)</b>
Best (Máx. itens)		<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,49	1,77
Best (Máx. peso)	20	<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,49	1,77
Best (% mín. de frete morto)		104	453,30	<b>0,53</b>	0,74
Best (Máx. itens)		<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,66	1,73
Best (Máx. peso)	40	<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,66	1,73
Best (% mín. de frete morto)		108	507,10	0,83	0,73
Best (Máx. itens)		<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,82	1,77
Best (Máx. peso)	60	<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,82	1,77
Best (% mín. de frete morto)		108	516,90	0,61	0,71
Best (Máx. itens)		<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,66	1,75
Best (Máx. peso)	80	<b>114</b>	<b>580,72</b>	1,66	1,75
Best (% mín. de frete morto)		56	377,50	0,67	1,87

Tabela 5 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro  $t$  para a instância 2 com  $n = 100$ 

<b>KPI</b>	$t$	<b>Máx. itens faturados</b>	<b>Máx. peso faturado (t)</b>	<b>% mín. de frete morto</b>	<b>Tempo (min)</b>
Best (Máx. itens)		<b>182</b>	<b>799,40</b>	2,40	0,21
Best (Máx. peso)	20	<b>182</b>	<b>799,40</b>	2,40	0,21
Best (% mín. de frete morto)		177	781,80	1,41	0,21
Best (Máx. itens)		<b>182</b>	<b>799,40</b>	2,07	1,93
Best (Máx. peso)	40	<b>182</b>	<b>799,40</b>	2,07	1,93
Best (% mín. de frete morto)		181	796,40	1,32	1,93
Best (Máx. itens)		<b>182</b>	<b>799,40</b>	1,96	2,04
Best (Máx. peso)	60	<b>182</b>	<b>799,40</b>	1,96	2,04
Best (% mín. de frete morto)		173	686,60	1,18	7,4
Best (Máx. itens)		<b>182</b>	<b>799,40</b>	<b>0,97</b>	1,99
Best (Máx. peso)	80	<b>182</b>	<b>799,40</b>	<b>0,97</b>	1,99
Best (% mín. de frete morto)		<b>182</b>	<b>799,40</b>	<b>0,97</b>	1,99

Tabela 6 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro  $t$  para a instância 3 com  $n = 100$ 

<b>KPI</b>	$t$	<b>Máx. itens faturados</b>	<b>Máx. peso faturado (t)</b>	<b>% mín. de frete morto</b>	<b>Tempo (min)</b>
Best (Máx. itens)		<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,42	4,15
Best (Máx. peso)	20	<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,42	4,15
Best (% mín. de frete morto)		112	248,30	1,66	3,47
Best (Máx. itens)		<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,58	0,53
Best (Máx. peso)	40	<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,58	0,53
Best (% mín. de frete morto)		112	248,90	<b>1,41</b>	5,70
Best (Máx. itens)		<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,55	4,47
Best (Máx. peso)	60	<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,55	4,47
Best (% mín. de frete morto)		112	248,90	<b>1,41</b>	5,10
Best (Máx. itens)		<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,64	0,55
Best (Máx. peso)	80	<b>220</b>	<b>423,60</b>	3,64	0,55
Best (% mín. de frete morto)		86	199,10	1,66	3,08

Note que, para as instâncias 1 e 5, quando  $t$  é fixado em 20, o algoritmo retorna os melhores resultados absolutos. Para a instância 4 o parâmetro  $t$  fixado em 20 ou em 80, permitiu chegar em soluções de mesma ordem de grandeza para os três **KPIs**. Já para a instância 3 não é possível indicar claramente um valor de  $t$  que tenha se mostrado dominante em relação aos demais. Por fim, na instância 2, verificou-se que os melhores resultados foram obtidos quando o valor de  $t$  foi fixado em 80 (ver Tabela 5).

Tabela 7 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro  $t$  para a instância 4 com  $n = 100$ 

<b>KPI</b>	$t$	<b>Máx. itens faturados</b>	<b>Máx. peso faturado (t)</b>	<b>% mín. de frete morto</b>	<b>Tempo (min)</b>
Best (Máx. itens)		<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	1,10
Best (Máx. peso)	20	<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	1,10
Best (% mín. de frete morto)		103	679,70	<b>0,00</b>	1,10
Best (Máx. itens)		<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	0,72
Best (Máx. peso)	40	<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	0,72
Best (% mín. de frete morto)		74	554,00	0,01	0,77
Best (Máx. itens)		<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	0,72
Best (Máx. peso)	60	<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	0,72
Best (% mín. de frete morto)		98	660,40	<b>0,00</b>	0,72
Best (Máx. itens)		<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	0,72
Best (Máx. peso)	80	<b>104</b>	<b>683,40</b>	0,29	0,72
Best (% mín. de frete morto)		103	679,70	<b>0,00</b>	0,72

Tabela 8 – Resultados obtidos por meio da variação do parâmetro  $t$  para a instância 5 com  $n = 100$ 

<b>KPI</b>	$t$	<b>Máx. itens faturados</b>	<b>Máx. peso faturado (t)</b>	<b>% mín. de frete morto</b>	<b>Tempo (min)</b>
Best (Máx. itens)		<b>78</b>	<b>897,60</b>	5,41	2,90
Best (Máx. peso)	20	<b>78</b>	<b>897,60</b>	5,41	2,90
Best (% mín. de frete morto)		7	80,80	<b>1,48</b>	1,05
Best (Máx. itens)		<b>78</b>	896,40	5,53	2,87
Best (Máx. peso)	40	<b>78</b>	896,40	5,53	2,87
Best (% mín. de frete morto)		7	80,80	<b>1,48</b>	0,97
Best (Máx. itens)		<b>78</b>	896,40	5,53	0,28
Best (Máx. peso)	60	<b>78</b>	896,40	5,53	0,28
Best (% mín. de frete morto)		7	80,80	<b>1,48</b>	0,97
Best (Máx. itens)		<b>78</b>	896,40	5,54	2,82
Best (Máx. peso)	80	<b>78</b>	896,40	5,54	2,82
Best (% mín. de frete morto)		7	80,80	<b>1,48</b>	0,10

Outro aspecto relevante a se destacar em relação ao instância 2 é o fato de que, quando  $t$  é em 80, há uma clara dominância de uma (ou mais) solução(ões), considerando os três indicadores de desempenho. Esse tipo de solução é muito boa para o tomador decisão, pois não precisa priorizar um indicador em detrimento do outro. Por outro lado, como destacado anteriormente, tal situação não representa um cenário comum e factível de se alcançar em todas as instâncias, pelo fato de poder existir um processo de análise de compensação em relação aos indicadores de desempenho, isto é, ganha por um lado e perde por outro.

Outro elemento interessante de se destacar é que, ao analisar os resultados apresentados pela instância 5, fica evidente que há soluções que podem apresentar um mesmo quantitativo de itens alocados aos veículos, mas que possuem peso total distintos. Além disso, ao comparar a soluções com  $t$  igual a 60 e 80, por exemplo, verifica-se que, a julgar pelo percentual de frete morto das soluções, há diferenças também nos veículos ou itens que foram utilizados nas soluções.

Em resumo, esse conjunto de testes computacionais foi capaz de mostrar a relevância do parâmetro  $t$  no dentro do processo de diversificação da solução para obtenção de melhores resultados. Por outro lado, não foi possível estabelecer um valor fixo de  $t$  que sobressaísse sobre os demais, seja para todas ou a maioria das instâncias avaliadas. Ademais, é importante destacar que como foram avaliadas apenas 5 instâncias, talvez seja interessante avaliar um volume maior de instâncias para ter uma clareza maior sobre o impacto do parâmetro  $t$  no algoritmo. Acrescenta-se também a possibilidade de tornar esse parâmetro dinâmico (que pode aumentar ou diminuir), visando ampliar a diversificação das soluções no processo de otimização da heurística.

### 6.3.3 Discussão dos resultados em função do processo real

Para iniciar uma discussão dos resultados em relação ao processo real é importante ter em mente que as simplificações do problema e no processo de construção das instâncias, torna a comparação direta algo não muito apropriado. A fixação de uma única macrorregião, por exemplo, é um elemento que, na prática, limita a capacidade de soluções com menores custos operacionais e percentual de frete morto global do dia, por exemplo. A possibilidade de atendimento simultâneo de duas localidades distintas, que compartilham parcialmente uma ou mais rotas (rodovias), com um único veículo, é uma situação que se mostra necessária em algumas situações reais.

Por outro lado, pelos resultados obtidos, acredita-se que, mesmo que, de forma desagregada por macrorregião, as soluções propostas pelo algoritmo sejam capazes de auxiliar os tomadores de decisão em seu dia a dia, fornecendo uma boa parte da solução do problema, que consideraria a grande maioria da carga de **UMs** a ser alocada para uma única macrorregião, desde que, as informações dos veículos disponíveis e das cargas da localidade estejam de acordo com o problema real. Note que, com exceção às instâncias 3 e 4, que em seus melhores resultados é possível alocar toda a carga metálica. As instâncias 1, 2 e 5, alocaram 90,47% ( $\frac{114}{126}$ ), 94,30% ( $\frac{182}{193}$ ) e 59,54% ( $\frac{78}{131}$ ), respectivamente, considerando todas as **UMs** disponíveis para se faturar, o que abre espaço para integração com outros veículos e rotas vinculadas a outras macrorregiões.

Como destacado anteriormente, a rotina operacional do programador da expedição exige uma tomada de decisão de múltiplas alocações a cada hora de trabalho. Assim, considerando o tempo médio de execução da heurística para os casos fictícios estudados, se mostrou inferior ao limite de 10 minutos, preestabelecido como um tempo adequado, pode-se dizer a heurística conseguiria cumprir o seu papel de apresentar soluções alternativas para facilitar a alocação dos itens aos veículos no contexto real.

Outra questão a se destacar é o fato da heurística apresentar várias soluções após a sua execução completa. Assim, espera-se que, com o uso do algoritmo, o programador amplie sua capacidade analítica sobre a situação momentânea de atendimento, do faturamento, dos veículos disponíveis e das remessas liberadas, o que possibilitaria um melhor direcionamento da decisão e melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Em se tratando da escolha da solução entre àquelas apresentadas pela heurística, pode-se dizer que, a análise dos resultados pode ser ainda mais complexa e desafiadora quando outros indicadores de desempenho adotados pela empresa forem levados em consideração e priorizados em função de metas de curto, médio ou longo prazo. Assim, a tomada de decisão deve ir além da análise isolada de um ou mais dos indicadores abordados neste trabalho (quantidade de itens, soma dos peso faturados e percentual de frete morto), sendo importante considerar questões econômico-financeiras e operacionais da organização.

## 7 Considerações Finais

Este trabalho teve como foco a proposição de uma heurística para a resolução do problema de alocação de cargas (unidades metálicas) heterogêneas de aços especiais (inoxidáveis, elétricos e alto carbono) em veículos destinados ao transporte rodoviário de uma metalúrgica localizada no estado de Minas Gerais. O trabalho se deu a partir do entendimento e descrição das características do problema estudado, destacando as particularidades e desafios no processo de tomada de decisão do setor responsável por solucionar o problema real. Neste sentido, a heurística proposta foi elaborada de forma a atender alguns dos objetivos-chave no processo de tomada de decisão quanto à alocação dos produtos acabados.

A lógica da heurística proposta envolve a seleção de veículos e alocação dos produtos acabados, realizada de forma sequencial, porém com certo grau de aleatoriedade, em função da ordem de seleção dos veículos e dos itens. Além disso, a heurística utiliza um modelo matemático de otimização para distribuir a carga de forma uniforme nos veículos. O foco de uma única macrorregião por instância e a aleatoriedade na seleção de transportadora e veículo, foram algumas das diversas simplificações do problema que foram adotadas na construção do algoritmo e proposição das instâncias de teste.

Cinco diferentes instâncias foram propostas e avaliadas para analisar o comportamento da heurística frente a variação do parâmetro que estabelecia o número de iterações do algoritmo e o parâmetro que definia o total de tentativas de alocação de itens por veículo. Para analisar os resultados foram considerados como indicadores de desempenho a quantidade de itens e a soma dos pesos alocados aos veículos, o percentual de frete morto médio das soluções, bem como o tempo total de execução completa do código, considerando todas as iterações avaliadas.

Como resultado, verificou-se que a variação do número iterações não se mostrou relevante para obtenção de melhorias em relação aos indicadores de desempenho de total de itens alocados e soma dos pesos dos veículos utilizados. Por outro lado, para o indicador de percentual de frete morto, uma das instâncias mostrou uma ligeira melhoria nos resultados à medida que se aumentava o número de iterações. Verificou-se também que as soluções apresentadas pela heurísticas podem ser não dominadas quando se avalia todos os indicadores ao mesmo tempo, o que torna a escolha de uma única solução mais complexa.

Os teste computacionais focados na variação do número de tentativas de alocação das cargas metálicas aos veículos mostraram que cada instância teve um comportamento distinto em relação aos diferentes valores do parâmetro estudados. Tal situação pode ser vista como uma questão relevante para a melhoria futura da heurística proposta, visando aumentar o número de soluções exploradas e obtenção de melhores soluções, considerando todos os indicadores estudados.

Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que, em um âmbito mais tático e estratégico, as soluções apresentadas pela heurística podem contribuir no processo de carregamento e escoamento de carga da empresa, reduzindo assim, um pouco do viés humano das decisões. Por outro lado, é de conhecimento que há ainda muitas oportunidades de melhoria no algoritmo, sobretudo para atender as expectativas de cunho mais comercial e financeiro de alguns indicadores de desempenho adotados pela empresa e outras questões de natureza técnica.

## 7.1 Trabalhos futuros

As sugestões e apontamentos para trabalhos futuros aqui apresentadas estão intimamente ligadas às restrições e simplificações adotadas neste trabalho e comentadas na Seção 5.3. Neste sentido, são elencadas a seguir algumas das ideias para continuidade do trabalho iniciado a partir desta pesquisa:

- **Estender a heurística para considerar as demais macrorregiões:** ampliar a aplicabilidade da heurística para abranger outras macrorregiões, proporcionando uma visão mais abrangente do problema.
- **Implementações de meta-heurísticas com foco na diversificação de soluções e fuga de ótimos locais:** ao explorar novas soluções e critérios de diversificação de soluções espera-se que seja possível obter soluções promissoras em tempo apropriado.
- **Implementações de algoritmos multiobjetivos:** considerando a natureza do problema que tem uma saída que permite ao decisor priorizar diferentes indicadores de desempenho, considerando um conjunto de soluções não dominadas.
- **Calibração automática dos parâmetros e análises estatísticas mais robustas dos resultados:** ao realizar um procedimento de calibração automática de todos os parâmetros será possível fixar os valores que melhor se ajustem aos problemas. Uma vez ajustados aos parâmetros, é importante gerar um volume maior de instâncias para poder interpretar estatisticamente os resultados obtidos.
- **Inserir o custo total da carga como uma nova condição de fronteira:** em termos operacionais, é importante manter as cargas abaixo de um determinado valor, como, por exemplo, 1 milhão de reais, para evitar a necessidade de escolta armada. Esta condição poderia ser integrada como o laço mais externo na heurística proposta.
- **Proposição de outras estratégias de distribuição de carga no assoalho dos veículos:** aperfeiçoar detalhando ainda mais a forma de posicionamento da carga no assoalho dos veículos, de maneira a evitar excesso de peso por eixo. Essa etapa deverá considerar os aspectos construtivos dos diversos tipos de carretas existentes.

- **Proposição de uma heurística ou meta-heurística para a distribuição de carga no assoalho dos veículos em substituição aos modelos matemáticos:** em função da natureza combinatorial do problema, e visando tornar a heurística construtiva proposta ainda mais rápida e escalável. Ao usar um procedimento aproximado para uniformização das cargas no assoalho dos veículos e que cumpra as metas e restrições de carga por eixo dos veículos, mesmo não tendo garantia de otimalidade na distribuição, já seria possível obter uma solução viável alternativa que reduziria a dependência do uso de resolvedores comerciais.

Por fim, é importante destacar também a importância de aprimoramentos para tornar a ferramenta de tomada de decisão mais precisa e completa em relação aos desafios e complexidades da gestão logística, para além do processo de carga dos veículos. Incorporar questões adicionais como possibilidade de reaproveitamento de rotas, variação das tarifas de frete e distribuição de peso podem contribuir ainda para a obtenção de solução mais abrangentes e alinhadas com as demandas da indústria.

# Referências

- ARVIS, J.-F.; RABALLAND, G.; MARTEAU, J.-F. **The cost of being landlocked: Logistics costs and supply chain reliability**. Washington DC: The World Bank, 2010. 124 p. ISBN 9780821384084. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10986/2489>>. Acesso em: 18 out. 2023.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, MCB UP Ltd, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002. ISSN 0144-3577. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/01443570210414338>>. Acesso em: 8 abr. 2022.
- BETARELLI, A. A.; DOMINGUES, E. P.; HEWINGS, G. J. D. Transport policy, rail freight sector and market structure: The economic effects in Brazil. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 135, p. 1–23, 2020. ISSN 0965-8564. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.018>>. Acesso em: 19 out. 2023.
- BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 202, n. 3, p. 615–627, 2010. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031>>. Acesso em: 8 jun. 2023.
- CANDIDO, L. C. X. **Modelo matemático e algoritmo meta-heurístico para o problema de roteamento de veículos com frota heterogênea fixa e restrições de carregamento bidimensional**. 103 p. Monografia (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/49484>>. Acesso em: 23 out. 2023.
- CAUCHICK-MIGUEL, P. A.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 244 p. ISBN 9788535291346.
- DA SILVA NETO, J. P. **Montagem de cargas e sequenciamento de caminhões em um centro de distribuição**. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, maio 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUBD-9BXGNP>>. Acesso em: 22 out. 2023.
- DE ARAÚJO, O. C. B.; ARMENTANO, V. A. A multi-start random constructive heuristic for the container loading problem. **Pesquisa Operacional**, SciELO, Brazil, v. 27, n. 2, p. 311–331, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0101-74382007000200007>>. Acesso em: 22 out. 2023.
- DE LIMA, M. A. R.; FERNANDES, D.; OLIVA, F. A. A utilização da pesquisa operacional para resolver problema de logística em transporte rodoviário de cargas. **Colloquium Exactarum**, v. 10, n. 4, p. 1–8, 2019. ISSN 2178-8332. Disponível em: <<https://doi.org/10.5747/ce.2018.v10.n4.e250>>. Acesso em: 24 ago. 2023.

- DOS SANTOS, A. S.; DE LIMA, P. N.; WUNSCH, G.; BRASIL, J. E. S. Simulação de carregamento de caminhões em uma indústria metalúrgica. In: SIMPÓSIO GAÚCHO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (SIGEPRO), 1., 2016, São Leopoldo/RS. **Anais [...]**. São Leopoldo, RS, 2016. p. 223–245. Disponível em: <<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18008.49925>>. Acesso em: 22 out. 2023.
- DUTTA, G.; FOURER, R. A survey of mathematical programming applications in integrated steel plants. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 3, n. 4, p. 387–400, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/msom.3.4.387.9972>>. Acesso em: 19 out. 2023.
- FERNANDES, L. F. d. L. **Resolução do Problema Integrado de Carregamento e Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea e Janela de Tempo por meio da Meta-heurística VNS-VND**. 46 p. Monografia (Graduação Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2594>>. Acesso em: 7 jun. 2023.
- GENDREAU, M.; IORI, M.; LAPORTE, G.; MARTELLO, S. A tabu search algorithm for a routing and container loading problem. **Transportation Science**, v. 40, n. 3, p. 342–350, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0145>>. Acesso em: 19 out. 2023.
- IORI, M.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J.-J.; VIGO, D. An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. **Transportation Science**, v. 41, n. 2, p. 253–264, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0165>>. Acesso em: 19 out. 2023.
- KORZENOWSKI, A. L.; HOERBE, F. K.; MARETH, T.; GOECKS, L. S. Use of heuristic methods for the optimisation of truck loading in a steel company. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 44, n. 1, p. 75–95, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.130919>>. Acesso em: 19 out. 2023.
- LIU, C.-Y. An improved adaptive genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem with time window. **Journal of Networks**, v. 8, n. 5, p. 1035–1042, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.4304/jnw.8.5.1035-1042>>. Acesso em: 8 jun. 2023.
- MARCIANO, Í. C. **Resolução do problema integrado de carregamento e roteamento de veículos com frota heterogênea por meio de métodos meta-heurísticos**. 41 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5814>>. Acesso em: 19 out. 2023.
- REIS, A. L. A importância da logística no transporte de combustíveis. **Colloquium Agrariae**, v. 13, n. Especial, p. 256–261, 2017. ISSN 1809-8215. Disponível em: <<https://doi.org/10.5747/ca.2017.v13.nesp.000202>>. Acesso em: 16 jul. 2023.
- SÁNCHEZ-ORO, J.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, A. D.; COLMENAR, J. M. A general variable neighborhood search for solving the multi-objective open vehicle routing problem. **Journal of Heuristics**, v. 26, n. 3, p. 423–452, 2020. ISSN 1572-9397. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10732-017-9363-8>>. Acesso em: 8 jun. 2023.
- TAILLARD, É. D.; LAPORTE, G.; GENDREAU, M. Vehicle routing with multiple use of vehicles. **Journal of the Operational Research Society**, Taylor & Francis, v. 47, n. 8, p. 1065–1070, 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1057/jors.1996.133>>. Acesso em: 8 jun. 2023.

---

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção:** Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá - Unifei, Itajubá, MG, 2011. 202 p.