ANTONIO CARLOS BONASSA

**O PROBLEMA DA FORMAÇÃO DE CARGA E DISTRIBUIÇÃO DE
VEÍCULOS ZERO-KILÔMETRO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Ciências

São Paulo
2018

ANTONIO CARLOS BONASSA

**O PROBLEMA DA FORMAÇÃO DE CARGA DE VEÍCULOS ZERO-
QUILÔMETRO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Livre-Docente Claudio
Barbieri da Cunha

São Paulo
2018

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo na Publicação

Bonassa, Antonio

O problema da formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro. / A. Bonassa. -- versão corr. -- São Paulo, 2018.
183 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Transporte 2. Heurística 3. Zero-quilômetro 3. Formação de carga I.
Universidade - de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Transportes II. t

AGRADECIMENTOS

Para mim, é importante iniciar os agradecimentos pelo meu orientador, o Prof. Dr. Claudio Barbieri da Cunha, competente, grande orientador, me ajudou muito, gente boníssima. Muito obrigado!

Aos professores Dr. Nicolau Dionísio Fares Gualda e Dr. Marco Antonio Brinati pelas certas propostas de melhoria apresentadas durante a banca de qualificação e por toda atenção que me deram durante esses últimos vários anos aqui na POLI, meu sincero muito obrigado.

É difícil encontrar palavras para expressar meu enorme agradecimento ao meu amigo Prof. Dr. Cassiano Augusto Isler, muito me ajudou durante todo o processo.

Ao meu cunhado Maurício Brun Bucker, que me incentivou a iniciar meu mestrado na POLI, passo essencial para este doutorado.

Ao meu amigo João Umbiruçu, que me ajudou, talvez sem querer e saber, a definir o tema desta tese, e a todos os amigos que entenderam meu sumiço, em especial ao Paulo Faria e ao Julio Zambon.

À minha esposa, Renata Verdelli Bonassa, por todo suporte e paciência. A meus filhos Matheus e a Sophia, que nasceram enquanto eu me dedicava às aulas, aos artigos e à escrita da tese e se tornaram minha incomensurável fonte de felicidade nos momentos mais difíceis do processo.

Ao meu pai (*in memoriam*) e à minha mãe, que aos 85 anos, muito preocupada, sempre me ligava para saber se tudo estava bem. Todas as vezes perguntava “isso aí não tem fim não!?”.

Muitíssimo obrigado a todos.

RESUMO

Nesta tese é tratado o caso particular, único e ainda não estudado, do problema de formação de carga e distribuição de veículos novos no Brasil, com o objetivo de obter as melhores combinações de veículos a serem carregados nos caminhões cegonha, para serem entregues às suas respectivas concessionárias, em um horizonte de planejamento preestabelecido, tal que essas formações resultem no menor valor de frete total pago pela transportadora, respeitando todas as restrições existentes. O problema, reconhecidamente um NP-Difícil, é prático e comum à várias empresas atuando no setor.

Para resolver o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil, foi desenvolvido um algoritmo em programação linear inteira mista, capaz de resolver pequenas instâncias do problema. A execução de múltiplos testes com instâncias de portes maiores, indicou que não é possível obter soluções ótimas para o problema abordado considerando a aplicação do modelo matemático, seja utilizando computadores pessoais ou infraestruturas de elevada capacidade computacional. Entretanto, os resultados ótimos encontrados para as instâncias de pequeno porte foram utilizados como parâmetro de avaliação da proposta de solução heurística apresentada.

A heurística de busca local multi-início desenvolvida e apresentada nesta tese foi capaz de encontrar a solução ótima para todas as quatro instâncias reais e de pequeno porte, reduzindo o número de veículos entregues atrasados tanto na comparação com os resultados obtidos pelo modelo matemático, quanto pela comparação com a alocação manual feita pelo funcionário da empresa de transportes que cedeu os dados para esta pesquisa.

Por fim, a heurística desenvolvida foi utilizada para solucionar um problema de tamanho condizente com aquele encontrado no dia-a-dia da operação real de uma transportadora de veículos, obtendo soluções de valor de frete menores que aqueles obtidos pela alocação manual e reduzindo drasticamente o número de veículos entregues atrasados, com tempo de execução aceitável para sua aplicação prática.

ABSTRACT

This thesis proposes a new solution to the problem of load formation and distribution of new vehicles in Brazil. The problem consists in selecting among all vehicles parked at a transportation company staging area the best combination of units to be loaded on available auto-carrier trucks and delivered to its respective dealers, over a multiple-day planning horizon. The group of vehicles selected to each auto-carrier has to be physically possible to load. Thus, several group formation constraints have to be respected. Transportation company does not own the fleet. It pays a per trip freight to auto-carrier owners, responsible for transporting vehicles to dealers. There exists a minimum freight cost to be paid to auto-carrier owners, which is calculated to each trip, according to its load formation. Sometimes, the minimum freight is greater than the sum of each loaded vehicle freight individually taken. The object is to minimize the transportation company total freight cost. Described problem belongs to the NP-hard class.

An algorithm capable of solving small instances of the problem was developed using mixed integer linear programming (MILP). The execution of multiple tests, with instances of larger sizes, indicated that it is not possible to obtain optimal solutions considering the mathematical model, either using personal computers or high capacity clusters. However, the optimal results obtained for four small and real instances were used as evaluation parameter for the proposed heuristic solution.

The multi-start local search heuristic developed was able to find the optimal solution for all four small instances solved using the MILP. Besides that, it was able to reduce the total number of late deliveries in comparison with the results obtained by the mathematical model and by the manual allocation done at the transportation company.

Finally, the multi-start heuristic was used to solve larger size problems, compatible with those encountered in real life, obtaining smaller freight value than those obtained by the manual allocation made at the transportation company, also drastically reducing the number of late deliveries with acceptable processing time for practical applications.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação e relevância	3
1.2	Objetivos.....	5
1.3	Organização da tese.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	Agbegha (1992) – Uma abordagem otimizante para o problema de transporte de veículos; Agbegha et al. (1998) – Otimização das cargas de veículos.	8
2.2	Tadei et al. (2002) – Heurística para o problema de transporte de veículos	12
2.3	Novo (2005) – Metodologia para a resolução do problema da distribuição de veículos.	16
2.4	Cuadrado e Griffin (2007) - Modelos matemáticos para a otimização da distribuição de veículos novos na Venezuela	18
2.5	Lin (2010) – Abordagem de solução exata para o problema de carregamento de veículos	21
2.6	Dell’Amico et al. (2011) – Um algoritmo de meta-heurística para o transporte de veículos	23
2.7	Dell’Amico et al. (2014) – Otimização de um problema real de transporte de veículos novos.....	26
2.8	Cordeau et al. (2015) – Um algoritmo multiperíodo para o problema de transporte de veículos	29
2.9	Análise comparativa dos trabalhos	32
2.10	Considerações finais do capítulo	35
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	37
3.1	Centro de Consolidação de Carga.....	40
3.2	Linhas de distribuição	42
3.3	Prazo para obrigatoriedade de alocação	51
3.4	Morfologia	55
3.5	Cálculo do valor do frete.....	57
3.6	Processo de formação de carga	61
3.7	Considerações finais do capítulo.....	62

4	MODELO MATEMÁTICO	65
4.1	Formulação matemática	68
4.1.1	Conjuntos de veículos com alocação obrigatória	73
4.1.2	Cálculo da frota disponível	73
4.1.3	Ajuste da quantidade de veículos com alocação obrigatória	74
4.1.4	Alocação dos veículos	78
4.2	Pós-processamento	85
4.3	Verificação do modelo	87
4.4	Formulações matemáticas testadas durante o desenvolvimento do modelo matemático de PLIM	102
4.5	Considerações finais do capítulo	105
5	APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO A INSTÂNCIAS REAIS DE PEQUENO PORTE	107
5.1	Instâncias reais de teste	109
5.2	Determinação do horizonte de planejamento	112
5.3	Resultados da aplicação do modelo matemático a instâncias de pequeno porte	113
5.3.1	Análise dos valores do frete	114
5.3.2	Análise dos atrasos de entrega	118
5.3.3	Análise dos tempos de processamento	120
5.4	Considerações finais do capítulo	124
6	HEURÍSTICA DE BUSCA LOCAL MULTI-INÍCIO	126
6.1	Motivação	127
6.2	Heurística de busca local multi-início	128
6.3	Criação das soluções iniciais	134
6.4	Heurística de busca local por valor de frete (busca local 1 – BL1)	141
6.5	Heurística de busca local por redução de atraso (busca local 2 – BL2)	146
6.6	Escolha da solução final	150
6.7	Considerações finais do capítulo	150
7	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	152
7.1	Parâmetros	152
7.2	Resultados dos experimentos com instâncias de pequeno porte	156
7.2.1	Reduções de valor de frete	156

7.2.2	Tempos de processamento	161
7.3	Aplicação em instâncias de grande porte	163
7.3.1	Resultados.....	167
7.4	Considerações finais do capítulo.....	171
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	173
8.1	Limitações da pesquisa	175
8.2	Sugestões para estudos futuros	176
9	BIBLIOGRAFIA.....	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	Caminhão cegonha.....	2
Figura 2.1-	Diagrama representativo de um caminhão cegonha com 12 localizações de carregamento	10
Figura 2.2-	Esquema de um caminhão do tipo cegonha com 10 veículos	13
Figura 2.3 –	Caminhão cegonha com 4 plataformas independentes de carregamento.....	25
Figura 2.4–	Caminhão cegonha com 4 plataformas independentes, carregado com 11 veículos	30
Figura 3.1–	Modelo representativo de caminhão cegonha utilizado no Brasil ..	40
Figura 3.2-	Vista aérea de um centro de consolidação de veículos zero-quilômetro	42
Figura 3.3–	Mapa da região oeste do Estado de Santa Catarina.	44
Figura 3.4 –	Exemplo de carga para cidades com restrição de tráfego de veículos grandes	46
Figura 3.5 –	Mapa das cidades atendidas por uma das linhas de distribuição ..	47
Figura 3.6 –	Mapa das cidades atendidas pelo agrupamento denominado “Santos”	49
Figura 3.7 –	Histograma dos volumes médios diários recebidos por linhas de distribuição.....	50
Figura 3.8 –	Histograma dos volumes médios diários embarcados por linhas de distribuição.....	50
Figura 3.9–	Distribuição dos veículos por prazo de embarque.	54
Figura 3.10–	Opção de formação de carga com 10 veículos.....	56
Figura 3.11–	Mapa da região noroeste do Estado de São Paulo.....	59
Figura 4.1–	Pseudocódigo do algoritmo remanescentes por morfologia	77
Figura 4.2 –	Conjunto de variáveis de decisão para o exemplo com $V1 = 12$, $V2 = 7$ e $V3 = 8$ e $T = 3$	83
Figura 4.3:	Pseudocódigo do algoritmo de destruição de cargas com frete tipo “9 Base”	86
Figura 5.1 –	Redução percentual no valor do frete e nas entregas atrasadas.	119
Figura 5.2–	Tempo de processamento em razão do número de veículos disponíveis para alocação.....	124

Figura 6.1–	Fluxograma representativo da lógica dos procedimentos da heurística	130
Figura 6.2–	Pseudocódigo da rotina principal da heurística de busca local multi-início.....	131
Figura 6.4–	Pseudocódigo reduzido do algoritmo de construção de soluções iniciais	135
Figura 6.3–	Fluxograma representativo da lógica de construção das soluções iniciais	136
Figura 6.5–	Pseudocódigo da sub-rotina de ordenação de veículos e cálculo do número de caminhões.....	137
Figura 6.6–	Pseudocódigo da sub-rotina da escolha aleatória do primeiro veículo de cada caminhão.....	137
Figura 6.7–	Pseudocódigo da sub-rotina inclusão de veículo à solução em construção	138
Figura 6.8–	Pseudocódigo da sub-rotina cálculo frete e índice de atraso.....	140
Figura 6.9–	Fluxograma representativo do procedimento de busca local 1 aplicada às soluções escolhidas.....	142
Figura 6.10–	Pseudocódigo do procedimento de busca local 1Fonte: próprio autor	143
Figura 6.11–	Pseudocódigo do procedimento de Verificação de Trocas	144
Figura 6.12–	Fluxograma representativo da lógica da busca local 2 aplicada a cada solução	147
Figura 6.13–	Pseudocódigo do procedimento de busca local 2.....	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1–	Características dos trabalhos com maior influência dentre os apresentados na revisão bibliográfica.....	33
Tabela 3.1–	Linhas de distribuição	45
Tabela 3.2–	Veículos recebidos por período e por linha de distribuição.....	47
Tabela 3.3–	Cálculo da data limite para embarque.....	53
Tabela 3.4–	Tipos de morfologias e fator de equivalência.....	56
Tabela 3.5–	Frequência dos agrupamentos de morfologia nas cargas formadas pelo funcionário da transportadora	57
Tabela 3.6–	Exemplo de cálculo do frete carreteiro.....	60
Tabela 3.7–	Exemplo de cálculo do frete “9 Base”	60
Tabela 4.1 –	Agrupamentos de morfologias e respectivos valores.....	69
Tabela 4.2–	Comparativo de agrupamento utilizando classes de morfologia real e equivalente.....	70
Tabela 4.3–	Testes de funcionalidade 1 - 10.	88
Tabela 4.4–	Testes de funcionalidade 11 - 18.	89
Tabela 4.5–	Testes de funcionalidade 19 - 26.	90
Tabela 4.6–	Testes de funcionalidade 27 - 30.	91
Tabela 4.7 –	Cálculo do valor do frete para instância de teste número 5	92
Tabela 4.8–	Alocações feitas pelo modelo exato para instância de teste de número 8.....	92
Tabela 4.9 –	Cálculo do valor do frete para instância de teste número 8 – não atendendo restrição (16).....	93
Tabela 4.10 –	Cálculo do valor do frete para instância de teste número 8 – proposta do modelo exato	93
Tabela 4.11 –	Cálculo do valor do frete para instância de teste número 8 – proposta do modelo exato	96
Tabela 5.1–	Caracterização da base de dados utilizada no agrupamento da linha “Santos”	110
Tabela 5.2 –	Caracterização da composição de veículos nas instâncias reais de teste	111
Tabela 5.3 –	Volumes máximos e mínimos recebidos por linha de distribuição no período de avaliação.....	112

Tabela 5.4–	Resumo dos resultados da aplicação da PLIM.....	114
Tabela 5.5–	Coeficiente de variação das distâncias e percentual de redução do valor do frete	115
Tabela 5.6–	Morfologias das instâncias e percentual de redução do valor do frete	116
Tabela 5.7–	Composição e custo do frete da carga 15.349 da alocação manual	116
Tabela 5.8–	Composição e custo do frete da carga 18 da PLIM	118
Tabela 5.9–	Veículos entregues atrasados: alocação manual e PLIM	119
Tabela 5.10–	Características das instâncias e tempo de processamento do modelo exato	121
Tabela 5.11–	Percentual dos veículos recebidos antes do período de avaliação	123
Tabela 6.1 –	Comparação dos resultados das opções de índice de atraso consideradas.....	132
Tabela 7.1–	Combinação de parâmetros utilizados	155
Tabela 7.2–	Frequência percentual de soluções finais da heurística BLMI iguais às soluções do modelo exato.....	158
Tabela 7.3–	Número de soluções sem entregas atrasadas e redução de frete igual à obtida pelo modelo exato	159
Tabela 7.4–	Veículos entregues atrasados: PLIM	160
Tabela 7.5–	Resultado da aplicação da BL1 às soluções iniciais e redução no valor do frete total	161
Tabela 7.6–	Tempo de processamento (s) por conjunto de parâmetros.....	162
Tabela 7.7–	Cidades atendidas pela linha de distribuição “Sul”	164
Tabela 7.8–	Veículos disponíveis para alocação – instância Sul1	166
Tabela 7.9–	Veículos disponíveis para alocação – instância Sul2.....	166
Tabela 7.10–	Morfologia equivalente dos veículos disponíveis para alocação ..	167
Tabela 7.11–	Frequência do maior valor de morfologia da carga	168
Tabela 7.12–	Distribuição das cargas por tipo de frete.....	169
Tabela 7.13–	Valor médio de frete por carga e tipo de frete.....	170
Tabela 7.14–	Veículos entregues atrasados pela alocação manual	170

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Em maio de 2011 o STF – Supremo Tribunal Federal decidiu favoravelmente em relação à transferência da responsabilidade pelo pagamento do frete de distribuição dos veículos de passeio e utilitários zero-quilômetro às montadoras.

Até então, as concessionárias eram as responsáveis pelo pagamento do valor do frete às transportadoras de veículos zero-quilômetro, calculado para cada veículo recebido. O frete era então repassado aos clientes finais, os quais tinham pouco ou nenhum poder de barganha sobre o valor do frete cobrado.

Como efeito da nova jurisdição, as montadoras passaram a contratar empresas especializadas no transporte de veículos, chamadas genericamente de transportadoras, para levarem as unidades desde suas fábricas até suas respectivas concessionárias, pagando um valor de frete fixo por quilômetro, o qual é ajustado em relação ao tamanho do veículo transportado. Nesse novo cenário, com grande poder de barganha, as montadoras passaram a pressionar as transportadoras por menores valores de frete.

Acontece que as transportadoras contratadas pelas montadoras, por sua vez, também terceirizam o serviço de transporte aos proprietários de caminhões cegonha, tipo de caminhão específico para o transporte de veículos, cuja foto ilustrativa é apresentada na Figura 1.1.

Figura 1.1- Caminhão cegonha

Fonte: <http://www.yeshuatransportes.com.br/>. Acessada em 06/04/2015

Os donos dos caminhões cegonha se organizam em sindicatos, os quais impõem regras (restrições) de formação de cargas para manter a mínima rentabilidade de seus integrantes que, isoladamente, não conseguiriam boas negociações de valores de frete com as transportadoras.

Outras restrições de carregamento existem, tais restrições garantem que o conjunto de veículos selecionados para fazerem parte de uma carga possa ser fisicamente alocado ao caminhão cegonha.

Dada esta situação, as transportadoras buscam melhorias de processo e ferramentas de suporte à decisão que as ajudem a reduzir os gastos com frete.

Permanecem com a transportadora outras tarefas como, por exemplo, o armazenamento dos veículos e a montagem das cargas. Essas tarefas acontecem nos pátios das empresas de transporte, os quais são chamados de centros de consolidação de carga.

Neste cenário está incluso o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil. Esta tese tem como objetivo propor uma solução que minimize o valor total do frete pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha e ao mesmo tempo atenda todas as restrições existentes.

1.1 Motivação e relevância

O desafio da resolução de um problema cujas características não foram consideradas por nenhum dos trabalhos encontrados na literatura, sendo um problema de alta complexidade, com grande impacto financeiro e cuja abrangência se estende por várias empresas e pessoas envolvidas no processo, motivaram o desenvolvimento desta tese.

Nesta tese é tratado o caso particular, único e ainda não estudado na literatura, do problema de formação de carga e distribuição de veículos novos no Brasil, com o objetivo de obter as melhores combinações de veículos a serem carregados nos caminhões cegonha, para serem entregues às suas respectivas concessionárias, em um horizonte de planejamento pré-estabelecido, tal que essas formações resultem no menor valor de frete total pago pela transportadora, respeitando todas as restrições existentes.

A descrição apresentada acima é análoga à caracterização dos problemas de otimização combinatória apresentada por Luke (2013). O autor caracteriza os problemas de otimização combinatória como sendo aqueles para os quais a solução consiste em uma combinação ideal de componentes únicos, selecionados de um conjunto tipicamente finito e muitas vezes pequeno. Nesse tipo de problema, o tempo de processamento requerido para se encontrar a solução ótima, utilizando métodos exatos, cresce exponencialmente em relação a seu tamanho.

Vários autores como, por exemplo, Tadei et al. (2002), Dell'Amico et al. (2015) e Cordeau et al. (2015), reconhecem o problema da formação de cargas de veículos zero-quilômetro como sendo NP-Difícil.

Tadei et al. (2002) mostram que simplificando tal problema de forma que todas as unidades transportadas sejam para um único destino e existam caminhões cegonha homogêneos em sua capacidade disponíveis para carregamento, o problema pode ser reduzido a um problema do tipo das múltiplas mochilas binárias, que é um problema NP-Difícil.

Independentemente do nível de dificuldade para se resolver o problema abordado nesta tese, ele é prático e comum a muitas empresas operando em nosso país. Observando a realidade, ele está presente no dia-a-dia de várias transportadoras, centros de consolidação, donos de caminhão cegonha e montadoras envolvidas no processo.

Ainda que não se possa precisar o valor financeiro de todas as relações comerciais contidas em tal abrangência, este problema é sem dúvida de grande valor econômico.

Os resultados encontrados pela proposta de solução apresentada nesta tese podem influenciar o relacionamento da empresa de transporte com os sindicatos dos donos de caminhão cegonha, podendo também impactar as operações de um dos setores industriais mais importantes de nosso país, representado pelas montadoras de veículos.

Atualmente, os funcionários da empresa de transporte montam as cargas utilizando os conhecimentos adquiridos com a prática, de forma subjetiva, sem o auxílio de nenhuma ferramenta para a seleção dos veículos a serem alocados em cada caminhão cegonha que busque maximizar algum fator de desempenho, como, por exemplo, o valor do frete pago ou o número de veículos entregues atrasados.

Entretanto, as escolhas subjetivas do funcionário responsável pelo processo de formação de cargas determinam a lucratividade da empresa, a satisfação dos clientes (montadoras e concessionárias) quanto às entregas realizadas no prazo e o cumprimento das regras de formação de cargas negociadas com os sindicatos dos donos de caminhão cegonha.

É provável que o funcionário responsável pela formação das cargas receba pressões antagônicas, tanto da empresa de transportes quanto do sindicato dos donos de caminhão cegonha, responsabilizando-o pela obtenção de “bons” valores de frete. Desta forma, o processo está exposto às incertezas e riscos daqueles feitos de forma manual e subjetiva.

Apesar de existirem trabalhos disponíveis na literatura sobre o processo de formação de carga e roteirização de entregas de veículos zero-quilômetro, não foi possível encontrar nenhuma referência ao problema que trata da redução do valor do frete. Tampouco foram encontrados trabalhos que apresentem situações com a existência de um valor de frete mínimo para as cargas formadas para o transporte de veículos zero-quilômetro, como acontece no caso brasileiro.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta tese é desenvolver um método de solução para o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil. Tal método deve ser capaz de resolver problemas de tamanho e características compatíveis com aqueles encontrados num dia típico da operação de uma transportadora de veículos.

Para atingir o objetivo principal desta tese é preciso:

- propor um modelo matemático que seja capaz de resolver o problema de otimização combinatória de natureza dinâmica tratado nesta tese, para períodos subsequentes de alocação de veículos, respeitando todas as restrições existentes e a metodologia de cálculo do frete no mercado brasileiro;
- efetuar experimentos computacionais avaliando a adequação do método exato para a resolução de problemas com tamanho e características análogas às aquelas encontradas nas operações reais de transporte;
- aplicar o modelo exato desenvolvido para a resolução de problemas reais, ao menos de pequeno porte, cujos resultados serão utilizados para avaliar o desempenho da heurística proposta para a solução de problemas maiores;
- desenvolver uma proposta de solução heurística de busca local multi-início, capaz de apresentar uma solução, ainda que não ótima, para instâncias reais do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro

com tamanho e características compatíveis com aquelas encontradas na operação real de transporte;

- avaliar o desempenho da heurística desenvolvida, através da comparação de seus resultados com aqueles obtidos pelo modelo exato, para a resolução dos problemas reais de pequeno porte;
- aplicar a heurística desenvolvida em instâncias reais e de grande porte para avaliar seu desempenho e tempo de processamento.

1.3 Organização da tese

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos trabalhos encontrados na literatura sobre formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro. Ainda nesse capítulo, são apresentadas considerações sobre a aplicabilidade das propostas de solução encontradas na literatura para a resolução do problema brasileiro.

As características do processo de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro, tal como executado hoje na empresa de transporte que cedeu as informações para a execução desta pesquisa, são detalhadas no capítulo 3.

O capítulo 4 descreve a formulação do modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM) desenvolvida para a resolução de pequenas instâncias do problema e, no capítulo seguinte, os resultados de sua aplicação são apresentados. Tais resultados, apresentados no capítulo 5, serão úteis para a avaliação da qualidade das soluções obtidas pelo método heurístico proposto.

Já no capítulo 6 é apresentado o modelo heurístico de busca local multi-início, uma nova proposta de solução para o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil.

Os resultados das aplicações da heurística à quatro instâncias de pequeno porte e a duas instâncias de grande porte, de tamanhos condizentes com aqueles encontrados no dia-a-dia da operação real de uma transportadora de veículos, são apresentadas no capítulo 7.

Já no capítulo 8 são apresentadas as conclusões e recomendações da pesquisa, assim como suas limitações. Finalmente, no capítulo 9 tem-se a bibliografia utilizada.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos trabalhos que tratam do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro disponíveis na literatura.

Uma vez que foram poucos os trabalhos encontrados na literatura que versassem sobre o problema tratado nesta tese, a revisão bibliográfica apresenta cada um deles individualmente, em ordem cronológica.

2.1 Agbegha (1992) – Uma abordagem otimizante parar o problema de transporte de veículos; Agbegha et al. (1998) – Otimização das cargas de veículos.

O conteúdo do artigo de Agbegha et al. (1998) é uma síntese de sua tese de doutorado (AGBEGHA, 1992); razão pela qual a revisão bibliográfica das obras sempre se referenciará ao texto completo.

No problema abordado por Agbegha (1992), veículos são recebidos num centro de consolidação de cargas, de onde são transportados até suas respectivas concessionárias de destino. O transporte é feito por caminhões cegonha, cuja frota disponível é heterogênea. Existem quatro tipos de caminhão cegonha de diferentes capacidades: 7, 8, 9 e 12 veículos. Ainda, existem 5 modelos de veículos para serem transportados, agrupados em 4 classes de tamanho.

Para cada localização de carregamento de cada tipo de caminhão cegonha, são conhecidas as classes de veículos que nelas podem ser alocadas. Ainda, são determinadas quais classes de veículos podem ser alocadas em cada posição de carga do caminhão cegonha para cada classe de veículo que já estiver alocada à posição vizinha.

A proposta de solução apresentada por Agbegha (1992) utiliza de um algoritmo heurístico para a formação das rotas e seleção dos veículos a serem carregados em cada caminhão cegonha, e um método exato para definir qual posição de carga do caminhão deve receber qual veículo a ele atribuído.

A heurística de formação das rotas e seleção dos veículos inicia com a escolha da concessionária mais distante do centro de consolidação de cargas, para a qual um caminhão escolhido aleatoriamente é designado. Seguindo uma lista ordenada de forma crescente em relação a data de chegada do veículo ao centro de consolidação, o algoritmo aloca as unidades ao caminhão designado até que sua capacidade de carga seja atingida.

Caso o número de veículos com destino a uma mesma concessionária seja suficiente para utilizar a capacidade total do caminhão cegonha, tem-se a definição de sua rota e carga.

Quando todos os veículos de um determinado destino tiverem sido alocados a um caminhão cegonha, sem que sua capacidade de carga tenha sido totalmente utilizada, um novo destino é escolhido para fazer parte da rota e o processo de alocação se repete.

Esse processo determina as concessionárias a serem visitadas por cada caminhão cegonha e os veículos a serem neles alocados.

Para a resolução do problema de alocação, Agbegha (1992) representa as localizações de carga dos caminhões cegonha como redes acíclicas e unidirecionais. Nessa rede, as localizações de carga são representadas pelos nós e um arco conectando um par de nós ij mostra que o veículo alocado em i deverá ser

descarregado para que aquele alocado em j também possa ser. A Figura 2.1 apresenta a rede criada pelo autor para um caminhão cegonha com 12 localizações de carregamento.

Figura 2.1- Diagrama representativo de um caminhão cegonha com 12 localizações de carregamento
Fonte: Agbegha (1992)

O resultado do processo de alocação deve ser aquele que apresente o menor valor para a contagem das movimentações de veículos através dos arcos da rede considerada. Esse resultado representa a minimização do número de remontes que precisam ser feitos para a entrega de todos os veículos alocados ao caminhão cegonha às suas respectivas concessionárias.

O número de remontes é calculado por um algoritmo “*Branch-and-Bound*”. A cada alocação de um veículo a uma posição de carregamento, representado por um nó da árvore de enumeração, as possíveis alocações aos nós do próximo nível são avaliadas e aquelas que resultarem em menor número de remontes são efetivadas. O processo se repete até que todos os nós da árvore de enumeração estejam ocupados ou não existam mais possibilidades de alocação.

Nesse problema, existem restrições que determinam quais classes de veículos podem ser alocados em cada posição de carregamento da cegonha, e outras que determinam as interferências geradas por dois veículos sequencialmente carregados.

O algoritmo inicia o processo de alocação selecionando o primeiro veículo de uma lista ordenada de forma decrescente em relação ao número de restrições e avalia a factibilidade de sua alocação à primeira posição de carga do caminhão cegonha – aquela mais próxima da cabine do motorista.

Caso a alocação seja factível, ela é efetivada e o processo tenta selecionar o próximo veículo da lista ordenada para alocação à próxima localização de carga da cegonha. Caso a alocação não seja factível, o próximo veículo da lista ordenada é selecionado para possível alocação. O processo se repete até que todas as localizações do caminhão cegonha sejam ocupadas ou não existirem mais veículos a serem alocados.

Quando não existir solução factível para a alocação de um determinado veículo, o algoritmo busca trocar a unidade incompatível por uma pertencente ao grupo de veículos ainda não alocados, que seja compatível com a localização a ser preenchida.

Para avaliar o desempenho de sua proposta de solução, Agbegha (1992) criou quinze problemas para cada um dos quatro tipos de caminhões cegonha, sendo de conhecimento do autor seus respectivos valores de solução ótima. Cada problema representa a alocação de veículos a um único caminhão cegonha.

Os resultados obtidos mostram que o método de solução proposto por Agbegha (1992) não foi capaz de encontrar a solução esperada para cinco dos sessenta problemas formulados, sendo quatro deles para caminhões cegonha com capacidade igual a 12 veículos e 1 para caminhão com capacidade igual a 8 veículos. Para todos os outros problemas o algoritmo encontrou a solução ótima conhecida.

O problema proposto por Agbegha (1992) tem características diferentes daquelas existentes no mercado brasileiro, principalmente no que diz respeito a seu fator de avaliação. Enquanto Agbegha (1992) busca minimizar o número de remotes, o objetivo da solução do problema brasileiro é a minimização do valor frete total.

Ainda, a proposta de solução de Agbegha (1992) contém um pressuposto operacional difícil de ser garantido: os veículos serão recarregados pelos motoristas dos caminhões cegonha, durante as operações de remonte, sempre, exatamente, na mesma configuração que deixaram o centro de consolidação. Por exemplo, caso haja restrição de espaço de estacionamento e manobra, o que é comum nas concessionárias, maiores são as chances dos veículos originalmente alocados nas posições da cegonha localizadas mais próximas do motorista serem estacionados

mais distantes do caminhão, favorecendo a inversão de carregamento em relação à situação original, invalidando a alocação originalmente feita e a lógica na qual se baseou a solução.

Adicionalmente, o modelo desenvolvido por Agbegha (1992) não considera o aspecto temporal relacionado às diferentes datas de chegada dos veículos ao centro de consolidação, não tratando a possibilidade de se adiar o carregamento de unidades com prazo de entrega maior que o tempo de viagem até seu destino final.

2.2 Tadei et al. (2002) – Heurística para o problema de transporte de veículos

Tadei et al. (2002) definem o problema da distribuição de veículos zero-quilômetro como sendo aquele de otimamente selecionar conjuntos de veículos para serem carregados em caminhões cegonha com objetivo de maximizar o lucro da transportadora; calculado como sendo o valor da receita obtida com o transporte das unidades, menos os custos associados ao número de paradas para descarga e às penalidades pelas entregas feitas após a data programada.

Os autores resolvem o problema utilizando um modelo de programação linear inteira (relaxada), determinando um coeficiente diferente para cada um dos três componentes da função objetivo. Os coeficientes representam a importância do componente para o resultado da operação.

Tadei et al. (2002) afirmam que o problema da distribuição de veículos zero-quilômetro é de fato NP-Difícil, uma vez que sua simplificação, de forma que todas as unidades transportadas sejam de uma única montadora e todas para um único destino, o reduz a um problema do tipo das múltiplas mochilas binárias, que é NP-Difícil.

Para resolver tal problema, os autores assumem o caminhão cegonha como sendo de plataforma única, cujo comprimento equivale ao comprimento agregado das plataformas dos caminhões cegonha utilizados na operação de transporte. Um

exemplo de caminhão cegonha é apresentado na Figura 2.2. Segundo os autores, existem caminhões cegonha de diferentes capacidades, mas suas características não foram apresentadas.

A arrumação dos veículos nas posições de carga do caminhão cegonha faz com que alguns deles sejam alocados parcialmente sobre outros, como mostra o exemplo destacado pela letra “A” na Figura 2.2. Para adequar o método de solução a tal característica da arrumação das cargas, o valor do comprimento real dos veículos é multiplicado por uma constante de ajuste menor que um. No problema tratado em Tadei et al. (2002) os veículos foram agrupados em vinte e duas classes de comprimento.

Figura 2.2- Esquema de um caminhão do tipo cegonha com 10 veículos
Fonte: Tadei et al. (2002)

Para a definição do número de veículos disponíveis para embarque em cada dia de operação o autor considera que a proporção de veículos diariamente alocados de cada montadora deve ser igual à proporção da quantidade de veículos diariamente recebidos de cada uma delas.

O método de solução proposto por Tadei et al. (2002) é composto por três etapas:

Etapas 1. Decompor o Problema

- Atribuir caminhões cegonha para cada agrupamento de concessionárias, subdividindo o grande problema global em problemas regionais de menor porte.

Etapas 2. Determinar Solução Viável Inicial

- Achar uma solução viável para cada subproblema.

Etapas 3. Aperfeiçoar solução inicial

- A solução viável inicial é melhorada por estratégia de busca local, considerando os veículos ainda não carregados.

Na primeira etapa da solução proposta por Tadei et al. (2002) o problema é resolvido de forma agregada utilizando um algoritmo de programação linear inteira. Nessa etapa, a integralidade das variáveis de decisão referentes à existência do caminhão cegonha foi relaxada para que o algoritmo pudesse encontrar uma solução em tempo computacional aceitável. A solução encontrada determina quantos caminhões cegonha de cada tipo devem ser atribuídos a cada agrupamento de concessionárias e os veículos a serem carregados em cada um deles.

Na segunda etapa da resolução apresentada por Tadei et al. (2002), os autores resolvem o problema de alocação dos veículos aos caminhões cegonha como sendo um problema do tipo das mochilas binárias, também utilizando um algoritmo de programação linear inteira.

Para que o problema pudesse ser resolvido como tal, Tadei et al. (2002) relaxaram a integralidade das variáveis de decisão que determinam a alocação de um veículo a um caminhão cegonha. Com tal relaxamento, foram obtidas respostas contendo, no máximo, uma variável não inteira, a qual foi ajustada para valor igual a zero, a fim de se obter soluções factíveis e, nesse caso, não ótimas.

Para melhorar a qualidade das soluções obtidas no passo anterior, as alocações definidas ao final da segunda etapa são submetidas a um procedimento de trocas entre veículos selecionados para carregamento e veículos ainda não carregados. Para tanto, uma heurística de busca de vizinhança foi desenvolvida.

A proposta de Tadei et al. (2002) foi aplicada à 3 instâncias reais obtendo um valor de lucro médio por veículo alocado de 2,6% a 6,4% melhores que aqueles obtidos pela alocação manual feita pelos funcionários da empresa. Os tempos de processamento necessários para a proposta de solução obter os resultados apresentados variou de 734 a 1.645 segundos (12 a 27 minutos).

Segundo os autores, tais resultados mostram que a solução proposta é de boa qualidade e que existe um real benefício pela utilização do algoritmo para a alocação dos veículos.

No problema apresentado por Tadei et al. (2002) a capacidade de carga do caminhão é dada pelo comprimento da única plataforma considerada, o qual equivale ao comprimento agregado das plataformas dos caminhões cegonha utilizados na operação. Porém, mesmo com a utilização de tal restrição, cargas não factíveis podem ser criadas.

Tome-se como exemplo um caminhão cegonha com duas plataformas de 21 metros de comprimento cada uma, tal que o comprimento equivalente da única plataforma considerada seja igual a 42 metros. Em uma plataforma com 42 metros de comprimento poderiam ser alocados 3 veículos com 4 metros de comprimento cada um e 6 veículos com 5 metros de comprimento, o que consumiria sua capacidade total. Entretanto, não é possível dividir tais veículos em dois subgrupos cuja soma dos comprimentos de seus elementos seja menor que 21 metros. Desta forma, não seria possível carregar esses veículos nas duas plataformas de 21 metros, não sendo factível tal alocação.

Ainda, a existência de restrições de agrupamento de veículos no problema apresentado nesta tese o torna de maior dificuldade de resolução que o apresentado por Tadei et al. (2002).

Logo, é necessário o desenvolvimento de medidas de capacidade do caminhão cegonha e restrições à formação de carga que melhor representem as características reais da operação de transporte no Brasil.

2.3 Novo (2005) – Metodologia para a resolução do problema da distribuição de veículos.

No problema apresentado por Novo (2005), busca-se otimamente selecionar conjuntos de veículos para serem carregados em caminhões cegonha de forma que as penalidades financeiras, impostas à transportadora em decorrência das entregas feitas depois do prazo estabelecido, sejam minimizadas.

Novo (2005) considera que os atrasos nas entregas dos veículos são consequências do excessivo número de dias que tais unidades ficam no centro de consolidação de carga aguardando até serem alocados.

Assim, a função objetivo do modelo de programação linear inteira proposto pelo referido autor busca maximizar a alocação dos veículos com maior número de dias de aguardo. Para a implementação do modelo, foi criado um atributo do veículo, o qual recebe seu respectivo número de dias em espera para alocação.

Enquanto Tadei et al. (2002) consideram como o limite de capacidade de carga do caminhão o valor do comprimento da única plataforma de carregamento considerada, em Novo (2005) a restrição de capacidade está associada a um valor máximo de morfologias que se pode alocar em um caminhão da frota homogênea, disponível para carregamento.

A morfologia de um veículo é um número predefinido que varia entre 1 e 2 e representa seu tamanho equivalente em relação a um veículo padrão preestabelecido, cuja morfologia é igual a 1,0. Por exemplo, um veículo com morfologia 1,35 indica que esse utiliza 35% mais comprimento da plataforma de carga do que o veículo padrão, de morfologia 1,0, quando carregados na cegonha.

Existem treze diferentes grupos de morfologia e todo veículo, independente do modelo ou tamanho, têm uma delas como atributo. A quantidade máxima de morfologias que podem ser alocadas a um caminhão cegonha é igual a 11, independentemente do tipo, tamanho, peso ou montadora dos veículos selecionados para carregamento.

Dessa forma, o problema é resolvido primeiramente definindo-se o número de caminhões a serem atribuídos a cada região de atendimento e, na sequência, quais veículos devem ser carregados em cada um deles, definindo assim suas rotas e cargas. Tal procedimento é o mesmo que aquele utilizado por Tadei et al. (2002).

O autor utilizou o modelo matemático desenvolvido para a resolução de um problema real, composto por 200 veículos disponíveis para embarque, com destinos em 5 regiões atendidas pelo centro de consolidação de carga considerado no trabalho.

Segundo o autor, a execução do modelo matemático proposto para a alocação dos veículos aos caminhões cegonha disponíveis apresenta tempo computacional demasiadamente alto, inviabilizando sua utilização.

Desta forma, para que o processo de alocação fosse possível, Novo (2005) se utilizou de um processo construtivo no qual as cargas são formadas sequencialmente, uma a uma. Tal proposta de solução é diferente daquela apresentada por Tadei et al. (2002), no qual as cargas de todos os caminhões cegonha de cada região são formadas ao mesmo tempo.

Novo (2005) aplicou sua proposta de solução a um problema real, composto por 200 veículos, para o qual se conhecia o resultado da alocação manual feita pelo funcionário da empresa de transportes.

Considerando não apenas os custos associados às entregas atrasadas, mas também os valores do frete do envio dos veículos às suas respectivas concessionárias de destino e os custos das paradas para entrega, o autor conclui que a utilização de sua proposta de solução gerou custos totais maiores que a alocação manual feita pelo funcionário da transportadora.

Entretanto, Novo (2005) conclui que a utilização do modelo matemático faz com que maior número de veículos sejam entregues no prazo estabelecido, sendo melhor que a alocação manual utilizada – para este fator de avaliação.

A principal diferença entre o trabalho de Novo (2005) e esta tese está na definição do problema e conseqüentemente na função objetivo considerada. Enquanto Novo (2005) busca minimizar o custo associado às entregas em atraso, antecipando ao máximo o envio dos veículos disponíveis para embarque, o objetivo desta tese é minimizar o valor do frete pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha.

A função objetivo apresentada por Novo (2005) retrata a estrutura de custos da transportadora existente no mercado brasileiro à época do desenvolvimento de seu trabalho.

Em 2011, por resolução legal, as montadoras foram obrigadas a pagar pelo frete de distribuição e incorporar tal valor como parte de seus custos. Nesse momento, terceirizaram o serviço de transporte e passaram a pressionar as transportadoras por menores valores de frete. Tal situação é a mesma existente nos dias atuais, na qual esta tese se baseia.

2.4 Cuadrado e Griffin (2007) - Modelos matemáticos para a otimização da distribuição de veículos novos na Venezuela

O objetivo de solução do problema de formação de carga para distribuição de veículos zero-quilômetro apresentado por Cuadrado e Griffin (2007) é determinar a quantidade ideal de caminhões cegonha necessária para o transporte dos veículos disponíveis para embarque nos centros de consolidação de carga.

Tal quantidade de caminhões deve ser capaz de maximizar o envio dos veículos mais urgentes em relação às datas de entregas e a receita recebida pela transportadora, pela entrega das unidades às suas respectivas concessionárias de destino. A frota de caminhões que atende os centros de consolidação é heterogênea, com capacidade de carga variando entre 1 e 8 veículos.

A proposta de solução considera a capacidade agregada dos caminhões cegonha atribuídos a cada centro de consolidação de carga existente e a demanda agregada de suas respectivas regiões de atendimento.

Da mesma forma que fizeram Tadei et. al. (2002), os autores resolvem o problema utilizando programação linear inteira mista com diferentes coeficientes de peso para cada uma das parcelas da função objetivo.

Cuadrado e Griffin (2007) também determinam que a participação percentual dos veículos de cada montadora despachados num determinado dia deve ser igual à participação dessas montadoras no número de veículos naquele dia recebidos.

O resultado da aplicação da programação linear inteira mista define o número de caminhões cegonha necessários à operação e quais veículos devem ser carregados em cada um deles. Desta forma, selecionando os veículos para carregamento em cada caminhão cegonha, o algoritmo determina a receita e o número de veículos entregues atrasados.

Entretanto, a solução encontrada não é ótima, pois é uma solução relaxada quanto a integralidade das variáveis de decisão que determinam quais veículos devem ser alocados a qual caminhão disponível, como fizeram Tadei et al. (2002). Não foi mencionado o tratamento dado aos valores não inteiros obtidos na solução.

Ao resultado da programação linear, foi aplicada uma heurística para determinar a alocação dos veículos às localizações de carga dos caminhões cegonha. Os autores não apresentaram detalhes da resolução, a qual apenas se referiam como “técnicas heurísticas”.

A proposta de solução apresentada por Cuadrado e Griffin (2007) foi testada utilizando dados reais dos veículos disponíveis para embarque em dois dias consecutivos da operação e seis diferentes combinações de pesos para os componentes da função objetivo.

Sem discriminar o tamanho das instâncias utilizadas para teste, o autor apresenta o tempo médio de processamento das seis instâncias como sendo igual a 10 minutos para cada uma delas.

Para todas as instâncias testadas, Cuadrado e Griffin (2007) compararam os resultados obtidos pela programação linear com um valor definido como limite superior para a solução. A metodologia de cálculo desse limitante não foi encontrada no trabalho apresentado pelos autores.

Tomando o valor calculado para o limite superior como parâmetro de avaliação da proposta de solução apresentada, os resultados obtidos foram até 4,87% menores que tais limitantes.

Para uma das seis instâncias de teste, para a qual o autor também aplicou a mencionada heurística de alocação de cargas, a receita obtida é quase três vezes maior que a obtida pelo processo manual de alocação, existente na empresa de transporte tomada como referência.

Segundo Cuadrado e Griffin (2007), a proximidade entre os resultados obtidos com a aplicação de sua proposta de solução e os valores estabelecidos como limites superiores e as possibilidades de aumento das receitas mostram que sua proposta é capaz de encontrar boas soluções e pode ser aplicada às instâncias reais do problema.

O objetivo do trabalho apresentado por Cuadrado e Griffin (2007) é calcular o tamanho ideal da frota de caminhões para o atendimento das necessidades de transporte. O objetivo apresentado pelos autores é diferente daquele apresentado para o problema de distribuição de veículos novos no Brasil uma vez que, segundo informações da transportadora, é comum o número de caminhões (terceirizados) disponível para o embarque dos veículos ser maior que a necessidade de transporte de um dia de operação.

2.5 Lin (2010) – Abordagem de solução exata para o problema de carregamento de veículos

Lin (2010) define o problema de carregamento como sendo o de alocar os veículos nas posições de carga dos caminhões cegonha para que possam ser entregues de acordo como uma ordem predefinida de concessionárias a serem visitadas, minimizando o número de remontes.

Para a aplicação de sua proposta de solução, Lin (2010) admite que as rotas e cargas são predefinidas. Os veículos pertencentes a cada carga formada devem ser então sequenciados para alocação às posições de carga do caminhão cegonha.

Diferente da proposta apresentada por Agbegha (1992), que obriga os veículos descarregados nas operações de remonte a serem recarregados nas mesmas posições às quais foram originalmente alocados no centro de consolidação, a proposta de Lin (2010) permite que tais veículos sejam recarregados em qualquer localização de carga não ocupada do caminhão cegonha.

A proposta de Lin (2010) cria a possibilidade de se recarregar os veículos ainda a serem entregues, de forma a evitar remontes que não foram possíveis de serem evitados durante a formação da carga inicial, no centro de consolidação.

Lin (2010) utiliza em sua proposta de solução a mesma representação das localizações de carga dos caminhões cegonha como redes acíclicas e unidirecionais criada por Agbegha (1992). Porém, resolve o problema de minimização do número de remontes utilizando uma formulação matemática que resulta na solução de um problema de alocação quadrática (PAQ).

O PAQ neste contexto se dá com a alocação de n veículos em n posições de carregamento indissociáveis onde cada veículo é atribuído a uma única posição e reciprocamente, com o objetivo de encontrar o custo mínimo da movimentação desses veículos na rede (LOIOLA et al. 2004, 2007). O custo mínimo é calculado pela soma dos produtos distância-fluxo, o qual é dado pelo número de veículos que passam por

cada arco multiplicado pelo respectivo comprimento. Assim, quanto menor for o número de remontes, menor será o fluxo nos arcos e menor será o custo total dos remontes, objetivo da solução.

Três grupos de restrições são utilizados por Lin (2010). O autor apresenta restrições de carregamento que tratam da adequação do tipo/tamanho de veículo à posição de carga disponível, da alocação de veículos grandes, os quais consomem duas posições sequencias de carregamento e da interferência entre pares de veículos sequencialmente carregados.

Para testar o método de solução proposto, Lin (2010) resolve os quinze problemas criados por Agbegha (1992) para cada um dos quatro tipos de caminhões cegonha considerados, com capacidade para carregar até 7, 8, 9 e 12 veículos.

Os resultados da aplicação da proposta de solução desenvolvida por Lin (2010) aos mencionados problemas mostram que sua proposta é capaz de obter melhores soluções para 12 dos 60 problemas propostos por Agbegha (1992). Em nove desses problemas, a redução obtida pela proposta de Lin (2010) apresenta um remonte a menos, em uma ocasião foram dois remontes a menos e, 3 e 4 remontes a menos aconteceram em uma instância cada um.

Para 5 dos 60 problemas mencionados o algoritmo de Lin (2010) não conseguiu encontrar uma solução e assim como fez Agbegha (1992), também considerou tais instâncias como não solucionáveis.

Lin (2010) ainda sugere que pode ter havido erro de transcrição no trabalho de Agbegha (1992), uma vez que outros 2 dos 60 problemas também se mostraram não solucionáveis.

Para as outras 41 instâncias, o algoritmo de Lin (2010) obteve os mesmos resultados que aqueles obtidos pelo de Agbegha (1992).

O tempo de processamento do algoritmo proposto por Lin (2010) chega a ser, para algumas instâncias, até mais de dez vezes maior que o tempo apresentado pela

proposta de Agbegha et al. (1992), respectivamente 4 e 47 segundos, porém ainda não elevados o suficiente para inviabilizar a sua aplicação na prática. O maior tempo de processamento é resultado de maior esforço computacional requerido para o algoritmo encontrar, dentre todas as posições vagas do caminhão cegonha, em qual delas o veículo descarregado deve ser realocado.

A resolução do problema abordado por Lin (2010) trata de um problema diferente daquele existente no Brasil. No caso brasileiro, pela inexistência do custo do remonte, são os próprios motoristas do caminhão cegonha que escolhem em quais localizações de carga cada veículo deve ser carregado, segundo suas preferências pessoais. No Brasil, os motoristas dos caminhões cegonha também escolhem as rotas que irão percorrer. Isso acontece, pois, o cálculo do valor do frete no Brasil considera a distância ponto-a-ponto, desde o centro de consolidação até a respectiva concessionária, não importando o caminho feito até lá.

2.6 Dell’Amico et al. (2011) – Um algoritmo de meta-heurística para o transporte de veículos

Dell’Amico et al. (2011) descrevem o problema de distribuição de veículos zero-quilômetro como: dada uma frota heterogênea de caminhões de transporte de veículos zero-quilômetro, disponível para carregamento em um único centro de consolidação de cargas e diversos veículos a serem entregues às suas respectivas concessionárias, roteirizar as viagens de entrega para que todas as concessionárias da rota sejam visitadas, todas as unidades sejam entregues e a soma das distâncias percorridas pelos caminhões de transporte seja minimizada.

Entregas parciais são permitidas e a política “primeiro que entra primeiro que sai” deve ser seguida na gestão do estoque de veículos disponíveis para embarque no centro de consolidação. Remontes não são permitidos para a entrega dos veículos às suas respectivas concessionárias.

Os autores solucionam o problema da distribuição de veículos zero-quilômetro primeiramente formando rotas de distribuição e posteriormente alocando os veículos selecionados para cada rota às posições de carregamento dos respectivos caminhões cegonha.

Dell'Amico et al. (2011) ressaltam que apesar da divisão do problema original em dois problemas menores sendo um problema de formação de rotas e outro de formação de cargas (alocação), os quais devem ser sequencialmente resolvidos, tais problemas resultantes ainda são NP-Difícil.

Para a formação das rotas, a seleção aleatória de um veículo para embarque em um caminhão cegonha, também aleatoriamente selecionado, inicia a heurística de busca de vizinhança.

O procedimento de busca local continua a alocar veículos às localizações de carga ainda não utilizadas do caminhão cegonha aleatoriamente selecionando, escolhendo, dentre os veículos ainda não alocados, qual tem a concessionária de destino mais próxima à concessionária de destino do último veículo escolhido. Caso a alocação seja factível ela é efetivada, caso contrário o procedimento seleciona o segundo veículo com destino mais próximo ao último alocado. O processo se repete até que todas as localizações do caminhão cegonha sejam ocupadas ou não existirem mais veículos disponíveis para alocação. Nesse momento está definida a carga e a rota da viagem de entrega do caminhão cegonha.

Dell'Amico et al. (2011) validam a factibilidade da carga formada para o caminhão cegonha validando a carga alocada a cada uma de suas plataformas de carregamento, individualmente considerada. No processo de validação, quando todos os segmentos de plataforma contiverem cargas factíveis, a carga do caminhão será factível. Um exemplo de caminhão cegonha com quatro plataformas independentes é apresentado na Figura 2.3.

Para a validação da factibilidade das cargas os autores utilizam o algoritmo de árvore de enumeração desenvolvido por Agbegha (1992). Entretanto no processo de seleção dos veículos a serem alocados, o algoritmo verifica a factibilidade do carregamento

considerando apenas uma das 4 (ou 2) plataformas do caminhão cegonha de cada vez.

Figura 2.3 – Caminhão cegonha com 4 plataformas independentes de carregamento
Fonte: Dell'Amico et al. (2011)

Como alternativa à árvore de enumeração, Dell'Amico et al. (2011) criaram um modelo matemático de programação linear inteira também considerando um segmento de plataforma de cada vez. Tomando o caminhão cegonha representado na Figura 2.3 como exemplo, o algoritmo seria executado quatro vezes, uma para cada uma das plataformas existentes.

Depois das cargas formadas, três procedimentos de trocas para melhoria das soluções são sequencialmente utilizados na tentativa de encontrar soluções factíveis de menor comprimento total das rotas formadas. O primeiro tenta mover todos os veículos de um caminhão cegonha para outro, se a troca for possível e o comprimento da rota for menor, a troca é aceita. O segundo tenta trocar todos os veículos de uma concessionária, alocados a um caminhão cegonha, com todos os veículos de outra concessionária alocados em outro (troca 1 – 1). Finalmente, o terceiro processo tenta trocar todos os veículos de uma concessionária alocados em um caminhão com todos os veículos de duas outras concessionárias, alocados em outro (troca 1 – 2).

O modelo foi testado utilizando as unidades transportadas durante os 23 dias de operação do mês de julho de 2009. Enquanto a menor das instâncias é formada por 272 veículos a serem entregues em 96 concessionárias, a maior delas é formada por 1.139 veículos para 221 destinos.

Considerando o tempo de processamento, enquanto o algoritmo de árvore de enumeração levou, em média, 1,56 segundos para encontrar a solução, o modelo de programação linear precisou de 15,88 segundos, em média.

A aplicação do algoritmo de árvore de enumeração obteve redução média nas distâncias totais das rotas diariamente consideradas igual a 7,4%, em relação aos resultados obtidos pela empresa de transportes. Os resultados referentes à aplicação do modelo matemático não foram apresentados.

Assim, Dell'Amico et al. (2011) concluem que a utilização da árvore de enumeração para a validação das cargas formadas pelo algoritmo construtivo é uma solução de melhor desempenho que a alocação feita pela empresa de transportes, com baixo tempo de processamento, aplicável em situações reais do problema.

Utilizando o comprimento de cada plataforma como restrição à alocação das unidades, pode ocorrer na proposta de solução apresentada por Dell'Amico et al. (2011) o mesmo problema combinatório presente em Tadei et al. (2002).

Ainda, uma vez que no problema apresentado os caminhões cegonha são compostos por quatro plataformas de carregamento, como mostra a Figura 2.3, o processo de formação e validação de cargas se torna de menor complexidade que aquele quando o caminhão é admitido com um conjunto único de posição de carga, como é o caso brasileiro, com 11 posições indissociáveis.

2.7 Dell'Amico et al. (2014) – Otimização de um problema real de transporte de veículos novos

Dell'Amico et al. (2014) propõem melhorias no algoritmo por eles apresentado em 2011 e utilizam a nova proposta de solução para resolver as mesmas instâncias reais apresentadas naquele trabalho. Nesse trabalho, a frota heterogênea é composta por caminhões cegonha com duas ou quatro plataformas de carregamento, iguais àquela apresentada na Figura 2.3.

O processo de formação das rotas se inicia com a seleção de um caminhão cegonha dentre aqueles com a menor capacidade de carga (menor soma do comprimento das plataformas de carregamento) e de uma concessionária com a maior quantidade de veículos a serem recebidos, cuja capacidade de carga necessária seja maior que aquela do caminhão selecionado.

Utilizando uma lista ordenada de forma decrescente quanto ao tamanho dos veículos disponíveis no centro de consolidação de carga com destino àquela concessionária, unidades são alocadas ao caminhão cegonha até que sua capacidade tenha sido totalmente tomada. Assim, determinam-se a rota e a carga do caminhão. O processo se repete até que não existam concessionárias com necessidade de transporte maior que aquela do menor caminhão cegonha disponível.

Para a verificação da factibilidade das cargas, Dell'Amico et al. (2014) utilizam do algoritmo de programação linear inteira proposto por Dell'Amico et al. (2011), ao qual adicionam restrições que tratam das interferências verticais das unidades a serem alocadas.

Tais interferências verticais ocorrem quando a alocação de um veículo em uma determinada posição de carregamento de uma plataforma inviabiliza a utilização da posição de carga localizada na outra plataforma de carregamento, imediatamente acima ou abaixo da posição utilizada.

Entretanto, a factibilidade das cargas não é conferida a cada alocação de veículo, mas somente depois que a soma dos comprimentos dos veículos alocados tenha atingido o limite de capacidade do caminhão em termos de comprimento da plataforma de carregamento.

Caso a carga construída não seja factível, o veículo de menor tamanho é desalocado e a factibilidade é novamente avaliada. O processo de retirada de veículos da carga se repete até que uma carga factível seja encontrada.

Depois das cargas formadas, oito procedimentos de trocas para melhoria das soluções são sequencialmente utilizados. Tais procedimentos tentam encontrar

soluções aceitáveis de menor comprimento total das rotas formadas, trocando unidades alocadas em duas cargas diferentes. Assim que um dos oito processos de busca local encontra uma solução de melhor qualidade, o algoritmo reinicia as buscas por melhoria na solução a partir da primeira regra de troca. O critério de parada determinado é de 1.500 iterações ou a ausência de melhorias depois dos oito processos de busca local.

Na busca por melhores resultados, perturbações também são inseridas com a destruição de algumas rotas. A seleção das rotas a serem destruídas acontece de acordo com a seguinte regra:

1. Selecionar, utilizando uma função de probabilidade uniforme, um destino qualquer;
2. Selecionar todos os destinos que estão até uma distância d do destino selecionado;
3. Destruir todas as cargas destes destinos;
4. Reiniciar o processo de formação das cargas.

A reconstrução das cargas após os procedimentos de destruição utiliza o mesmo algoritmo de construção das soluções iniciais.

Comparando as distâncias das rotas geradas pela alocação feita pela empresa de transportes com as distâncias das rotas geradas pelo algoritmo apresentado, para 23 dias de operação, houve uma redução de 10,5% nas distâncias das rotas. Entretanto, vale ressaltar que o algoritmo levou 8 horas para atingir esse resultado.

Tomando como limite de execução o tempo de 5 minutos, o algoritmo alcançou 5,25% de melhoria em relação às distâncias obtidas pela alocação feita pelo funcionário da transportadora.

A complexidade do problema brasileiro também é grande, principalmente pelos tipos de restrições de formação de grupos e da capacidade de carregamento no que se refere ao número de morfologias.

Desta forma, é de se esperar que uma proposta de solução similar à apresentada por Dell'Amico et al. (2014) teria tempo de processamento ainda mais proibitivo que as 8 horas de processamento requeridas para a resolução do problema por ele apresentado.

Ainda, o processo de retirada de um veículo para se tentar encontrar uma carga viável tem maiores consequências no problema brasileiro. Isso porque a retirada de um veículo de uma carga pode torná-la viável, mas com valor de frete mínimo maior que o valor do frete relativo às unidades efetivamente carregadas. Assim, essa estratégia pode não contribuir com o objetivo de resolução, a minimização dos valores de frete.

2.8 Cordeau et al. (2015) – Um algoritmo multiperíodo para o problema de transporte de veículos

Cordeau et al. (2015) propõem um novo algoritmo para resolver o mesmo problema apresentado em Dell'Amico et al. (2011, 2015). Entretanto, considera tal problema em sua forma dinâmica, admitindo um horizonte de planejamento e não em sua forma estática, na qual um único dia de operação é considerado.

A proposta de solução apresentada por Cordeau et al. (2015) tem como objetivo reduzir o custo total do transporte de veículos zero-quilômetro, determinado como sendo o custo dos quilômetros percorridos nas viagens de entrega, ao qual é adicionado o custo da utilização do caminhão cegonha, das paradas para entregas e das entregas atrasadas. Todos os custos foram transformados em uma quantidade correspondente de quilômetros para que pudessem fazer parte de uma mesma função objetivo.

A frota considerada é heterogênea e um exemplo de caminhão cegonha com capacidade para transportar até 11 veículos é apresentado na Figura 2.4

Figura 2.4– Caminhão cegonha com 4 plataformas independentes, carregado com 11 veículos
Fonte: Cordeau et al. (2015)

Para todos os veículos recebidos no centro de consolidação são conhecidas suas janelas de entrega. Uma janela de entrega é um específico intervalo de dias durante o qual o veículo deve ser entregue à sua respectiva concessionária. Considerando o tempo de viagem do caminhão cegonha desde o centro de consolidação de carga até o destino do veículo, os autores calcularam a janela de alocação de cada veículo disponível para embarque.

O algoritmo desenvolvido por Cordeau et al. (2015) inicia com a ordenação de forma não decrescente dos veículos disponíveis em relação as datas limite de alocação, seguida da determinação do número de dias do horizonte de planejamento.

A seleção dos veículos para alocação começa com a identificação daqueles que tenham um número dias até sua data limite de embarque menor que o número de dias predefinido como horizonte de planejamento. Seguindo a lista ordenada, dentre os veículos identificados, uma quantidade predefinida é selecionada para fazer parte do grupo de veículos a serem alocados. Tais veículos formam o grupo dos veículos urgentes.

Todos os veículos com destino às concessionárias distantes até um limite preestabelecido de quilômetros das concessionárias de destino dos veículos urgentes são identificados. Dentre os veículos identificados, uma quantidade também predefinida é selecionada para fazer parte do grupo de veículos a serem alocados.

A definição das rotas se dá com a utilização da heurística construtiva proposta por Dell'Amico et al. (2011) aplicada sequencialmente para todos os dias do horizonte de planejamento. O algoritmo de árvore de enumeração desenvolvido por Agbegha (1992) é utilizado para verificar a factibilidade da carga e evitar que existam operações

de remonte. Para a conferência da factibilidade das cargas, cada plataforma da cegonha é individualmente avaliada, como fez Dell'Amico et al. (2014).

O processo de melhoria das soluções utiliza 10 regras de procura de vizinhança, as quais trocam veículos entre duas cargas formadas, sendo que oito delas são aquelas apresentadas em Dell'Amico et al. (2014).

Cordeau et al. (2015) admitem que as cargas formadas num determinado dia d não contenham apenas veículos com obrigatoriedade de embarque em d , mas todos os veículos com limite de data de embarque igual a até $d+n$, onde n representa o horizonte de planejamento. Entretanto, somente as cargas formadas para serem despachadas em d , são efetivadas.

O algoritmo desenvolvido foi aplicado a 17.804 veículos entregues durante 23 dias de operação de uma transportadora. O número de veículos requisitados por dia variou de 272 a 1139 e o número de veículos entregues de 951 a 576. Os veículos representavam 723 diferentes modelos (em relação ao peso e comprimento).

As instâncias de testes foram aplicadas considerando-se um horizonte de planejamento de 1, 2, 3, 4 e 5 dias. Testes mostraram que horizontes temporais iguais a 5 dias, com critério de parada igual a 25 minutos, são aqueles com maior redução na distância das rotas. Os autores observaram que, em relação ao tempo de processamento, depois de 10 minutos o algoritmo já converge para uma solução aceitável.

O problema descrito por Cordeau et al. (2015) muito se assemelha com o processo de formação de cargas no mercado brasileiro. Várias características são comuns entre a situação apresentada e a estudada nesta tese: existência de veículos com diferentes tamanhos, diferentes prazos de entrega e necessidade de horizonte de planejamento.

Entretanto, as diferenças nos objetivos de minimização tornam a solução do problema apresentado por Cordeau et al. (2015) inaplicável ao problema brasileiro. Enquanto Cordeau et al. (2015) buscam minimizar um conjunto de custos traduzidos em quilômetros equivalentes, no mercado brasileiro as distâncias percorridas não

guardam relação direta com o valor do frete podendo, por vezes, existir a cobrança de um valor de frete mínimo, o qual se relaciona com a dispersão dos pontos de entrega da rota.

2.9 Análise comparativa dos trabalhos

As descrições dos problemas apresentados durante a revisão bibliográfica mostram variações de um mesmo problema de seleção de veículos para a formação de cargas factíveis, a fim de otimizar um fator de desempenho operacional.

Enquanto a resolução apresentada por alguns autores como, por exemplo, Agbegha (1992) e Lin (2010) buscam selecionar conjuntos de veículos para formarem cargas factíveis minimizando o número de remotes, outras propostas de solução buscam formar agrupamentos de veículos factíveis para a maximização do lucro das transportadoras (TADEI et al., 2002) ou para a minimização do comprimento total das rotas (DELL'AMICO et al., 2011, 2015 e CORDEAU, 2015).

Tais variações do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro, são variações de um mesmo tipo de problema mais abrangente, da otimização combinatória. Fazem parte deste mesmo tipo o problema do caixeiro viajante e o problema da mochila, por exemplo.

As aplicações do modelo matemático de programação linear utilizaram técnicas de relaxamento, uma vez que o tempo computacional requerido para se achar uma solução exata é demasiadamente grande para ser considerado para utilizações práticas.

Aliás, para reduzir a complexidade do problema de formação de carga e distribuição, os quais envolvem decisões de formação de rotas e cargas, todos os autores o dividiram em dois subproblemas menores a serem sequencialmente resolvidos. Entretanto, Dell'Amico et al. (2011, 2015) e Cordeau et al. (2015) afirmam que a resolução separada de um problema de roteirização seguido da resolução de outro do

tipo de carregamento continua sendo a resolução de dois problemas bastante complexos, dois problemas NP-Difícil.

A Tabela 2.1 apresenta um quadro resumo com três dos trabalhos apresentados durante a revisão bibliográfica. Esses trabalhos foram escolhidos, pois apresentam uma proposta de solução diferente daquela encontrada na literatura até sua respectiva publicação. Essas três propostas de solução influenciaram outros trabalhos que mais tarde surgiram na literatura, os quais as adaptaram para situações específicas sendo estudadas.

Tabela 2.1– Características dos trabalhos com maior influência dentre os apresentados na revisão bibliográfica

	Fator de Desempenho		
	Minimizar o número de remontes	Maximizar o lucro da transportadora	Minimizar o comprimento total das rotas
Principal trabalho	Agbegha (1992)	Tadei et al. (2002)	Dell’Amico et al. (2011)
Método de solução: formação das cargas	Heurística gulosa	Programação linear inteira relaxada	Heurística gulosa e buscas locais
Método de solução: alocação factível	Árvore de enumeração	Programação linear inteira relaxada	Árvore de enumeração e programação linear relaxada
Trabalhos influenciados	Lin (2010)	Novo (2005), Cuadrado e Griffin (2007)	Dell’Amico et al. (2015) e Cordeau et al. (2015)
Diferenciais	<ul style="list-style-type: none"> • Restrições veículo versus posição de carregamento • Árvore de enumeração 	<ul style="list-style-type: none"> • Comprimento equivalente • Melhorias por busca local 	<ul style="list-style-type: none"> • Veículos urgentes e não urgentes • Horizonte de planejamento e melhorias por busca local

Fonte: próprio autor

O algoritmo apresentado por Agbegha (1992) contém um pressuposto operacional difícil de ser garantido: os veículos serão recarregados pelos motoristas dos caminhões cegonha, durante as operações de remonte, sempre, exatamente, na mesma configuração que deixaram o centro de consolidação.

Adicionalmente, o modelo desenvolvido por Agbegha (1992) não considera o aspecto temporal da chegada dos veículos em diferentes datas no centro de formação de carga é um modelo estático para uma realidade dinâmica.

Sobre o trabalho de Novo (2005), mudanças na legislação alteraram sobremaneira as características do problema de formação de carga e distribuição no Brasil, de tal forma que o trabalho não pode mais ser aplicado no cálculo dos custos das empresas de transportes de veículos zero-quilômetro.

Entretanto, Novo (2005) foi importante por tentar resolver o problema de formação de cargas no mercado brasileiro utilizando um método exato. A conclusão de Novo (2005) sobre a inviabilidade da proposta suporta a necessidade de métodos heurísticos para a resolução de tal problema.

As características dos caminhões cegonha apresentadas por Dell'Amico et al. (2014) são bastante diferentes daquelas existentes no mercado Brasileiro. Enquanto Dell'Amico et al. (2014) resolvem um problema de agrupamento para cada uma das quatro plataformas do caminhão cegonha, cada uma delas contendo 2 ou 3 posições de carga, no Brasil os caminhões cegonha possuem duas plataformas de carregamento, com capacidade total para carregar até 11 veículos.

Outro diferencial existente no caso brasileiro é a ocorrência de regras de agrupamento que fazem com que qualquer veículo alocado a uma posição de carregamento do caminhão cegonha interfira na decisão de alocação em todas as outras posições. Diferente das regras de interferências que atuam a cada par de veículos alocados, mas não na carga total considerada.

O problema descrito por Cordeau et al. (2015) mais se assemelha ao problema de formação de carga e distribuição existente no mercado brasileiro. Entretanto, determinar a restrição de carregamento do caminhão em função do comprimento da plataforma da cegonha, não se adequa ao problema brasileiro uma vez que nesse problema as restrições de carregamento tratam do número de veículos e do número de morfologias na carga – conceito explicado durante a revisão bibliográfica do trabalho de Novo (2005)

2.10 Considerações finais do capítulo

Primeiramente, este capítulo apresentou a revisão bibliográfica dos trabalhos sobre problemas de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro. Como mostra a análise feita, existem diversas variações do problema com diferentes fatores de desempenho.

O alto grau de dificuldade para se resolver tal problema é uma constatação comum dentre todos os autores estudados, independentemente do fator de desempenho sendo avaliado: minimizar o número de remontes nas cargas formadas, maximizar o lucro da transportadora de veículos ou minimizar o comprimento total das rotas de distribuição. A alta quantidade de veículos a serem alocados, o grande número de tamanhos de veículos, destinos e possíveis arranjos determinam esse problema de análise combinatória como um de difícil solução, um problema NP-Difícil (TADEI et al, 2002).

Para problemas com tamanha dificuldade, métodos exatos são poucas vezes utilizados para solucionar instâncias reais do problema e dificilmente conseguem resolvê-lo em tempo computacional satisfatório. Dada a complexidade e o tempo de processamento, as heurísticas apresentam-se como método preferido na busca de soluções para esses problemas.

Importante é o fato de não ter sido possível encontrar na literatura pesquisada nenhum trabalho que versasse sobre o problema de distribuição de veículos no mercado brasileiro, com foco na redução do valor do frete das viagens de distribuição.

Novo (2005), estudando outro problema existente no mercado brasileiro de distribuição de veículos zero-quilômetro, mostra que métodos exatos não conseguiram resolver nem mesmo pequenas instâncias daquele problema.

Tal situação abre uma janela de oportunidade de estudo de uma situação ainda não considerada pelos trabalhos disponíveis na literatura. A descrição do problema de

formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil encontra-se no capítulo a seguir.

Capítulo 3

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo o Anuário da Indústria Automobilística Brasileira publicado pela Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2015), no ano de 2015 estavam instaladas 23 montadoras de veículos no Brasil, as quais operavam 65 unidades industriais com capacidade de produção maior que 3,5 milhões de unidades.

Mesmo as montadoras sendo as responsáveis pela entrega dos veículos às suas respectivas concessionárias, é prática corrente em diversos países terceirizarem o serviço de entrega às empresas especializadas no transporte de veículos zero-quilômetro. Tais empresas, genericamente chamadas transportadoras, recebem os veículos das montadoras e assumem a responsabilidade por gerir os estoques e transportá-los até seus respectivos destinos. Uma transportadora pode gerenciar a distribuição dos veículos de mais de uma montadora, misturando unidades de diferentes marcas numa mesma viagem de entrega.

As transportadoras, por sua vez, também terceirizam o serviço de transporte para os donos de caminhões do tipo cegonha, específicos para o transporte de veículos, pagando um valor de frete calculado para cada viagem do caminhão. Tal valor de frete varia de acordo com a composição da carga e as distâncias dos destinos a serem visitados.

Nesta tese busca-se solucionar o caso particular do problema no Brasil, com o objetivo de obter as melhores combinações de veículos a serem carregados nos caminhões cegonha, para serem entregues às suas respectivas concessionárias, em um horizonte de planejamento preestabelecido, tal que essas formações resultem no

menor valor de frete total pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha.

Assim, o problema da formação de cargas abordado neste trabalho pode ser formalizado da seguinte maneira:

- dado um conjunto de veículos zero-quilômetro de diferentes tipos/tamanhos, originários de diferentes montadoras, localizados em um pátio de uma empresa de transporte de veículos novos, com diferentes datas de entrega predeterminadas, destinados a uma ou mais concessionárias e com seus respectivos valores de frete baseados em seus tamanhos e distâncias até seus destinos;
- dado um conjunto de caminhões tipo cegonha de idênticas capacidades, com duas plataformas de carregamento, subdivididas em seções ajustáveis em relação a seu comprimento, cujo ajuste não impacta a capacidade de carga do caminhão e tendo, cada uma dessas seções, restrições de carregamento em relação ao comprimento e à altura dos veículos;
- dado que existe um número mínimo e máximo de veículos considerados na formação das cargas de cada caminhão, existentes em maior número que a necessidade diária da operação de distribuição;
- dada a metodologia de cálculo do frete no mercado brasileiro.

Tem-se como objetivo

- selecionar grupos de veículos a serem transportados em caminhões cegonha, independentemente de sua montadora de origem, cujo carregamento seja fisicamente factível, de tal forma que o prazo de entrega estabelecido para cada unidade seja cumprido e o valor total do frete de distribuição pago pela transportadora ao dono do caminhão para a entrega das unidades às suas respectivas concessionárias seja minimizado.

No problema abordado por esta tese, o frete é calculado para cada veículo alocado à carga, sendo o frete total de uma viagem de distribuição igual à soma dos valores de frete de cada unidade carregada. Entretanto, foi estipulado um valor de frete mínimo,

calculado para cada carga formada, o qual, por vezes, pode ser maior que a soma do frete das unidades individualmente consideradas.

Além do valor pago pela transportadora ao dono do caminhão cegonha pelo transporte dos veículos, existem outros custos associados às viagens de distribuição, considerados como parte do valor de frete total nos problemas apresentados na revisão bibliográfica. Porém, uma vez que essa não é a prática do setor no Brasil, as seguintes parcelas de custos não fazem parte do escopo deste trabalho:

- custo fixo por remonte, os quais acontecem quando um veículo precisa ser descarregado em uma concessionária que não é seu destino final, para que outro possa ser então entregue, e precisa ser posteriormente recarregado, pois se destina a uma concessionária ainda a ser visitada;
- custo fixo por parada, representado por um custo fixo por concessionária visitada pelo caminhão cegonha durante sua viagem de entrega;
- custo fixo pela utilização do caminhão, o qual incide, independente da distância percorrida na viagem de entrega ou do número de veículos transportados;
- custo pelo atraso da entrega, o qual varia dependendo do número de dias de atraso e do valor das unidades entregues depois da data programada.

No problema brasileiro, não existe o custo do remonte, possibilitando que os veículos sejam carregados em qualquer ordem em relação à sequência das concessionárias a serem visitadas durante a viagem de distribuição.

Ainda, uma vez que o frete é calculado tomando como base as distâncias ponto-a-ponto desde o centro de consolidação de carga até as concessionárias a serem atendidas, o número de paradas para entregas, a sequência de visitas e a distância total percorrida pelo caminhão cegonha na viagem de distribuição não influenciam o valor a ser pago pela transportadora ao dono do caminhão cegonha.

Também não existem custos fixos pela utilização do caminhão cegonha, tampouco multas pelas entregas atrasadas.

As operações de distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil utilizam caminhões cegonha com capacidade para transportar até onze veículos, compostos por duas

plataformas de carregamento, como mostra a Figura 3.1. Na realidade brasileira, os caminhões cegonha não podem iniciar suas viagens caso não sejam carregados com, no mínimo, 8 unidades.

Figura 3.1– Modelo representativo de caminhão cegonha utilizado no Brasil
Fonte: empresa de transporte de veículos zero-quilômetro

O problema apresentado é um do tipo dinâmico, cujas variáveis se alteram no tempo. Não se sabe quais veículos serão recebidos nos dias seguintes e tampouco as respectivas premências de carregamento. Ainda, a urgência de carregamento das unidades já em estoque se altera com o passar dos dias.

Cabe ressaltar que dentre os vários centros de consolidação pertencentes à empresa que cedeu os dados para este trabalho, o escopo desta tese é um centro de consolidação de carga específico, localizado no estado de São Paulo. Não faz parte do escopo desta tese os veículos alocados a viagens de entrega a partir de outros centros de consolidação ou qualquer transferência de veículos entre centros de consolidação de carga da empresa de transporte.

No restante deste capítulo serão apresentados detalhes do processo sumariamente descrito acima, tais como a formulação utilizada para o cálculo do frete, as restrições para a formação de cargas e as linhas de distribuição.

3.1 Centro de Consolidação de Carga

A montagem das cargas para distribuição ou, em outras palavras, a seleção dos veículos a serem carregados em cada caminhão cegonha, ocorre no centro de

consolidação de carga das transportadoras contratadas pelas montadoras para a entrega dos veículos zero-quilômetro às suas respectivas concessionárias.

Utilizando-se de contratos cujos prazos de vigência podem variar de um a cinco anos, uma montadora pode utilizar diferentes transportadoras para entregar os veículos montados em diferentes unidades fabris. As montadoras também podem utilizar diferentes transportadoras para a entrega dos veículos produzidos em uma mesma unidade fabril, mas com destinos a diferentes regiões do país.

Para reduzir o custo do transporte dos veículos desde as montadoras até os centros de consolidação, as transportadoras instalam tais unidades operacionais próximas às fábricas de veículos. De acordo com informações contidas nos sites das transportadoras, a Sada está presente em 18 cidades brasileiras (<http://www.sada.com.br/unidades>, acessado em 15 nov. 2016) e a Brazul tem operações em 19 delas (<http://www.brazul.com.br/unidades.html>, acessado em 15 nov. 2016). Uma visão aérea de um centro de consolidação de carga é apresentada na Figura 3.2.

Veículos zero-quilômetro são diariamente recebidos nos centros de consolidação de carga para serem transportados até suas respectivas concessionárias de destino. Ao chegarem ao centro de consolidação, as informações contidas em suas respectivas notas fiscais de venda, emitidas pelas montadoras, são inseridas no banco de dados da empresa de transporte.

A partir da inserção das informações das notas fiscais no sistema informatizado da transportadora, os veículos são considerados disponíveis para embarque e as notas fiscais de venda são enviadas para o departamento responsável pela formação das cargas.

Figura 3.2- Vista aérea de um centro de consolidação de veículos zero-quilômetro
Fonte: <http://www.portalcatalao.com.br/porta/noticias/transzero-inaugura-ampliacao-na-filial-de-catalao,NTV,MTI3ODk.rb#top>. Acessado em 13 abril 2015.

No departamento responsável pela formação das cargas, as notas fiscais de venda são manualmente agrupadas (empilhadas) de acordo com os grupos de destinos predefinidos, independentemente da marca ou do modelo dos veículos. Cada grupo de destino é chamado “linha de distribuição” e suas características são apresentadas a seguir.

3.2 Linhas de distribuição

As linhas de distribuição surgiram quando as grandes empresas de transporte de veículos zero-quilômetro iniciaram seu crescimento com a aquisição de concorrentes regionais. As empresas adquiridas, entretanto, exigiram manter o atendimento das

concessionárias até então atendidas por seus caminhões cegonha. Tal exigência criou conjuntos de concessionárias atendidas exclusivamente por caminhões cegonha predeterminados. Assim, “linha de distribuição” é o nome dado a um conjunto de concessionárias que deve sempre ser atendido por um mesmo conjunto de caminhões cegonha.

Todas as concessionárias pertencem a uma única linha de distribuição e sabe-se que não existe nenhuma relação geográfica entre as concessionárias pertencentes a cada uma delas. Os agrupamentos são mutuamente excludentes, de tal forma que não existe uma concessionária atendida por caminhões cegonha pertencentes a duas linhas de distribuição e tampouco existe um mesmo caminhão cegonha atendendo concessionárias pertencentes a mais de um agrupamento.

Como as linhas de distribuição são agrupamentos de concessionárias sem correlação geográfica, pode haver, em uma mesma cidade, concessionárias pertencentes a duas linhas de distribuição diferentes. Mesmo prejudicando as possibilidades de otimização global do custo de distribuição dos veículos zero-quilômetro, estas linhas são mantidas em virtude dos potenciais riscos de retaliação dos donos dos caminhões cegonha em relação à transportadora, caso as exclusividades de destino fossem retiradas.

Não existe um número predefinido de concessionárias ou de caminhões cegonha por linha de distribuição. O número de caminhões cegonha que atende cada linha de distribuição pode ser aumentado quando a capacidade de transporte ficar menor que aquela exigida para o atendimento das necessidades das montadoras. Entretanto, a adição de caminhões cegonha deve ser negociada com os proprietários dos caminhões cegonha que atualmente prestam serviço às concessionárias da linha de distribuição cuja capacidade precisa ser aumentada.

Ainda, o número de caminhões disponíveis para alocação é sempre maior que aquele necessário para satisfazer as necessidades de transporte. É comum existirem dias nos quais o volume de veículos selecionados para embarque utiliza menor capacidade de transporte que a capacidade de carga agregada dos caminhões cegonha disponíveis para alocação.

Não foi possível saber o número total de caminhões cegonha disponíveis para carregamento, tampouco a quantidade existente para cada linha de distribuição.

Para melhor entendimento do impacto da existência das linhas de distribuição, utilizando dados reais em relação aos destinos, suponha que existem três veículos pequenos de uma montadora X para serem entregues a cada um dos seguintes destinos: as cidades de Xanxerê (SC), Chapecó (SC) e Palmitos (SC), respectivamente assinaladas com as letras A, B e C no mapa da Figura 3.3. Ainda, existem outros dois veículos pequenos, de outra montadora Z, que devem ser entregues em Chapecó.

Utilizando um caminhão cegonha do tipo padrão, com capacidade para carregar 11 veículos pequenos, os veículos da marca X tomariam nove das onze posições de alocação disponíveis, restando ainda duas posições livres para carregamento. Caso a concessionária da montadora Z em Chapecó não pertença à mesma linha de distribuição que as concessionárias da montadora X, as duas unidades da montadora Z não poderão fazer parte da mesma carga. Outra carga deverá ser formada para o atendimento da concessionária da montadora Z.

Figura 3.3— Mapa da região oeste do Estado de Santa Catarina.

Fonte: Adaptado de Google Maps, disponível em: <https://goo.gl/RRwPbU>. Acessado em: 30 abril 2015.

Na operação de transporte de veículos zero-quilômetro, não existe a obrigatoriedade de que todos os veículos a serem entregues num mesmo dia a uma mesma concessionária sejam transportados em uma única viagem. Em outras palavras, uma concessionária pode ser visitada mais de uma vez por dia, já que entregas parciais são permitidas.

Analisando as informações contidas na base de dados disponibilizada por uma transportadora, com informações sobre o transporte de 164.419 veículos recebidos no centro de consolidação de carga de outubro de 2010 até maio de 2011 e entregues de 1 de janeiro a 31 de maio de 2011, verificou-se a existência de 13 linhas de distribuição, todas partindo do centro de consolidação objeto deste trabalho. Cada linha de distribuição atende de 36 a 250 concessionárias, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1– Linhas de distribuição

Linha	Número de Municípios	Número de Concessionárias
100	190	250
122	108	193
101	90	185
115	55	109
176	55	111
103	54	58
186	51	79
148	35	44
133	32	52
192	32	43
150	27	48
107	26	46
183	19	36
13 linhas	774 Municípios	1.254 Concessionárias

Fonte: próprio autor

Dentre os registros de entrega dos 164.419 veículos, as informações sobre o transporte de 25.865 unidades não puderam ser consideradas para este trabalho, pois tais veículos foram transportados em caminhões cegonha cujas cargas continham menos que 8 unidades.

Cargas com menos de 8 veículos são provavelmente destinadas às cidades com algum tipo de restrição de tráfego de veículos grandes ou se referem a entregas especiais como, por exemplo, a entrega de ambulâncias, para as quais não existe um número mínimo obrigatório de veículos na carga. A Figura 3.4 ilustra uma carga formada por 3 veículos, cujas respectivas concessionárias estão localizadas em uma cidade com restrição ao tráfego de veículos grandes.

Figura 3.4 – Exemplo de carga para cidades com restrição de tráfego de veículos grandes
Fonte: próprio autor

Permaneceram na base de dados utilizada neste trabalho, informações sobre o transporte de 138.554 veículos (84% do total disponibilizado), pertencentes a 10 linhas de distribuição, particionados conforme indicado na Tabela 3.2.

Pelas informações contidas na Tabela 3.2, pode-se notar que existem grandes diferenças entre os volumes transportados por diferentes linhas de distribuição. Tais diferenças são determinadas pelo número e pela demanda das concessionárias contidas em cada uma dessas linhas.

Sem que exista o risco da perda de confidencialidade dos dados disponibilizados pela transportadora, a Figura 3.5 mostra as cidades atendidas por uma das linhas de distribuição de maior volume de veículos transportados.

Tabela 3.2– Veículos recebidos por período e por linha de distribuição

IDLINHA	Antes de janeiro 2011	Janeiro 2011	Fevereiro 2011	Março 2011	Abril 2011	Maio 2011	Total Geral
122	1.586	6.946	8.325	7.827	8.403	7.638	40.725
101	975	5.696	5.752	6.220	6.123	6.420	31.186
100	737	4.545	5.593	3.810	4.677	3.370	22.732
107	285	2.372	2.252	2.202	2.143	1.805	11.059
176	351	2.034	1.964	2.107	1.766	1.841	10.063
115	182	854	1.869	1.234	1.379	1.212	6.730
183	205	1.312	1.086	1.259	1.420	1.031	6.313
148	109	654	985	812	968	848	4.376
186	267	415	1.082	904	674	660	4.002
150	28	165	421	384	370		1.368
Total	4.722	24.993	29.329	26.759	27.923	24.825	138.554

Fonte: próprio autor

Figura 3.5 – Mapa das cidades atendidas por uma das linhas de distribuição

Fonte: Adaptado de Google Maps. Disponível em: <https://goo.gl/DGV3Bw> Acessado em 12 jul. 2017.

A localização das cidades atendidas pelas linhas de distribuição ao longo de rodovias fez surgir grupos de destinos atendidos pela mesma via de acesso. Esses agrupamentos fazem com que o conjunto de veículos a serem transportados também

seja subdividido de acordo com as rodovias de acesso a suas respectivas concessionárias de destino. Consequentemente, subagrupamentos de destinos são criados dentro das linhas de distribuição e considerados no processo de formação de cargas. É necessário considerar cada um desses subagrupamentos individualmente, uma vez que não faz sentido alocar, em uma mesma carga, veículos com destino a concessionárias atendidas por rodovias distantes umas das outras.

Para melhor entendimento, tome como exemplo duas cidades destacadas no mapa da Figura 3.5: Presidente Prudente (destacada pelo marcador de cor amarela) e Ribeirão Preto (destacada pelo marcador de cor roxa). Ainda que fazendo parte da mesma linha de distribuição, enquanto Ribeirão Preto sempre será atendida por caminhões que contenham veículos para as cidades do eixo São Paulo-Ribeirão Preto, próximas à rodovia Anhanguera (BR-050), a cidade de Presidente Prudente será atendida por caminhões contendo veículos para as cidades do eixo São Paulo-Presidente Epitácio, próximas à rodovia Castelo Branco (BR-374). Neste exemplo, e como acontece na operação real de transporte, não são formadas cargas com veículos pertencentes a duas cidades distantes, atendidas por diferentes rodovias, mesmo que façam parte da mesma linha de distribuição.

Análises no banco de dados utilizado nesta tese mostrou que um desses agrupamentos é formado por cidades do litoral paulista, com acesso pela rodovia Rio Santos (SP-101). Esse agrupamento de destinos para o qual o nome “Santos” foi associado, contém as seguintes cidades: Guarujá, Cubatão, Santos, São Vicente, Praia Grande, Itanhaém, Peruíbe, Registro e Iguape, destacadas na cor verde do mapa da Figura 3.5 e com maior destaque apresentadas no mapa da Figura 3.6.

A outro agrupamento contido na linha de distribuição representada na Figura 3.5, desta vez destacado pela cor azul, foi associado o nome “Socorro”. Nesse agrupamento estão contidas as seguintes cidades: Franco da Rocha, Atibaia, Itatiba, Vinhedo, Valinhos, Bragança Paulista, Jundiaí, Amparo e Socorro.

Figura 3.6 – Mapa das cidades atendidas pelo agrupamento denominado “Santos”
Fonte: Adaptado de Google Maps. Disponível em: <https://goo.gl/tFRjLS> Acessado em 12 julho 2017.

Existem outros agrupamentos nessa mesma linha de distribuição, representada no mapa da Figura 3.5; entretanto, não foram destacados para evitar seu reconhecimento e possível quebra da confidencialidade dos dados cedidos pela empresa de transportes.

Em outra linha de distribuição, um agrupamento identificado pelo nome “Vale” contém as cidades de Suzano, Mogi das Cruzes, Jacareí, São José dos Campos, Taubaté, Pindamonhangaba e Guaratinguetá.

Finalmente, a linha de distribuição que atende as concessionárias da região sul do país foi considerada como um único agrupamento. Esse grupo, ao qual foi associado o nome “Sul”, é composto por 78 cidades dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Os veículos com destino a cada um desses agrupamentos de cidades serão utilizados como instâncias reais do problema para avaliar a capacidade de resolução do método exato. Os resultados do modelo matemático serão utilizados para avaliar a qualidade das soluções obtidas pela heurística de busca local multi-início pela resolução dessas mesmas instâncias.

Considerando a periodicidade diária, a média de veículos recebidos por linha de distribuição é de 100 unidades e a média de veículos embarcados é igual a 120. Como mostram a Figura 3.7 e a Figura 3.8. Tanto para o volume de veículos recebidos quanto para o volume de veículos embarcados, em mais de 80% das ocorrências, os volumes diários são de até 197 unidades.

Figura 3.7 – Histograma dos volumes médios diários recebidos por linhas de distribuição
Fonte: próprio autor

Figura 3.8 – Histograma dos volumes médios diários embarcados por linhas de distribuição
Fonte: próprio autor

A diferença entre o número de veículos diariamente recebidos e embarcados é decorrência do fato de não ser necessário despachar as unidades no mesmo dia de seu recebimento. Existem prazos diferentes para que a alocação dos veículos se torne obrigatória a fim de serem entregues às suas respectivas concessionárias, antes da data de entrega prometida. Mais detalhes sobre o cálculo do prazo até a obrigatoriedade da alocação encontram-se a seguir.

3.3 Prazo para obrigatoriedade de alocação

O prazo para a alocação de um veículo zero-quilômetro para que sua entrega à sua respectiva concessionária de destino seja feita até uma determinada data prometida, se inicia no dia em que ele deixa sua montadora de origem em direção ao centro de consolidação de carga da transportadora.

O tempo entre a partida do veículo da montadora de origem e sua chegada a um centro de consolidação é chamado de prazo de transferência. O prazo de transferência, estabelecido em acordo entre as partes são as primeiras 24 horas, contadas a partir da saída do veículo da montadora.

Operacionalmente, como os prazos são discretizados em dias, tem-se o prazo de transferência como sendo o dia da saída do veículo da montadora em direção ao pátio da transportadora, ao qual um dia útil é adicionado.

Na prática, os veículos chegam ao centro de consolidação em menos de uma hora depois de deixarem a montadora, pois nenhum centro de consolidação de carga está mais distante que uma hora de viagem das fábricas das montadoras que atendem.

Ao fim do prazo de transferência, inicia-se o prazo para a alocação e despacho do veículo à sua respectiva concessionária de destino, tal prazo é igual a dois dias úteis. Em outras palavras, a empresa de transporte tem dois dias de operação para decidir em que momento seu estoque contém um subgrupo de veículos necessários e

suficientes para a formação de uma carga que atenda todas as restrições operacionais para a entrega do veículo dentro do prazo estabelecido.

Considerando os prazos de transferência e alocação admitidos, pode-se assumir que qualquer veículo recebido no centro de consolidação, independente da distância até sua respectiva concessionária de destino tem, no mínimo, 4 dias até sua obrigatoriedade de embarque. Ainda, é possível admitir que o modelo de solução também tenha seu tempo discretizado em dias, não sendo necessário considerar períodos menores, tais como 12 ou 6 horas.

Operacionalmente, o prazo de embarque dos veículos deve ser ajustado ao fato do caminhão cegonha viajar por dia, em média, 200 quilômetros a mais que a distância média diária admitida no contrato com as montadoras. Enquanto um caminhão cegonha chega a percorrer 600 quilômetros por dia, o contrato de serviço estabelece 400 quilômetros como a distância média diária percorrida pelo caminhão.

Para melhor entendimento, tome como exemplo um veículo recebido no dia 8 de março de 2011 com destino a uma concessionária distante 1.771 quilômetros do centro de consolidação. Neste exemplo, a data de entrega admitida pela montadora seria o dia 17 de março. O cálculo da data prometida computa o prazo de transferência - igual a dois dias, o prazo de alocação - também igual a dois dias, o tempo de viagem do caminhão cegonha - igual a cinco dias, e a existência de um domingo, interrompendo por um dia a viagem do caminhão. Para esclarecimento, o tempo de viagem igual a cinco dias é o resultado da divisão da distância a ser percorrida pelo caminhão cegonha (1.771 km) pela distância admitida para um dia de viagem (400 km). A Tabela 3.3 - coluna "Admitido pela Montadora" detalha os prazos mencionados.

Se contratualmente o veículo tomado como exemplo deveria ser alocado a uma carga no dia 12 de março, operacionalmente a alocação pode acontecer até o dia 15 de março, como mostra a coluna "Executado pela Transportadora" da Tabela 3.3.

Tabela 3.3– Cálculo da data limite para embarque

Dias até obrigatoriedade de alocação	Data	Admitido pela Montadora	Executado pela Transportadora
7	8/3/2011 Terça-feira	Transferência	Disponível para carregamento
6	9/3/2011 Quarta-feira	Transferência	Disponível para carregamento
5	10/3/2011 Quinta-feira	Formação de carga	Disponível para carregamento
4	11/3/2011 Sexta-feira	Formação de carga	Disponível para carregamento
3	12/3/2011 Sábado	Viagem dia 1 = percorridos 400 km	Disponível para carregamento
2	13/3/2011 Domingo		
1	14/3/2011 Segunda-feira	Viagem dia 2 = percorridos 800 km	Disponível para carregamento
0	15/3/2011 Terça-feira	Viagem dia 3 = percorridos 1.200 km	Viagem dia 1 = percorridos 600 km
	16/3/2011 Quarta-feira	Viagem dia 4 = percorridos 1.600 km	Viagem dia 2 = percorridos 1.200 km
	17/3/2011 Quinta-feira	Viagem dia 5 = percorridos 1.771 km	Viagem dia 3 = percorridos 1.771 km

Fonte: próprio autor

Tal diferença de datas é resultado da diferença entre a admitida distância percorrida por um caminhão cegonha em um dia de viagem (400 km) e a real distância que um caminhão viaja por dia (600 km). Dessa forma, não são necessários 5 dias de viagem para que o caminhão cegonha percorra os 1.771 quilômetros, mas apenas 3. Logo, não existe a necessidade desse veículo ser alocado no dia 12 de março, uma vez que mesmo sendo alocado até o dia 15 do mesmo mês, ele ainda seria entregue dentro do prazo estabelecido.

Dado o exposto, as transportadoras planejam sua operação considerando que um caminhão cegonha pode viajar 600 quilômetros por dia. Ainda, uma vez que na operação real de transporte as cargas são montadas e despachadas logo pela manhã, admite-se que o caminhão pode viajar até 600 quilômetros no mesmo dia em que foi despachado.

A Tabela 3.3 mostra que o veículo recebido no dia 12 de março poderia permanecer no centro de consolidação de cargas por 7 dias até que sua alocação fosse obrigatória, no dia 15 de março, para ser entregue até a data prometida. Nesse dia, o prazo remanescente (em dias) que esta unidade pode ficar no centro de consolidação aguardando o embarque é zero.

Analizando as informações contidas na já referida base de dados, constatou-se que aproximadamente 80% dos veículos tem, na data de chegada ao centro de consolidação, de 5 a 6 dias de prazo até se tornarem obrigatórios no processo de alocação, como mostra a Figura 3.9.

O fato de um veículo estar disponível para alocação quando seu prazo para alocação (Dt^v) chega a zero, não significa que ele será efetivamente alocado a uma carga em formação. Para que o veículo seja alocado é preciso que exista um conjunto de veículos disponíveis, com os quais uma carga factível que o contenha possa ser formada.

Figura 3.9– Distribuição dos veículos por prazo de embarque.

Fonte: próprio autor

O processo de formação de cargas deve então encontrar combinações de tamanhos de veículos que sejam factíveis para carregamento, contendo aqueles com obrigatoriedade de alocação, e cujas cargas apresentem os menores valores de frete possível.

Desta forma, o tamanho dos veículos, representado pelo atributo morfologia, impacta tanto o valor do frete como a formação de combinações de cargas factíveis.

3.4 Morfologia

A morfologia de um veículo é um número predefinido que varia entre 1, inclusive e 2, inclusive e representa o tamanho equivalente do veículo em relação a um veículo padrão preestabelecido, cuja morfologia é igual a 1,0. Por exemplo, um veículo com morfologia 1,35 indica que toma 35% mais do comprimento da plataforma de carga do que o veículo padrão quando carregado no caminhão cegonha.

A morfologia de um veículo funciona como um fator de equivalência. A menor morfologia admitida tem valor igual a 1 e todos os veículos com essa morfologia consomem a mesma capacidade de carga quando embarcados num caminhão cegonha.

O conceito de morfologia diz respeito, portanto, a um atributo numérico conhecido de cada modelo de veículo. Atualmente existem 13 diferentes classes ou tipos de morfologia, como mostra a Tabela 3.4, que caracterizam todos os diferentes modelos de veículos zero-quilômetro transportados. A cada tipo de morfologia, um fator de equivalência fe^v é associado.

As morfologias são utilizadas nas restrições de formação de conjuntos que se aplicam ao processo de formação das cargas. Tais restrições determinam o número máximo de veículos de cada tipo de morfologia que se pode alocar a um caminhão de forma a se obter uma carga fisicamente possível de ser carregada. Tem-se então que em uma carga:

- o conjunto dos veículos de morfologia “b” até “g” não pode ser maior que 8;
- o conjunto dos veículos de morfologia “h” até “l” não pode ser maior que 6;
- quando existir um veículo de morfologia do tipo “m” alocado, o conjunto dos veículos das outras morfologias não pode ser maior que 9;
- a soma dos valores das morfologias alocadas em uma carga não pode ser maior que 13,28.

Tabela 3.4– Tipos de morfologias e fator de equivalência

Tipo	Fator de equivalência (fe^v)
a	1,00
b	1,10
c	1,12
d	1,19
e	1,22
f	1,25
g	1,3
h	1,31
i	1,32
j	1,35
k	1,37
l	1,57
m	2,00

Fonte: próprio autor

Um exemplo no qual um veículo de morfologia do tipo “m”, no caso um furgão, foi alocado à carga é apresentado na Figura 3.10. É possível notar que a alocação do furgão consumiu a capacidade de duas posições de carregamento: a posição na qual foi alocado e a posição imediatamente abaixo à de sua alocação. Nesta situação é fisicamente impossível a alocação de 11 veículos à carga.

Figura 3.10– Opção de formação de carga com 10 veículos
 Fonte: empresa de transporte de veículos zero-quilômetro

A análise das cargas formadas para a entrega dos veículos cujas informações estão contidas no banco de dados utilizado para este trabalho, identificou a existência de 257 possíveis combinações de tipos de morfologias utilizadas pela transportadora na formação das cargas dos caminhões cegonha. Como apresentado na Tabela 3.5, os 10 agrupamentos mais utilizados representam mais de 60% das cargas formadas.

Assim, ao considerar a adição de um determinado veículo à carga em formação, o funcionário da transportadora deve priorizar a alocação daqueles cujas datas de obrigatoriedade já tenham sido atingidas, verificar a possibilidade de se carregar fisicamente aquele grupo de veículos em um caminhão cegonha e ainda evitar a formação de uma carga com a incidência do frete “9 Base”.

A metodologia de cálculo do frete para a distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil é apresentada a seguir.

Tabela 3.5– Frequência dos agrupamentos de morfologia nas cargas formadas pelo funcionário da transportadora

Composição de Carga (agrupamento de morfologias)	Número de Veículos na Carga	Valor das morfologias alocadas	Frequência percentual	Participação Acumulada
11a	11	11,00	21,6%	21,6%
10a	10	10,00	8,4%	30,0%
9a	9	9,00	6,3%	36,3%
8a	8	8,00	5,4%	41,7%
10a1l	11	11,57	4,5%	46,2%
10a1g	11	11,30	4,1%	50,3%
10a1h	11	11,31	3,9%	54,2%
9a1g	10	10,30	3,3%	57,5%
9a2h	11	11,62	3,0%	60,5%
9a2g	11	11,60	2,6%	63,1%
Outras composições	---	---	36,9%	100,0%

Fonte: próprio autor

3.5 Cálculo do valor do frete

O valor do frete a ser pago pela empresa de transporte ao dono do caminhão cegonha j , o frete carreteiro, é definido pela distância entre o centro de consolidação e a

respectiva concessionária de destino das unidades transportadas e por suas respectivas morfologias, calculado conforme a expressão (1). O valor do frete é calculado em unidades monetárias, sendo f um valor monetário fixo, por quilômetro de distância entre o centro de consolidação e a concessionária de destino do veículo v , $v \in V_j$, onde V_j representa o conjunto de veículos alocados ao caminhão cegonha j .

$$F_c = \quad (1)$$

Onde:

- F_c : valor do frete carreteiro do caminhão cegonha j , em unidades monetárias
- f : valor monetário do frete por quilômetro
- fe^v : valor da morfologia do veículo v
- D^v : distância entre o centro de consolidação e o destino do veículo

A fim de compensar o dono do caminhão cegonha por possíveis perdas relacionadas à baixa utilização do ativo (caminhão cegonha) – característica das viagens com grande dispersão das distâncias dos destinos de entrega, o setor pratica um frete mínimo, um “piso”, denominado frete “9 Base”. O frete “9 Base” corresponde a um limitante inferior do valor do frete de cada viagem, cuja fórmula de cálculo é dada pela expressão:

$$F_{9B} = 9 \cdot f \cdot Morf_b \cdot D_{vl} \quad (2)$$

Onde:

- F_{9B} : valor do frete “9 Base”, em unidades monetárias
- $Morf_b$: valor da morfologia base, igual a 1
- D_{vl} : distância até o ponto de entrega (concessionária) que corresponde ao veículo $vl \in V_j$ mais afastado da origem (centro de consolidação) a ser visitado pelo caminhão cegonha j

A lógica desse cálculo considera que o frete referente às 9 unidades de morfologia de valor igual a 1 sendo entregues à localidade mais distante traria uma remuneração média correspondente a utilização de 80% do ativo ao longo de toda a viagem ($9/11 = 0,8$). Segundo as regras de mercado, o valor do frete Ft devido em cada viagem é sempre o maior valor entre o frete carreteiro e o frete “9 Base”, ou seja:

$$Ft = \max(F_c, F_{9b}) \quad (3)$$

Para exemplificar o cálculo do valor do frete pago tome como exemplo uma viagem contendo 10 veículos de morfologia igual a 1,0, sendo 5 deles com destino a cada uma das cidades de São Carlos e Araraquara e 1 veículo de morfologia igual a 2,0 com destino a cidade de São José do Rio Preto, cidades respectivamente assinaladas com as letras A, B e C na Figura 3.11.

Figura 3.11– Mapa da região noroeste do Estado de São Paulo

Fonte: Adaptado de Google Maps. Disponível em: <https://goo.gl/qTVgRA>. Acessado em 30 abril 2015.

Sabendo-se que o valor unitário do frete é fixo por quilômetro de distância entre o centro de consolidação e a concessionária de destino, atribuiu-se a f o valor de R\$1,00 para fins de simplificação nas comparações dos resultados.

A Tabela 3.6 apresenta o cálculo do valor do frete carreteiro para o envio das 11 unidades acima mencionadas e a Tabela 3.7 apresenta o cálculo do valor do frete “9 Base”.

Tabela 3.6– Exemplo de cálculo do frete carreteiro

Destino	Distância (Km)	Morfologia do Veículo	Unidades	Frete (R\$)
São Carlos	266	1	5	1.330,00
Araraquara	329	1	5	1.645,00
São José do Rio Preto	465	2	1	930,00
Valor frete “Carreteiro”				3.905,00

Fonte: próprio autor

Tabela 3.7– Exemplo de cálculo do frete “9 Base”

Destino	Distância (Km)	Morfologia do Veículo	Unidades	Frete (R\$)
São Carlos	266			
Araraquara	329			
São José do Rio Preto	465	1	9	4.185,00
Valor do frete “9 Base”				4.185,00

Fonte: próprio autor

Pelos cálculos, é possível notar que a distância até São José do Rio Preto faça com que a dispersão das localidades de entregas seja grande o suficiente para tornar o valor do frete mínimo, o frete “9 Base” (R\$4.185,00), maior que o frete carreteiro (R\$3.905,00) e, logo, o valor devido pela empresa de transporte ao dono do respectivo caminhão cegonha.

Além de formar cargas factíveis e alocar os veículos até a data limite estabelecida, outro objetivo do processo de formação de cargas é evitar a incidência do frete “9 Base”, mais oneroso que o frete carreteiro.

3.6 Processo de formação de carga

Por formação de carga entende-se a seleção, dentre todos os veículos zero-quilômetro disponíveis no centro de consolidação da transportadora, de um grupo de unidades que deverão ser carregadas e transportadas num mesmo caminhão cegonha.

Atualmente, na empresa transportadora tomada como referência para este trabalho, a formação das cargas é feita manualmente e sem o auxílio de nenhum sistema informatizado, cujo objetivo seja a redução no valor do frete pago aos donos dos caminhões cegonha ou qualquer outra medida de desempenho.

Depois de terminada a digitação das informações das notas fiscais no sistema informatizado da transportadora, elas são enviadas ao departamento responsável pela formação das cargas, onde são manualmente agrupadas (empilhadas) de acordo com as “linhas de distribuição” das concessionárias de destino dos veículos, independentemente de sua marca ou modelo.

O funcionário adiciona a cada grupo de notas fiscais aquelas pertencentes aos veículos, das respectivas linhas de distribuição, que foram recebidos nos dias anteriores e ainda não foram alocados.

Os grupos de notas fiscais são então ordenados de forma crescente de data de entrega programada. Tal ordenação representa a priorização dos veículos com menor prazo até sua obrigatoriedade de embarque.

A seguir, o funcionário seleciona uma das pilhas de notas fiscais, correspondente a uma linha de distribuição e inicia o processo de formação de uma carga alocando o veículo da primeira nota fiscal a um caminhão cegonha disponível. Tal carga pertence à linha de distribuição que contenha o respectivo destino e somente veículos com destino às concessionárias pertencentes a essa mesma linha de distribuição poderão nela ser alocados.

Na sequência, o funcionário lê o destino informado na próxima nota fiscal e decide se deve iniciar uma nova carga, sem que a primeira esteja totalmente formada ou se deve adicionar tal veículo à carga em formação.

Pode haver a necessidade de se iniciar uma nova carga caso, por exemplo, quando,

- a adição daquele veículo geraria uma carga cuja soma dos valores de morfologia dos veículos alocados fosse maior que o máximo valor de morfologias permitido por carga;
- a adição daquele veículo geraria uma carga cuja contagem de morfologias daquele tipo fosse maior que o número máximo de veículos permitidos daquela morfologia por carga.

O funcionário da transportadora repete o procedimento até que todas as possíveis alocações de veículos tenham sido feitas e de forma que todas as restrições operacionais tenham sido obedecidas.

Por ser feito de forma subjetiva, o processo de formação de cargas, tal como hoje se apresenta, não garante as melhores combinações de veículos a serem carregados nos caminhões cegonha, para serem entregues às suas respectivas concessionárias, tal que essas formações resultem no menor valor de frete total pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha. O processo não garante tal desempenho pois apresenta muitas variáveis para serem consideradas paralelamente no processo de decisão de alocação feito por um ser humano.

3.7 Considerações finais do capítulo

Pelas características do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil apresentadas neste capítulo, tem-se um típico problema de otimização combinatória de difícil resolução.

Para minimizar o valor do frete total pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha pelo serviço de transporte dos veículos até suas respectivas concessionárias é preciso formar combinações ideais, selecionando, dentre todas as unidades disponíveis para embarque, num período de planejamento predefinido, conjuntos que sejam factíveis e que atendam a todas as restrições operacionais existentes.

As dificuldades de resolução presente nos problemas tratados pelos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, os quais reconhecem o problema da formação de cargas de veículos zero-quilômetro como um problema combinatório do tipo NP-Difícil (TADEI et al., 2002, Dell'Amico et al. 2011, Dell'Amico et al. 2015 e Cordeau et al., 2015), também estão presentes no caso brasileiro.

No problema tratado nesta tese as restrições de carregamento são mais restritivas e com maior espaço de busca, pois cada alocação impacta na decisão de alocação de todas as outras posições de carregamento do caminhão cegonha, e não só na decisão de alocação da posição vizinha.

Nos problemas apresentados na revisão bibliográfica os caminhões são formados por quatro plataformas independentes, com capacidade para a alocação de 2 ou 3 veículos, sem restrição de agrupamento. Essas características simplificam um problema combinatório de agrupamento de 11 elementos para um de apenas 2 ou 3.

Pelas características da cobrança do frete no Brasil, não se pode subdividir o problema em um de formação de rotas e outro de formação de cargas, uma vez que as distâncias ponto-a-ponto são consideradas de forma concomitante às morfologias para o cálculo do valor do frete a ser pago.

Ainda, o fato de existir um valor de frete mínimo, calculado para cada carga formada, dificulta o processo de seleção dos veículos a serem atribuídos a cada caminhão cegonha.

Finalmente, pelo fato dos valores de frete dos veículos a transportados, que compõem a função objetivo a ser minimizada, serem calculados utilizando as distâncias ponto-

a-ponto, desde o centro de consolidação de carga até sua respectiva concessionária de destino, independentemente da rota a ser percorrida pelo caminhão cegonha para chegar até àquela concessionária, não se aplica na resolução do problema aqui tratado o sequenciamento das entregas, que caracteriza um problema de roteirização da literatura..

Se vários autores como, por exemplo, Tadei et al. (2002), Dell'Amico et al. (2011, 2015) e Cordeau et al. (2015) já classificavam os problemas por eles tratados como sendo NP-Difícil, o caso brasileiro, com maior dificuldade de resolução também o é.

No capítulo 4 é apresentado um método de solução exato, que pode ser aplicado a pequenas instâncias reais do problema, uma vez que considera todas as características e peculiaridades da operação de distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil.

Capítulo 4

MODELO MATEMÁTICO

O problema da formação de cargas e roteirização de veículos zero-quilômetro presente nas operações diárias de uma transportadora de veículos é um do tipo de análise combinatória de difícil resolução (TADEI, 2002, DELL'AMICO ET AL, 2011, 2015, CORDEAU ET AL, 2015). Conforme visto anteriormente no capítulo 2, existem na literatura disponível propostas de solução com diferentes objetivos como, por exemplo, a minimização do número de remontes e a minimização do comprimento total das rotas.

Nesta tese é tratado o caso particular do problema no Brasil, com o objetivo de obter as melhores combinações de veículos a serem carregados nos caminhões cegonha, para serem entregues às suas respectivas concessionárias, em um horizonte de planejamento preestabelecido, tal que essas formações resultem no menor valor de frete total pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha, autônomos que são contratados pelas mesmas para a realização deste transporte.

Pela detalhada caracterização do problema apresentada no capítulo 3 e sumariamente acima descrita, pode-se notar que o problema no Brasil é de maior complexidade de resolução que aqueles tratados na literatura disponível. Para a resolução desse problema, o primeiro método proposto é um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

A premissa admitida é que o modelo exato deve ser, no mínimo, capaz de apresentar resultados de solução ótima, em tempo computacional aceitável, para instâncias de pequeno porte. Considera-se essa premissa uma vez que, como demonstrado por Tadei et al. (2002), esse problema é NP-Difícil, o que invariavelmente torna o tempo

computacional requerido para a obtenção de uma solução ótima, para instâncias de grande porte, um fator impeditivo.

As soluções ótimas para essas instâncias de pequeno porte resolvidas pelo modelo matemático, isto é, os conjuntos de automóveis atribuídos para cada caminhão cegonha, poderão ser utilizados como elementos de validação do método heurístico apresentado mais adiante nesta tese.

As similaridades entre os problemas de empacotamento (*bin-packing problem* - BPP), e o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil fez com o modelo matemático proposto nesta tese fosse inspirado em algumas resoluções de problemas desse tipo como, por exemplo, aquelas apresentadas por Dawande et al. (2001) e Baldi et al. (2012).

Nos problemas do tipo de empacotamento, o objetivo é atribuir todos os itens a serem alocados ao menor número possível de caixas. O BPP pode ser descrito da seguinte forma: dado $j = 1, \dots, n$ objetos ou itens com seus respectivos pesos w_j , e $i = 1, \dots, m$ pacotes com idênticas capacidades finitas iguais a c , determinar a alocação (ou designação) dos n itens aos m pacotes, de tal modo que a quantidade de pacotes utilizada seja mínima e suas restrições de capacidade sejam obedecidas. Assume-se, sem perda de generalidade, que $w_n \leq c_m$ e que o número m de pacotes seja suficientemente elevado a fim de assegurar a viabilidade do problema (BALDI et al., 2012).

Uma variante do BPP acontece quando dentre os n itens a serem carregados, um subgrupo é composto por itens obrigatórios e outro subgrupo por itens de carregamento opcional no dia da alocação, como tratado por Baldi et al. (2012). Nesse caso o objetivo é selecionar itens não compulsórios, para serem carregados junto com aqueles compulsórios, nos pacotes selecionados para utilização, de forma a minimizar os custos de envio. Baldi et al. (2012) foram os primeiros autores a considerar a existência de um subgrupo com urgência de alocação na solução desse tipo de problema.

Outra variação na formulação do BPP acontece quando existem interferências entre itens carregados num mesmo pacote, as quais geram restrições em relação aos agrupamentos que podem ser formados. Nessa situação, um determinado atributo dos itens disponíveis para alocação deve ser avaliado para que a restrição de interferência seja obedecida. Dawande et al. (2001) apresentam uma situação na qual não se pode carregar num mesmo pacote mais que um determinado número de unidades de uma mesma cor. A solução determina que sempre que o limite de carga de uma determinada cor for atingido, um novo pacote deve ser iniciado para a alocação do próximo item de mesma característica.

Assim como no BBP, a resolução do problema tratado nesta tese busca minimizar o valor da função objetivo, o qual varia dependendo dos veículos designados a cada agrupamento, isto é, dependendo dos veículos contidos em cada carga.

Na formulação matemática proposta, as restrições de capacidade de carga do caminhão não tratam do peso ou do volume do item a ser alocado, como acontece nos problemas de empacotamento, mas do número de morfologias e da quantidade de veículos que se pode carregar em um caminhão do tipo cegonha.

Uma semelhança existente entre o problema descrito por Baldi et al. (2012) e o apresentado nesta tese, são os itens com diferentes prioridades de embarque. Existem veículos com diferentes datas de recebimentos e diferentes prazos até sua obrigatoriedade de alocação para que possam ser entregues dentro do prazo programado.

Dawande et al. (2001) apresentam uma situação com restrições de formação de grupos, determinada pelo atributo cor. Tal situação é correlata àquela encontrada no problema brasileiro, no qual existem restrições que determinam quantos veículos de cada tipo de morfologia se pode alocar em uma mesma carga e, sendo um veículo de uma determinada morfologia alocado, quantos de cada outro tipo de morfologia podem ser.

Considerando tais características do problema tratado nesta tese e as influências das resoluções dos problemas de empacotamento disponíveis na literatura, o modelo matemático é apresentado a seguir.

4.1 Formulação matemática

Como detalhado anteriormente no capítulo 3, no problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro, as montadoras não são responsáveis pelo transporte das unidades produzidas até suas respectivas concessionárias. Elas entregam tais unidades às empresas especializadas no transporte de veículos, responsáveis por gerenciar os estoques e entregá-los às concessionárias.

Assim, as concessionárias consideradas no problema de distribuição de veículos estão divididas em grupos, denominados linhas de distribuição ld , sendo o conjunto dessas linhas representado por LD .

Cada veículo v pertencente ao conjunto V de veículos zero-quilômetro para serem entregues está disponível para formação de cargas no centro de consolidação da empresa de transporte, e tem como destino uma concessionária ld_v . Portanto, cada veículo $v \in V$ possui um atributo ld_v relativo à sua respectiva concessionária de destino, conforme a definição e caracterização das linhas de distribuição apresentadas no capítulo 3.

Pelo fato de uma concessionária não poder pertencer a mais de uma linha de distribuição, para efeito da modelagem matemática proposta neste capítulo, o problema original pode ser segmentado em subproblemas menores e independentes, um para cada linha de distribuição. Tal partição viabiliza a obtenção de soluções ótimas para o problema proposto, uma vez que reduz o número de veículos a serem alocados e, conseqüentemente, o tempo de processamento computacional do modelo exato.

Durante um dia típico de operação, a empresa responsável pelo transporte dos veículos zero-quilômetro recebe as unidades de diferentes montadoras, disponibilizando-as para embarque e despacho às suas respectivas concessionárias.

A prioridade de carregamento de cada veículo v é inversamente proporcional ao tempo restante (em dias) até sua data limite de carregamento. A data limite de carregamento é determinada pela diferença entre o dia prometido para a entrega da unidade à sua respectiva concessionária e o tempo de viagem necessário desde o centro de consolidação de carga da transportadora até aquele destino. Ou seja, um veículo cuja data limite de entrega seja t e o tempo de transporte seja igual a 3 dias, tem como data limite de embarque o dia $t - 3$.

Assim, seja Dt^v o número máximo de dias que o veículo v pode permanecer no pátio de consolidação até que seja obrigatoriamente alocado, de tal forma a cumprir sua data prometida de entrega, considerando o tempo de percurso do caminhão entre o centro de consolidação de carga da transportadora e a concessionária, segundo as premissas detalhadas na seção 3.3.

Ainda, cada veículo $v \in V$ possui um respectivo valor de morfologia fe^v , utilizado para determinar o valor de frete devido ao dono do caminhão cegonha para o transporte do veículo, conforme esclarecido na expressão (1), apresentada no capítulo 3.

Para simplificação do modelo matemático, as 13 morfologias existentes, atribuídas a cada tipo de veículo, segundo classificação prévia da empresa transportadora, foram agrupadas em quatro categorias equivalentes $[V_p; V_m; V_g; V_{gg}]$ e para cada uma das categorias criadas foi estabelecido um valor numérico de morfologia P , respectivamente (P_p, P_m, P_g, P_{gg}) , conforme indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Agrupamentos de morfologias e respectivos valores.

Categorias	Agrupamentos/Morfologias	fe^v	P
V_p	$p = \{a; b; c; d; e; f\}$	$\{1,00; 1,10; 1,12; 1,19; 1,22; 1,25\}$	$P_p = 1,00$
V_m	$m = \{g; h; i; j; k\}$	$\{1,3; 1,31; 1,32; 1,35; 1,375\}$	$P_m = 1,30$
V_g	$g = \{l\}$	$\{1,57\}$	$P_g = 1,57$
V_{gg}	$gg = \{m\}$	$\{2,0\}$	$P_{gg} = 2,00$

Fonte: próprio autor

Esta simplificação foi admitida para reduzir o número de possíveis combinações de morfologias em um caminhão cegonha, uma vez que testes preliminares indicaram que não há diferença prática em admitir as categorias equivalentes criadas ($V_p; V_m; V_g; V_{gg}$) e seus respectivos valores P em relação às morfologias ($a, b, c, d, \dots, m$) e seus respectivos valores fe^v , no processo de formação de cargas. Vale novamente ressaltar que os valores P de tais agrupamentos não são utilizados no cálculo dos valores de frete total do caminhão cegonha, os quais se utilizam do valor de fe^v .

A Tabela 4.2 apresenta 10 comparações entre as morfologias dos veículos das cargas criadas pela transportadora e as correlatas morfologias utilizando os agrupamentos criados. As comparações foram feitas utilizando formações com 11 veículos para que se pudesse ter certeza que toda a capacidade de carga do caminhão cegonha foi utilizada.

Pelas cargas de número 1a e 1b, apresentadas na referida tabela, pode-se verificar que veículos de morfologia b e f, mesmo sendo de diferentes tamanhos, para efeitos de formação de agrupamentos factíveis, consomem a mesma capacidade de carga do caminhão cegonha. Tal conclusão advém do fato das cargas complementares dos dois caminhões cegonha serem idênticas.

Tabela 4.2– Comparativo de agrupamento utilizando classes de morfologia real e equivalente

Carga	Veículos na Carga	Agrupamento Transportadora	Agrupamento por Categorias
1a	11	10a1b	11p
1b	11	10a1f	11p
2a	11	6a5g	6p5m
2b	11	6a5h	6p5m
3a	11	7a2b2k	9p2m
3b	11	7a2f2g	9p2m
4a	11	7a4b	11p
4b	11	7a4f	11p
5a	11	8a1g1h1l	8p2m1g
5b	11	8a2g1l	8p2m1g

Fonte: próprio autor

Utilizando-se da mesma análise feita para as cargas 1a e 1b, comparando as cargas de número 5a e 5b na referida tabela, pode-se verificar que veículos de morfologia g e h também consomem igual capacidade de carga quando carregados no caminhão cegonha. Situação correlata acontece nos outros pares de carga considerados.

Analisando os exemplos contidos na Tabela 4.2, pode-se notar que para fins de composição de carga, dois caminhões carregados com veículos de diferentes tamanhos, entretanto, pertencentes a um mesmo agrupamento criado, passam a ter iguais composições de morfologia equivalente. Note que as cargas 4a e 4b, formadas por veículos de diferentes morfologias, respectivamente do tipo a e b e do tipo a e f , passam a ter o mesmo conjunto de morfologias equivalentes igual a 11p.

Tal simplificação reduz o tempo computacional necessário para a conferência da factibilidade dos agrupamentos feitos pelo modelo matemático durante o processo de formação de cargas.

Cabe ressaltar que o valor P é utilizado apenas no processo de formação de cargas do modelo matemático, sendo que o valor real de morfologia do veículo (fe^v) é utilizado no cálculo do valor de frete total do caminhão cegonha.

No modelo matemático proposto, que é apresentado mais adiantes neste capítulo, as seguintes notações são utilizadas:

v	: veículo disponível para alocação
j	: caminhão cegonha disponível para carregamento
F_c^j	: valor do frete carreteiro do caminhão j , em unidades monetárias
f	: valor monetário do frete por quilômetro
fe^v	: valor da morfologia do veículo v
D^v	: distância entre o centro de consolidação e o destino do veículo
F_{9b}^j	: valor do frete “9 Base” do caminhão j , em unidades monetárias
$Morf_b$	: valor da morfologia base, igual a 1
$Dmax_j$	: distância até o ponto de entrega (concessionária) mais afastado da origem (centro de consolidação) a ser visitado por j

Ft	: valor do frete pago pela transportadora
LD	: conjunto das linhas de distribuição $LD = (1, \dots, ld, \dots)$
ld	: linha de distribuição específica
ld_v	: linha de distribuição a qual o veículo v pertence
V^t	: conjunto de veículos v disponíveis para alocação, $v \in V^t \forall 0 \leq Dt^v \leq (t - 1)$ para todo $t = \{t, \dots, T\}$.
Dt^v	: número máximo de dias que o veículo v pode permanecer no pátio de consolidação até que seja obrigatoriamente alocado
$ V^t $	: tamanho do conjunto de veículos v disponíveis para alocação, $v \in V^t \forall 0 \leq Dt^v \leq (t - 1)$ para todo $t = \{t, \dots, T\}$.
$V_{P_v}^t$	: conjunto de veículos v da categoria equivalente de morfologia $P_v = \{P_p; P_m; P_g; P_{gg}\}$, disponíveis para alocação no período $t \forall v \in V^t; 0 \leq Dt^v \leq (t - 1)$ para todo $t = \{t, \dots, T\}$.
$ V_{P_v}^t $	: tamanho do conjunto de veículos v da categoria equivalente de morfologia $P_v = \{P_p; P_m; P_g; P_{gg}\}$, disponíveis para carregamento no período t
p^v	: valor da morfologia equivalente de $\{P_p; P_m; P_g; P_{gg}\}$ respectivamente $\{1,0; 1,30; 1,57; 2,00\}$
T	: horizonte de planejamento
J^t	: conjunto de caminhões cegonha j disponíveis para alocação em t
$ J^t $	: tamanho do conjunto de caminhões cegonha disponíveis para alocação em t
$R_{P_v}^t$	Número de veículos de cada categoria de morfologia equivalente que deve ser desobrigado de alocação em t respectivamente R_m^t, R_g^t e R_{gg}^t .
$MorfMax$	: maior valor de morfologia de um veículo pertencente a V^t
M^t	: valor total das morfologias dos veículos disponíveis para alocação em t
$RMorf^t$	: quantidade de veículos que devem ser desobrigados de alocação em t até que $M^t \leq 13,28 \cdot J^t $.
τ	:parâmetro auxiliar de somatória dos valores das variáveis de decisão para cada veículo em cada dia do horizonte de planejamento

4.1.1 Conjuntos de veículos com alocação obrigatória

Seja V^t é o conjunto de veículos disponíveis para alocação com data limite de embarque entre o dia da alocação e o dia t , ou seja, $v \in V^t \forall 0 \leq Dt^v \leq (t - 1)$ para todo $t = \{1, \dots, T\}$. A subtração de uma unidade do limite superior do prazo para alocação é necessária pois a alocação tem início no dia 1 e o veículo com obrigatoriedade de entrega neste dia t têm Dt^v igual a 0.

Assim, suponha-se por exemplo, que estejam disponíveis, no dia da alocação, 11 veículos com $Dt^v = 0$, 6 veículos com $Dt^v = 1$ e 5 veículos com $Dt^v = 2$, nesse exemplo $V^1 = 11$, $V^2 = 17$ e $V^3 = 22$.

Para o agrupamento de morfologia P_p o conjunto de veículos a serem alocados no dia t (V_p^t) contém todos os veículos de V^t cuja morfologia equivalente é igual a 1,00, ou seja, V_p^t contém $v \in V^t$ tal que $P_v = 1,00$ para todo $t = \{1, \dots, T\}$. O mesmo procedimento é executado para os agrupamentos P_m , P_g e P_{gg} .

4.1.2 Cálculo da frota disponível

A quantidade de caminhões cegonha necessária em cada dia de alocação depende do número de veículos disponíveis para embarque (V)

O número de caminhões cegonha, dado pela cardinalidade $|J^t|$ do conjunto J^t , representa um limitante superior da quantidade necessária para a operação, uma vez que o agrupamento de 9 veículos é a quantidade mínima necessária para garantir a formação de uma carga com frete do tipo carreteiro.

A cardinalidade do conjunto de caminhões cegonha corresponde à quantidade de veículos cujas datas limite de embarque estão contidas no intervalo $0 \leq Dt^v \leq (t - 1)$, ou seja, a cardinalidade dos conjuntos V^t para cada dia t do horizonte de planejamento, conforme a expressão (4).

$$|J^t| = \left\lfloor \frac{|V^t|}{9} \right\rfloor \quad \forall t = \{1, \dots, T\} \quad (4)$$

Todos os caminhões $j \in J^t$ podem ser considerados homogêneos em termos de capacidade, desempenho e valor do frete unitário por quilômetro percorrido.

4.1.3 Ajuste da quantidade de veículos com alocação obrigatória

Uma vez definido o número de veículos disponíveis para alocação é preciso definir o número de veículos obrigatórios para embarque.

Primeiramente, para que sejam geradas soluções viáveis para o problema abordado, é necessário determinar o número de veículos, por agrupamento de morfologias (V_p, V_m, V_g e V_{gg}), disponíveis para carregamento no dia da alocação.

Em seguida, é necessário calcular a quantidade de veículos de cada categoria de morfologia que devem ser removidos do conjunto de veículos de alocação obrigatória, para que se tenha um grupo cujas combinações resultem em cargas factíveis.

Para um determinado dia de alocação, os veículos das categorias de morfologia ($V_m^t; V_g^t; V_{gg}^t$) que deverão permanecer no centro de consolidação devido à impossibilidade de combinações para a formação de uma carga factível, são chamados de remanescentes e representados, respectivamente, por R_m^t, R_g^t e R_{gg}^t .

Essas reduções em V^t não determinam qual veículo deve ou não ser alocado, mas, determinam a quantidade de veículos de cada categoria de morfologia que obrigatoriamente devem ser alocados no horizonte de planejamento.

As formulações matemáticas para o cálculo de R_m^t, R_g^t e R_{gg}^t encontram-se nas expressões (5) a (7), respectivamente, onde $\lfloor x \rfloor$ representa a função piso, que retorna a parte inteira (ou valor inteiro) de x .

$$R_m^t = \left\lfloor 8 \cdot \left(\frac{|V_m^t|}{8 \cdot |J^t|} - \left\lfloor \frac{|V_m^t|}{8 \cdot |J^t|} \right\rfloor \right) \right\rfloor \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$R_g^t = \left\lfloor 6 \cdot \left(\frac{|V_g^t|}{6 \cdot |J^t|} - \left\lfloor \frac{|V_g^t|}{6 \cdot |J^t|} \right\rfloor \right) \right\rfloor \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$R_{gg}^t = \text{Max}\{0; |V_{gg}^t| - |J^t|\} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

Os cálculos apresentados nas expressões (5), (6) e (7) acima advêm de restrições operacionais, as quais determinam um número máximo de cada tipo de veículo em cada carga formada. Estas restrições estabelecem que o número de veículos da categoria V_{gg} que podem ser selecionados para V^t , seja no máximo igual a 1 por caminhão cegonha da frota utilizada.

No que tange às categorias de morfologia V_m e V_g as restrições estabelecem que esse limite seja igual a 8 e 6 unidades, respectivamente. Outra restrição operacional determina que, no mínimo, 8 veículos devem ser alocados em cada carga formada. As restrições operacionais aqui mencionadas serão algebricamente apresentadas mais adiante neste capítulo.

Para entender o impacto dessas restrições no cálculo do número de veículos a serem alocados, considere uma situação hipotética com 23 veículos disponíveis para alocação no primeiro dia do horizonte de planejamento ($t = 1$), todos eles com $Dt^v = 0$ e sendo 14 deles da categoria V_g . Neste caso $|V^1| = 23$, $|V_g^1| = 14$ e o número máximo de caminhões J^1 necessário é $\left\lfloor \frac{|V^1|}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{23}{9} \right\rfloor = 2$, de tal forma que não há veículos suficientes para a formação de 3 cargas, uma vez que 3 vezes o número mínimo de 8 veículos na carga é maior que o número de veículos a serem alocados.

Sabendo-se que no máximo 6 veículos da categoria V_g de morfologia podem ser alocados em uma carga, seria possível alocar, no máximo, 12 veículos dessa

morfologia, dado que $J^1 = 2$. Logo, neste cenário, 2 veículos de morfologia V_g não poderiam ser alocados, resultando em número de veículos remanescentes $R_g^1 = 2$.

No processo de formação de cargas, também existe a possibilidade do grupo de veículos V^t disponíveis para embarque conter uma combinação de morfologias impossível de ser carregada como, por exemplo, quando existirem 10 veículos da categoria V_m de morfologia e 2 veículos da categoria V_{gg} .

Sabendo-se que o número máximo de veículos V_{gg} que se pode alocar em uma carga é 1 e que as cargas formadas devem conter no mínimo 8 veículos, não seria possível formar duas cargas, logo só existe a possibilidade de embarque de um veículo da categoria V_{gg} de morfologia.

Finalmente, existe uma condição operacional “prática” que estabelece 13,28 como sendo número máximo de morfologias que se pode carregar num caminhão cegonha, também algebricamente apresentada mais adiante. Desse modo, sendo M o valor máximo de morfologias que podem ser carregadas nos caminhões cegonha disponíveis para alocação, considerando sua máxima utilização, tem-se que $M^t = 13,28 \cdot |J^t|$.

A condição operacional “prática” que estabelece 13,28 como sendo número máximo de morfologias que se pode carregar num caminhão cegonha foi constatada pela análise de 19.145 cargas formadas para a entrega de 164.419 veículos, dentre as quais o valor máximo de morfologia encontrado foi de 13,28.

Para remover a quantidade de veículos que resultam no excesso de soma de morfologias, uma sub-rotina identifica o veículo de maior valor de morfologia (*MorfMax*) pertencente a V^t e o retira do conjunto de V^t , repetindo tal procedimento até que $M^t \leq 13,28 \cdot |J^t|$, tal procedimento é descrito nas linhas 5 a 15 do pseudocódigo apresentado na Figura 4.1. A quantidade de veículos a serem removidos de V^t , os quais são desobrigados da alocação, resultam no parâmetro $RMorf^t$.

Algoritmo de determinação dos veículos remanescentes por morfologia	
1	Para todo $t \in T$ faça
2	$M^t = \sum_{v \in V^t} P^v \quad \forall 0 \leq Dt^v \leq (t-1)$ e $P^v = (P_p^v, P_m^v, P_g^v, P_{gg}^v)$
3	ConjuntoMaiorMorf = $\emptyset$
4	RMorf ^t = 0
5	Enquanto $M^t - P_m^v \cdot R_m^t - P_g^v \cdot R_g^t - P_{gg}^v \cdot R_{gg}^t > 13,28 \cdot J^t $
6	MorfMax = 0, 0
7	Para todo $v \in V^t$
8	Se $P^v > \text{MorfMax}$ então
9	MorfMax = P^v
10	Fim Se
11	Fim Para
12	ConjuntoMaiorMorf = ConjuntoMaiorMorf $\cup v$
13	RMorf ^t = RMorf ^t + 1
14	$M^t = M^t - \text{MorfMax}$
15	Fim Enquanto
16	

Figura 4.1– Pseudocódigo do algoritmo remanescentes por morfologia

Fonte: próprio autor

Exemplificando, caso V^t seja composto por 8 veículos da categoria de morfologia V_m^t , 2 veículos da categoria V_g^t e uma única carga com 10 veículos seja formada, o valor total da morfologia da carga é 13,54 ($8 \cdot 1,30 + 2 \cdot 1,57$), acima do limite factível de 13,28. Nessa situação um veículo de V_g^t deve ser retirado da carga, determinando a quantidade de veículos $RMorf^t$ que não será alocada.

Pode haver situações nas quais existem duas possibilidades de redução no número de veículos no grupo V^t para que $M^t \leq 13,28 \cdot |J^t|$. Tome como exemplo uma situação hipotética tal que V^t contenha 14 unidades de morfologia a serem alocadas, existindo em V^t um veículo V_{gg} ($P_{gg}^v = 2,00$) e ao menos dois veículos V_p ($P_p^v = 1,00$).

Como a estratégia é identificar e retirar o veículo de maior morfologia do conjunto V^t , neste caso apenas o veículo V_{gg} seria remanescente. Isto implica que ao retirar o menor número possível de veículos do grupo a ser alocado, reduz-se a quantidade de veículos com possibilidades de serem entregues com atraso.

Caso o modelo obrigasse todos os veículos disponíveis a serem carregados, aconteceriam situações em que não seria possível encontrar uma solução factível.

4.1.4 Alocação dos veículos

O modelo matemático para o problema da formação de cargas para o transporte de veículos zero-quilômetro é composto pelas expressões (5) a (25) cujas variáveis de decisão são:

$$x_{vj}^t = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } v \in V \text{ é alocado ao caminhão } j \in J^t, \text{ no dia } t \in T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_j^t = \begin{cases} 1, & \text{se o caminhão } j \in J^t \text{ é utilizado no dia } t \in T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A função objetivo do modelo matemático é dada pela expressão (12)

Minimizar

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} F t_j \cdot y_{jt} \quad (8)$$

Além das restrições apresentadas anteriormente nas expressões (5) a (7), reproduzidas a seguir, a função objetivo também está sujeita às restrições (9) a (23), apresentadas na sequência.

$$R_m^t = \left\lceil 8 \cdot \left(\frac{|V_m^t|}{8 \cdot |J^t|} - \left\lfloor \frac{|V_m^t|}{8 \cdot |J^t|} \right\rfloor \right) \right\rceil \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$R_g^t = \left\lceil 6 \cdot \left(\frac{|V_g^t|}{6 \cdot |J^t|} - \left\lfloor \frac{|V_g^t|}{6 \cdot |J^t|} \right\rfloor \right) \right\rceil \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$R_{gg}^t = \text{Max}\{0; |V_{gg}^t| - |J^t|\} \forall t \in T \quad (7)$$

$$Ft_j \geq \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V} f \cdot P^v \cdot D^v \cdot x_{vj}^t \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$Ft_j \geq \sum_{t=1}^T 9 \cdot f \cdot D^v \cdot x_{vj}^t \quad \forall v \in V; j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J^t} \sum_{v \in V^t} x_{vj}^t \geq \text{Min}\{11 \cdot y_{jt}; |V^t| - R_m^t - R_g^t - R_{gg}^t - RMorf^t\} \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j \in J} x_{vj}^t \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V^t \setminus V_{gg}^t} x_{vj}^t \leq 11 - 2 \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_{gg}^t} x_{vj}^t \quad \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_{gg}^t} x_{vj}^t \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_m^t} x_{vj}^t \leq 8 \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_g^t} x_{vj}^t \leq 6 \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_p^t} x_{vj}^t + P_m^v \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_m^t} x_{vj}^t + P_g^v \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_g^t} x_{vj}^t \quad (17)$$

$$+ P_{gg}^v \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_{gg}^t} x_{vj}^t \leq 13,28 \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V^t} x_{vj}^t \geq \sum_{t=1}^T 8 \cdot y_{jt} \quad \forall j \in J \quad (18)$$

$$x_{vj}^t \leq y_{jt} \quad \forall j \in J; v \in V; \forall t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{jt} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (20)$$

$$y_{jt} \leq y_{j,t-1} \quad \forall j \in J; t \in T \quad (21)$$

$$x_{vj}^t \in \{0,1\} \quad \forall j \in J; t \in T; v \in V \quad (22)$$

$$y_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J; t \in T; v \in V \quad (23)$$

A expressão (8) corresponde a função objetivo do problema, que minimiza o valor de frete total dos caminhões efetivamente utilizados no horizonte de planejamento.

Já a expressão (9) estabelece que o valor do frete das cargas formadas deve ser maior ou igual ao valor encontrado utilizando-se da regra de cálculo do valor do frete carreteiro.

Analogamente, a expressão (10) determina que o valor do frete das cargas formadas deve ser maior ou igual ao valor do frete “9 Base” de um caminhão. Atuando de forma concomitante, as expressões (9) e (10) representam a existência de um frete de valor mínimo, o frete “9 Base”.

O frete unitário f é um valor monetário que representa o valor do frete a ser pago ao dono do caminhão cegonha para transportar uma unidade de morfologia por um quilômetro de distância. Dessa forma, Ft_j corresponde ao valor do frete total do transporte dos veículos alocados em $j \in J$, o valor do frete da carga formada.

A expressão (11) garante que o número máximo de veículos disponíveis em $t \in T$ serão alocados. Esta equação é necessária para impor uma alocação mínima de veículos obrigatórios, dado que o modelo sempre busca a solução de menor valor de frete total, ou seja, a menor quantidade possível de veículos alocados. Naquela expressão, o valor de τ é utilizado como parâmetro auxiliar de somatória dos valores das variáveis de decisão para cada veículo em cada dia do horizonte de planejamento considerado para o cálculo dos veículos disponíveis para alocação.

Para ilustrar as restrições impostas pela expressão (11), suponha que no dia de alocação ($t = 1$) existam 27 veículos disponíveis, tal que os 12 primeiros veículos têm zero dias até sua obrigatoriedade de embarque ($Dt^v = 0$), ou seja, devem ser alocados no dia 1 ($t = 1$), os 7 subsequentes têm 1 dia até tal obrigatoriedade ($Dt^v = 1$), ou seja, devem ser alocados no dia 2 ($t = 2$), e os 8 últimos têm 2 dias até sua obrigatoriedade ($Dt^v = 2$), ou seja, devem ser alocados no dia 3 ($t = 3$).

Os subconjuntos de veículos a serem alocados são:

$$V^1 = \{v_1, v_2, \dots, v_{11}, v_{12}\}$$

$$V^2 = \{v_1, v_2, \dots, v_{18}, v_{19}\}$$

$$V^3 = \{v_1, v_2, \dots, v_{26}, v_{27}\}$$

O número de caminhões disponibilizados é calculado em função do número total de veículos disponíveis entre o dia de alocação ($t = 1$) e o dia do horizonte de planejamento ($T = \{1,2,3\}$) conforme a expressão (4), tal que:

$$J^1 = \left\lfloor \frac{|V^1|}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{12}{9} \right\rfloor = [1,33] = 1$$

$$J^2 = \left\lfloor \frac{|V^2|}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{19}{9} \right\rfloor = [2,11] = 2$$

$$J^3 = \left\lfloor \frac{|V^3|}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{27}{9} \right\rfloor = [3,00] = 3$$

Para determinar a quantidade mínima de veículos alocados, a restrição (11) é definida de modo a viabilizar a formação de caminhões mediante as regras operacionais da empresa, seja por quantidade máxima de 11 veículos no caminhão ou de quantidade máxima de veículos em função das respectivas morfologias por caminhão (1 veículo de morfologia V_{gg} , 6 veículos de morfologia V_g , ou 8 veículos de morfologia V_m), conforme ilustrado na Figura 4.2 para o exemplo abordado.

A Figura 4.2 representa o conjunto de variáveis de decisão para o período entre o dia de alocação e o dia t , para o exemplo de $V^1 = 12$, $V^2 = 7$ e $V^3 = 8$, apresentado anteriormente, considerando um horizonte de planejamento igual a 3 dias.

No exemplo apresentado acima, na data de alocação, seis caminhões cegonha foram disponibilizados, sendo 1 para o conjunto V^1 - o caminhão cegonha de número 1-, 2 para o conjunto V^2 - os caminhões cegonha de números 2 e 3 -, e 3 para o conjunto V^3 - os caminhões cegonha de números 4, 5 e 6.

Como apresentado na Figura 4.2, um caminhão deve ser formado com veículos cujo $Dt^v = 0$, que estão relacionados às variáveis de decisão x_{vj}^t para $t = 1$, para todos os veículos $v \in V^1$ e para caminhões j em quantidade $J^1 = 1$.

Analogamente, devem ser formadas cargas para dois caminhões com veículos cujo $Dt^v = \{0,1\}$, relativos às variáveis de decisão x_{vj}^t para $t = \{1,2\}$, considerando os veículos $v \in V^2$ e caminhões j em quantidade $J^2 = 2$.

$\tau = \{1,2,3\}$				
x_{11}^1 x_{21}^1 x_{31}^1 x_{41}^1 x_{51}^1 x_{61}^1 x_{71}^1 x_{81}^1 x_{91}^1 $x_{10\ 1}^1$ $x_{11\ 1}^1$ $x_{12\ 1}^1$	$J^1 = 1 = \{1\}$ (caminhão de número 1)			$\tau = 1$
$x_{11}^1; x_{12}^2; x_{13}^2$ $x_{21}^1; x_{22}^2; x_{23}^2$ $x_{31}^1; x_{32}^2; x_{33}^2$ $x_{41}^1; x_{42}^2; x_{43}^2$ $x_{51}^1; x_{52}^2; x_{53}^2$ $x_{61}^1; x_{62}^2; x_{63}^2$ $x_{71}^1; x_{72}^2; x_{73}^2$ $x_{81}^1; x_{82}^2; x_{83}^2$ $x_{91}^1; x_{92}^2; x_{93}^2$ $x_{10\ 1}^1; x_{10\ 2}^2; x_{10\ 3}^2$ $x_{11\ 1}^1; x_{11\ 2}^2; x_{11\ 3}^2$ $x_{12\ 1}^1; x_{12\ 2}^2; x_{12\ 3}^2$	$x_{13\ 2}^2; x_{13\ 3}^2$ $x_{14\ 2}^2; x_{14\ 3}^2$ $x_{15\ 2}^2; x_{15\ 3}^2$ $x_{16\ 2}^2; x_{16\ 3}^2$ $x_{17\ 2}^2; x_{17\ 3}^2$ $x_{18\ 2}^2; x_{18\ 3}^2$ $x_{19\ 2}^2; x_{19\ 3}^2$	$J^2 = 2 = \{1,2\}$ (caminhões de números 2 e 3)		$\tau = 2$
$x_{11}^1; x_{12}^2; x_{13}^2; x_{14}^3; x_{15}^3; x_{16}^3$ $x_{21}^1; x_{22}^2; x_{23}^2; x_{24}^3; x_{25}^3; x_{26}^3$ $x_{31}^1; x_{32}^2; x_{33}^2; x_{34}^3; x_{35}^3; x_{36}^3$ $x_{41}^1; x_{42}^2; x_{43}^2; x_{44}^3; x_{45}^3; x_{46}^3$ $x_{51}^1; x_{52}^2; x_{53}^2; x_{54}^3; x_{55}^3; x_{56}^3$ $x_{61}^1; x_{62}^2; x_{63}^2; x_{64}^3; x_{65}^3; x_{66}^3$ $x_{71}^1; x_{72}^2; x_{73}^2; x_{74}^3; x_{75}^3; x_{76}^3$ $x_{81}^1; x_{82}^2; x_{83}^2; x_{84}^3; x_{85}^3; x_{86}^3$ $x_{91}^1; x_{92}^2; x_{93}^2; x_{94}^3; x_{95}^3; x_{96}^3$ $x_{10\ 1}^1; x_{10\ 2}^2; x_{10\ 3}^2; x_{10\ 4}^3; x_{10\ 5}^3; x_{10\ 6}^3$ $x_{11\ 1}^1; x_{11\ 2}^2; x_{11\ 3}^2; x_{11\ 4}^3; x_{11\ 5}^3; x_{11\ 6}^3$ $x_{12\ 1}^1; x_{12\ 2}^2; x_{12\ 3}^2; x_{12\ 4}^3; x_{12\ 5}^3; x_{12\ 6}^3$	$x_{13\ 2}^2; x_{14\ 3}^2; x_{14\ 4}^3; x_{14\ 5}^3; x_{14\ 6}^3$ $x_{14\ 2}^2; x_{14\ 3}^2; x_{14\ 4}^3; x_{14\ 5}^3; x_{14\ 6}^3$ $x_{15\ 2}^2; x_{15\ 3}^2; x_{15\ 4}^3; x_{15\ 5}^3; x_{15\ 6}^3$ $x_{16\ 2}^2; x_{16\ 3}^2; x_{16\ 4}^3; x_{16\ 5}^3; x_{16\ 6}^3$ $x_{17\ 2}^2; x_{17\ 3}^2; x_{17\ 4}^3; x_{17\ 5}^3; x_{17\ 6}^3$ $x_{18\ 2}^2; x_{18\ 3}^2; x_{18\ 4}^3; x_{18\ 5}^3; x_{18\ 6}^3$ $x_{19\ 2}^2; x_{19\ 3}^2; x_{19\ 4}^3; x_{19\ 5}^3; x_{19\ 6}^3$	$x_{20\ 4}^3; x_{20\ 5}^3; x_{20\ 6}^3$ $x_{21\ 4}^3; x_{21\ 5}^3; x_{21\ 6}^3$ $x_{22\ 4}^3; x_{22\ 5}^3; x_{22\ 6}^3$ $x_{23\ 4}^3; x_{23\ 5}^3; x_{23\ 6}^3$ $x_{24\ 4}^3; x_{24\ 5}^3; x_{24\ 6}^3$ $x_{25\ 4}^3; x_{25\ 5}^3; x_{25\ 6}^3$ $x_{26\ 4}^3; x_{26\ 5}^3; x_{26\ 6}^3$ $x_{27\ 4}^3; x_{27\ 5}^3; x_{27\ 6}^3$	$J^3 = 3 = \{1,2,3\}$ (caminhões de números 4, 5 e 6)	$\tau = 3$

Figura 4.2 – Conjunto de variáveis de decisão para o exemplo com $V^1 = 12$, $V^2 = 7$ e $V^3 = 8$ e $T = 3$

Fonte: próprio autor

Nesse caso, tanto os veículos com $Dt^v = 0$ quanto aqueles $Dt^v = 1$ são considerados para alocação nos 2 caminhões, de números 2 e 3, estabelecido por $\tau = \{2\}$ e disponíveis para alocação, enquanto os veículos com $Dt^v = 0$ também estão disponíveis para alocação no caminhão de número 1, estabelecido por $\tau = \{1\}$.

Isso implica que o maior número possível de veículos com $Dt^v = 0$ será alocado em $t = 1$ e aqueles que não puderem ser por restrições de quantidade máxima de veículos ou de combinações de morfologias serão alocados no dia posterior.

As mesmas considerações podem ser estendidas para o período $\tau = \{1,2,3\}$, tal que aqueles veículos com $Dt^v = 0$ que não puderem ser alocados em $t = 1$ ou $t = 2$ e aqueles com $Dt^v = 1$ que não puderem ser alocados em $t = 2$ estarão disponíveis para alocação em $t = 3$.

A expressão (12) estabelece que cada veículo só pode ser alocado em um único caminhão no horizonte de planejamento.

A expressão (13) estabelece um limite máximo de 9 veículos possíveis de serem adicionados em um caminhão cegonha que contenha um veículo da categoria V_{gg} a ele alocado.

Com relação às regras operacionais anteriormente citadas, a expressão (14) estabelece que uma carga contenha apenas um veículo da categoria V_{gg} de morfologia. De forma análoga, a expressão (15) determina que o número máximo de veículos da categoria V_m seja igual a 8 unidades e a expressão (16) restringe o número máximo de veículos da categoria V_g a 6 unidades.

Independentemente do tipo das morfologias alocadas à carga, o valor máximo que se pode carregar é igual a 13,28 morfologias, valor definido pela expressão (17).

Já a expressão (18) define que o número mínimo de veículos a serem alocados em uma carga é 8.

A expressão (19) estabelece que um veículo só pode ser alocado a uma carga se existir um caminhão cegonha disponível e a expressão (20) determina que só existe um caminhão cegonha j sendo utilizado no horizonte de planejamento T considerado.

Já a expressão (21) determina que todos os caminhões sejam sucessivamente formados de acordo com seu índice j em relação à variável y_{jt} e, finalmente, as expressões (22) e (23) indicam o domínio das variáveis de decisão do modelo matemático.

4.2 Pós-processamento

Após a execução do modelo matemático, uma etapa de pós-processamento se faz necessária para que todas as cargas com valor de frete do tipo “9 Base” possam ser desfeitas e os respectivos veículos possam ser devolvidos ao grupo de veículos disponíveis para alocação no dia seguinte.

Nas condições estabelecidas, todas as cargas com frete “9 Base” são destruídas, independentemente da existência de veículos com $Dt_v = 0$ em sua composição. Considerando que o custo da aceitação dos fretes do tipo “9 Base” representa maior penalidade à empresa de transportes que a existência de veículos com atraso na entrega e que tais incidências tendem a ser pequenas, o modelo foi desenvolvido para que apenas cargas com frete do tipo carreteiro fossem aceitas.

O algoritmo apresentado na Figura 4.3 descreve tal procedimento, o qual inicia com o cálculo dos valores do frete carreteiro de todas as cargas formadas, como descrito nas linhas 6 a 10 do pseudocódigo na mencionada figura. Para cada uma das cargas formadas, o algoritmo identifica a maior distância de entrega de um veículo, desde o centro de consolidação de carga até sua respectiva concessionária, o que pode ser verificado na linha 12 do mesmo pseudocódigo.

Algoritmo de destruição de cargas "9Base"

```

1:  Para todo  $j \in J^t$ 
2:
3:     $MaxF_j = 0,0$ 
4:     $Ft_j = 0,0$ 
5:
6:    Para todo  $t \in T$ 
7:      Se  $Y_{jt} = 1,0$  então
8:        Para todo  $v \in V^t$ 
9:          Se  $x_{vj}^t = 1,0$  então
10:            $Ft_j = Ft_j + f \cdot D^v \cdot fe^v \cdot x_{vj}^t$ 
11:           Se  $D^v \cdot x_{vj}^t > MaxF_j$  então
12:              $MaxF_j = D^v \cdot x_{vj}^t$ 
13:           Fim Se
14:         Fim Se
15:       Fim Para
16:
17:       Se  $Ft_j \geq 9 \cdot MaxF_j$  e  $t = 1$  então
18:         Veículos são alocados ao caminhão então despachado em
19:          $t$ 
20:         Para todo  $v \in V^t$ 
21:           Se  $x_{vj}^t = 1,0$  então
22:              $V^t = V^t - v$ 
23:           Fim Se
24:           Se  $Dt^v - 1 > 0$  então
25:              $Dt^v = Dt^v - 1$ 
26:           Fim Se
27:         Fim Para
28:       Fim Se
29:     Fim Para
30:  Fim Para

```

Figura 4.3: Pseudocódigo do algoritmo de destruição de cargas com frete tipo "9 Base"

Fonte: próprio autor

Na linha 17 do pseudocódigo tem-se que apenas as cargas que contiverem veículos com obrigatoriedade de embarque em $t = 1$ são aceitas, todas as outras cargas são destruídas.

A seguir, para cada carga a ser despachada em $t = 1$, uma análise do valor do frete é executada. Caso o valor do frete da carga formada para ser executada no dia 1 seja do tipo carreteiro, a carga é mantida e os veículos a ela alocados são retirados do grupo de veículos disponíveis (linhas 18 a 22 na Figura 4.3). Caso o valor do frete "9 Base" seja maior que o valor do frete carreteiro da carga formada, os veículos a ela alocados retornam ao grupo de veículos disponíveis para alocação e seus respectivos Dt^v s são ajustados, como mostram a linha 23 a 26. O procedimento é repetido para todas as cargas formadas pelo algoritmo.

4.3 Verificação do modelo

Trinta instâncias de teste foram criadas para que se pudesse ter certeza do correto funcionamento do algoritmo proposto para a resolução de problemas com diferentes características, no que diz respeito ao número de veículos a serem alocados; diversidade das categorias de morfologia; diferentes datas de chegada dos veículos no centro de consolidação e diferentes prazos para embarque.

As características de cada uma das 30 instâncias de teste criadas e os resultados das soluções obtidas pelo modelo matemático proposto podem ser encontrados na Tabela 4.3 até a Tabela 4.6. Nas mesmas tabelas estão descritas as funcionalidades do algoritmo que cada instância busca verificar e a associada expressão na formulação matemática, anteriormente apresentada.

Todas as instâncias criadas são de muito pequeno porte, instâncias de teste de funcionalidade, para as quais se conhecem os valores das soluções ótimas a serem encontradas pelo algoritmo proposto.

Tome-se como exemplo a instância de teste de número 1, esta instância busca verificar se a restrição à formação de cargas com menos de 8 veículos está funcionando corretamente, restrição apresentada na expressão (18) do modelo matemático apresentado. Para essa instância o modelo exato não formou nenhuma carga, atestando o correto funcionamento da restrição avaliada. A instância de número 1, com apenas 7 veículos disponíveis para embarque, não contém veículos suficientes para a alocação mínima exigida nos caminhões cegonha.

Outra instância, a de número 5, reproduz uma possível situação real na qual 9 veículos estão disponíveis para embarque, sendo 2 veículos de morfologia da categoria V_p e 7 veículos de morfologia da categoria V_g . Todos os veículos pertencem a uma mesma linha de distribuição e seus destinos de entrega estão a igual distância do centro de consolidação de carga (1.190 km).

Tabela 4.3– Testes de funcionalidade 1 - 10.

Teste	Característica					Tipo de verificação	Resultado	Expressão da PLIM
	Veículos	Morfologias	Chegadas	Embarques	Distâncias			
1	7	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Número mínimo de veículos na carga	Nenhuma carga foi formada	(18)
2	7;1	$V_p; V_{gg}$	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Número mínimo de veículos para formação de frete do tipo carreteiro	Uma carga de frete carreteiro	(9);(10);(18)
3	8	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Número mínimo de veículos para formação de frete do tipo “9 Base”	Uma carga de frete “9 Base”	(9);(10);(18)
4	1;7;1	$V_p; V_g; V_{gg}$	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Número máximo de morfologias do tipo V_g (6) com obrigatoriedade de V_{gg}	Uma carga de frete carreteiro com 8 veículos, deixou 1 veículo V_g	(16);(18)
5	7;2	$V_p; V_g$	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Número máximo de morfologias do tipo V_λ (6) sem obrigatoriedade de V_{gg}	Uma carga de frete carreteiro com 8 veículos, deixou 1 veículo V_g	(16);(18)
6	2;1;6	$V_p; V_m; V_g$	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Número máximo V_m em grupo heterogêneo	Uma carga de frete carreteiro com 9 veículos	(15);(16)
7	2;1;6	$V_p; V_m; V_g$	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Influência da ordem de entrada dos dados no resultado	Uma carga de frete carreteiro com 9 veículos – sem influência	(15);(16)
8	1;7;1	$V_p; V_g; V_{gg}$	Mesmo dia	Imediatos	1 veículo V_p disperso	Número máximo V_m na carga com veículo V_{gg}	Uma carga de frete “9 Base” com 8 veículos, respeitando máximo de V_g	(16)
9	1;6 ;2	$V_p; V_g; V_{gg}$	Mesmo dia	Imediatos	1 veículo V_p disperso	Número máximo de V_{gg} na carga	Uma carga de frete “9 Base” com 8 veículos, respeitando máximo de V_{gg}	(14);(16)
10	4;1;6;1	$V_p; V_m; V_g; V_{gg}$	Mesmo dia	Imediatos	4 veículos V_p dispersos	Número de cargas de frete “9 Base” com veículo de embarque obrigatório, evitando ultrapassar o valor de 13,28 morfologias na carga	Uma carga de frete “9 Base” com 10 veículos, sem carregar 1 veículo V_g e 1 de V_{gg}	(9);(10);(14); (15);(16);(17)

Fonte: próprio autor

Tabela 4.4– Testes de funcionalidade 11 - 18.

Teste	Característica					Tipo de verificação	Resultado	Expressão da PLIM
	Veículos	Morfologias	Chegadas	Embarques	Distâncias			
11	4;7;1	$V_p; V_g; V_{gg}$	Mesmo dia	Imediatos	4 veículos V_p dispersos	Formação de cargas de frete “9 Base” com veículo de embarque obrigatório, evitando ultrapassar o valor de 13,28 morfologias na carga	Uma carga de frete “9 Base” com 9 veículos, sem carregar 2 veículos V_g e 1 veículo V_m	(9);(10);(13);(14);(15);(16);(17)
12	5;5;1	$V_p; V_g; V_{gg}$	Mesmo dia	Imediatos	4 veículos V_p dispersos	Formação de cargas de frete “9 Base” com veículo de embarque obrigatório, evitando ultrapassar o valor de 13,28 morfologias na carga	Uma carga de frete “9 Base” com 10 veículos, sem carregar 1 veículo V_m	(9);(10);(13);(14);(15);(16);(17)
13	9	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas de frete carreteiro com o mínimo número de veículos V_p	Uma carga de frete carreteiro com 9 veículos V_p	(9);(10);(11)
14	10	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas de frete carreteiro com 10 veículos V_p	Uma carga de frete carreteiro com 10 veículos V_p	(9);(10);(18)
15	11	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas de frete carreteiro com 11 veículos V_p	Uma carga de frete carreteiro com 9 veículos V_p	(9);(10);(18)
16	12	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas respeitando número máximo de veículos	Uma carga de frete carreteiro com 9 veículos V_p	(9);(10);(11);(18)
17	13	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas respeitando número máximo de veículos	Uma carga de frete carreteiro com 9 veículos V_p	(9);(10);(11);(18)
18	14	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas respeitando número máximo de veículos	Uma carga de frete carreteiro com 9 veículos de V_p	(9);(10);(11);(18)

Fonte: próprio autor

Tabela 4.5– Testes de funcionalidade 19 - 26.

Teste	Característica					Tipo de verificação	Resultado	Expressão da PLIM
	Veículos	Morfologias	Chegadas	Embarques	Distâncias			
19	15	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas respeitando número máximo de veículos	Uma carga de frete carreteiro com 11 veículos de morfologia do tipo a, não alocou 4 veículos V_p	(9);(10);(11); (18)
20	15	V_p	Mesmo dia	Imediatos	1 veículo V_p imediato disperso	Formação de cargas respeitando número máximo de veículos evitando carga com frete do tipo “9 Base”	Uma carga de frete carreteiro com 11 veículos de morfologia do tipo V_p , não alocou 4 veículos V_p	(9);(10);(11); (18)
21	16	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas para minimizar custo de transporte só aceitando carreteiro	Uma carga de frete carreteiro com 11 veículos, minimizando o custo	(9);(10) (11); (18)
22	18	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de duas cargas de frete carreteiro sem atingir alocação máxima de 11 veículos	Duas cargas de frete carreteiro com 9 veículos cada	(9);(10);(11); (18)
23	19	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de duas cargas de frete carreteiro sem atingir alocação máxima de 11 veículos	Duas cargas de frete carreteiro sendo uma com 9 e outra com 10 veículos	(9);(10);(11); (18)
24	21	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de duas cargas de frete carreteiro sem atingir alocação máxima de 11 veículos	Duas cargas de frete carreteiro com uma com 10 e outra com 11 veículos	(9);(10);(11); (18)
25	23	V_p	Mesmo dia	Imediatos	Idênticas	Formação de cargas de mínimo custo sendo impossível a alocação de todos os obrigatórios	Duas cargas de frete carreteiro com 11 veículos cada, deixando 1 obrigatório sem alocação	(9);(10);(11); (18)
26	8	V_p	Mesmo dia	Dispersos em T	Idênticas	Formação de cargas com frete “9 Base” para veículos obrigatórios com carga factível utilizando não obrigatórios em T	Uma carga de frete “9 Base” alocando 2 veículos de embarque imediato ($d=0$) e 6 com $Dt_v = 1$ ou $Dt_v = 2$	(9);(10);(11); (18)

Fonte: próprio autor

Tabela 4.6– Testes de funcionalidade 27 - 30.

Teste	Característica					Tipo de verificação	Resultado	Expressão da PLIM
	Veículos	Morfologias	Chegadas	Embarques	Distâncias			
27	8	V_p	Mesmo dia	2 além de T	Idênticas	Formação de cargas com frete “9 Base” para veículos obrigatórios com carga factível utilizando não obrigatórios em além de T	Uma carga de frete “9 Base” alocando 2 veículos de embarque imediato ($d=0$) e 6 com $Dt_v = 1, 2$ ou 8, para $T=3$	(9);(10);(12);(18)
28	11	V_p	Mesmo dia	3 além de T	Idênticas	Formação de cargas com veículos obrigatórios em T, sem utilizar veículos com obrigatoriedade além de T desnecessariamente	Uma carga de frete “9 Base” alocando 8 veículos em T e não alocando veículos além de T	(9);(10);(12);(18)
29	13;2	$V_p; V_{gg}$	Mesmo dia	$2V_\alpha$ (“9 Base”) e V_{gg} obrigatório	2 veículos V_p dispersos	Formação de carga com veículos obrigatórios de morfologia V_p e V_{gg} utilizando o menor número de veículos com obrigatoriedade além de T	Uma carga com frete carreteiro evitando “9 Base” do veículo de morfologia V_p além de T	(9);(10);(13);(14);(18)
30	13;2	$V_p; V_{gg}$	Mesmo dia	6 veículos V_p e 1 veículo V_{gg} obrigatórios	Idênticas	Formação de carga com veículos de morfologias V_p e V_{gg} utilizando os veículos além de T sem gerar frete tipo “9 Base”. Formar cargas de frete carreteiro com apenas 8 veículos	Uma carga de frete carreteiro com 8 veículos evitando “9 Base” do veículo de morfologia V_p com obrigatoriedade além de T	(9);(10);(13);(14);(18)

Fonte: próprio autor

Nesse caso, sabendo-se que a restrição (16) determina um limite superior de 6 veículos da categoria V_g em cada carga formada, obrigatoriamente 1 unidade de V_g não deve ser alocada. A carga formada contém 6 veículos de morfologia V_g , a quantidade máxima admitida por caminhão cegonha e dois veículos de morfologia V_p . A carga, mesmo contendo apenas 8 veículos a ela alocados, é uma carga de frete do tipo carreteiro.

A instância de teste de número 5 pode comprovar que as restrições de quantidades são aplicadas corretamente, assim como as formulações de cálculo dos valores de frete, expressões (8), (9) e (10) da formulação matemática. A demonstração do cálculo do frete dessa instância é apresentada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Cálculo do valor do frete para instância de teste número 5

Frete	Formulação	Memória de cálculo	Valor
$F_{9b} =$	$9 \cdot f \cdot Morf_b \cdot Dmax_j$	$9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.190$	\$ 10.710
$F_c =$	$\sum_{v=1}^v f \cdot fe^v \cdot d_v$	$2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.190 +$ $6 \cdot 1 \cdot 1,57 \cdot 1.190$	\$ 13.590
$Ft =$	$\max(F_c, F_{9b})$	$\max(13.590, 10.710)$	\$ 13.590

Fonte: próprio autor

O teste de número 8, cujas características dos veículos disponíveis para embarque se encontram na Tabela 4.8 apresenta outra situação na qual o algoritmo selecionou um veículo cuja alocação leva à incidência do frete “9 Base”, o veículo de número 9, para satisfazer a restrição de número máximo de veículos da categoria “g” de morfologia.

Tabela 4.8– Alocações feitas pelo modelo exato para instância de teste de número 8.

CHASSI	Distância (km)	$Morf_v$	Ef^v	Dt^v	Alocado
1	1.190	g	1,57	0	Sim
2	1.190	g	1,57	0	Sim
3	1.190	g	1,57	0	NÃO
4	1.190	g	1,57	0	Sim
5	1.190	g	1,57	0	Sim
6	1.190	g	1,57	0	Sim
7	1.190	g	1,57	0	Sim
8	1.190	gg	2,00	0	Sim
9	2.500	P	1,00	0	Sim

Fonte: próprio autor

Como destacado na coluna “Alocado” da já referida tabela, o algoritmo não alocou o veículo de número 3 formando uma carga composta pelos veículos de número 1,2,4,5,6,7,8, e 9.

Caso o modelo exato não tivesse atendido a restrição de número máximo de veículos de morfologia “g” na carga, tentando apenas minimizar o valor do frete, os veículos de chassi 1 a 8 teriam sido alocados, evitando incidência do frete “9 Base”, como mostra a Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Cálculo do valor do frete para instância de teste número 8 – não atendendo restrição (16)

Frete	Formulação	Memória de cálculo	Valor
$F_{9b} =$	$9 \cdot f \cdot Morf_b \cdot Dmax_j$	$9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1.190$	\$ 10.710
$F_c =$	$\sum_{v=1}^v f \cdot fe^v \cdot d_v$	$1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1.190 + 7 \cdot 1 \cdot 1,57 \cdot 1.190$	\$ 15.485
$Ft =$	$\max(F_c, F_{9b})$	$\max(15.485, 10.710)$	\$ 15.485

Fonte: próprio autor

Entretanto, atendendo todas as restrições existentes, tem-se a incidência do frete “9 Base” no valor de \$22.500, como mostra a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Cálculo do valor do frete para instância de teste número 8 – proposta do modelo exato

Frete	Formulação	Memória de cálculo	Valor
$F_{9b} =$	$9 \cdot f \cdot Morf_b \cdot Dmax_j$	$9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.500$	\$ 22.500
$F_c =$	$\sum_{v=1}^v f \cdot fe^v \cdot d_v$	$1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.500 + 6 \cdot 1 \cdot 1,57 \cdot 1.190 + 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1.190$	\$ 16.089
$Ft =$	$\max(F_c, F_{9b})$	$\max(16.089, 22.500)$	\$ 22.500

Fonte: próprio autor

Para todas as 30 instâncias de teste criadas para verificar a correta funcionalidade do algoritmo, no que diz respeito à aplicação das restrições a diversas situações hipotéticas, mas possíveis de serem encontradas na realidade, o modelo matemático conseguiu encontrar a solução ótima conhecida.

Para melhor entendimento do procedimento de alocação executado pelo algoritmo proposto, considere a instância de teste de número 25, na qual V^t é composto por 23 veículos de morfologia pertencente a categoria “a” com respectivo $fe^v = 1$, utilizado no cálculo dos valores de frete. Utilizando-se da proposta de classificação de morfologias

equivalentes, utilizada no processo de formação das cargas, tais veículos pertencem à categoria “ p ” com respectivo valor $P_p = 1$.

Todos os veículos V^t devem ser entregues a uma mesma concessionária, distante 1.190 quilômetros do centro de consolidação de cargas e todos apresentam $Dt^v = 0$. Não existem veículos com $Dt^v = 1$ ou $Dt^v = 2$. O horizonte de planejamento admitido para esta instância é igual a 3 dias.

Os subconjuntos de veículos a serem alocados são:

$$V^1 = \{1, 2, \dots, 22, 23\}$$

$$V^2 = \{1, 2, \dots, 22, 23\}$$

$$V^3 = \{1, 2, \dots, 22, 23\}$$

Desta forma, aplicando-se a expressão (4) para o cálculo do número de caminhões cegonha disponíveis para embarque em cada dia t do horizonte de planejamento tem-se:

$$\text{para } t = 1 \quad |J^1| = \left\lfloor \frac{|V^1|}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{23}{9} \right\rfloor = 2$$

$$\text{para } t = 2 \quad |J^2| = \left\lfloor \frac{|V^2|}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{23}{9} \right\rfloor = 2$$

$$\text{para } t = 3 \quad |J^3| = \left\lfloor \frac{|V^3|}{9} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{23}{9} \right\rfloor = 2$$

Uma vez que não existem veículos com $Dt^v = 1$ ou $Dt^v = 2$, a necessidade de caminhões para o embarque de V^2 e V^3 também é igual a dois. Logo, estarão disponíveis 6 caminhões cegonha no horizonte de planejamento sendo 2 deles em $t = 1$, para o embarque dos 23 veículos com $Dt^v = 0$. Também serão disponibilizados 2 caminhões cegonha em $t = 2$, para o embarque dos veículos com $Dt^v = 0$ e $Dt^v = 1$, totalizando 23 veículos. Outros 2 caminhões serão disponibilizados para carregar os 23 veículos pertencentes a V^3 em $t = 3$. Desta forma, cada um dos 23 veículos disponíveis para embarque pode ser alocado em um dos 6 caminhões cegonha

disponíveis e, conseqüentemente, para cada veículo v seis variáveis de decisão x_{vj}^t são criadas.

O próximo passo é determinar o número de veículos remanescentes por categoria equivalente de morfologia, como apresentado nas expressões (5) a (7). Uma vez que $|V_m^1| = 0$, $|V_g^1| = 0$ e $|V_{gg}^1| = 0$, tem-se $R_m^1 = R_g^1 = R_{gg}^1 = 0$, respectivamente. Ainda, dado que não existem veículos com $Dt^v = 1$ ou $Dt^v = 2$, em outras palavras, com data limite de embarque em $t = 2$ ou $t = 3$, tem-se:

$$\begin{aligned} |V_m^2| = |V_m^3| = 0 \text{ e logo } R_m^2 = R_m^3 = 0 \\ |V_g^2| = |V_g^3| = 0 \text{ e logo } R_g^2 = R_g^3 = 0 \\ |V_{gg}^2| = |V_{gg}^3| = 0 \text{ e logo } R_{gg}^2 = R_{gg}^3 = 0 \end{aligned}$$

Tomando os valores de morfologia equivalente dos veículos disponíveis para alocação, todos com $P_p = 1$, calcula-se a quantidade de veículos que devem ser desobrigados de alocação em t até que $M^t \leq 13,28 \cdot |J^t|$. Neste exemplo como não existem veículos com obrigatoriedade em $t = 2$ e $t = 3$, somente serão apresentados os cálculos para $t = 1$, já que o mesmo número de veículos estará disponível em $t = 2$ e $t = 3$. Em $t = 1$, tem-se:

$$\begin{aligned} M^1 &\leq 13,28 \cdot |J^1| \\ 23 \cdot P_p &\leq 13,28 \cdot |J^1| \\ 23 \cdot 1,00 &\leq 13,28 \cdot 2 \\ 23 &\leq 26,56 \end{aligned}$$

Como o valor total das morfologias disponíveis para alocação é menor que o valor total das morfologias que podem ser alocadas nos caminhões cegonhas disponíveis, tem-se que $RMorf^1 = 0$ e $RMorf^2 = RMorf^3 = 0$ uma vez que $V^1 = V^2 = V^3$.

Conseqüentemente, nenhum dos conjuntos de veículos disponíveis para alocação, respectivamente, V^1 , V^2 e V^3 , sofrerá ajuste em sua quantidade de veículos a serem alocados, dadas as combinações de morfologias existentes.

Pela expressão 21 tem-se que $y_{jt} \leq y_{j,t-1}$, o que faz com que os caminhões cegonha disponibilizados em $t = 1$ sejam utilizados antes daqueles disponibilizados em $t = 2$ ou $t = 3$. Tal expressão faz com que, dentre os 6 caminhões de capacidade homogêneas criados, os dois caminhões de menor índice t serão utilizados, como mostra a Tabela 4.11. Na referida tabela é possível notar que enquanto $j_1^1 = j_2^1 = 1$, determinando sua utilização; tem-se $j_2^2 = j_2^3 = j_1^2 = j_1^3 = 0$, impondo a sua não utilização.

Definidos os conjuntos de veículos e caminhões cegonha, as variáveis de decisão criadas pelo modelo e seus respectivos valores são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4.11 – Cálculo do valor do frete para instância de teste número 8 – proposta do modelo exato

Veículo	Caminhão					
	$j_1^1=1$	$j_2^1=1$	$j_3^1=0$	$j_4^1=0$	$j_5^1=0$	$j_6^1=0$
1	$x_{11}^1=0$	$x_{12}^1=1$	$x_{13}^1=0$	$x_{14}^1=0$	$x_{15}^1=0$	$x_{16}^1=0$
2	$x_{21}^1=0$	$x_{22}^1=1$	$x_{23}^1=0$	$x_{24}^1=0$	$x_{25}^1=0$	$x_{26}^1=0$
3	$x_{31}^1=1$	$x_{32}^1=0$	$x_{33}^1=0$	$x_{34}^1=0$	$x_{35}^1=0$	$x_{36}^1=0$
4	$x_{41}^1=0$	$x_{42}^1=1$	$x_{43}^1=0$	$x_{44}^1=0$	$x_{45}^1=0$	$x_{46}^1=0$
5	$x_{51}^1=0$	$x_{52}^1=1$	$x_{53}^1=0$	$x_{54}^1=0$	$x_{55}^1=0$	$x_{56}^1=0$
6	$x_{61}^1=1$	$x_{62}^1=0$	$x_{63}^1=0$	$x_{64}^1=0$	$x_{65}^1=0$	$x_{66}^1=0$
7	$x_{71}^1=1$	$x_{72}^1=0$	$x_{73}^1=0$	$x_{74}^1=0$	$x_{75}^1=0$	$x_{76}^1=0$
8	$x_{81}^1=1$	$x_{82}^1=0$	$x_{83}^1=0$	$x_{84}^1=0$	$x_{85}^1=0$	$x_{86}^1=0$
9	$x_{91}^1=1$	$x_{92}^1=0$	$x_{93}^1=0$	$x_{94}^1=0$	$x_{95}^1=0$	$x_{96}^1=0$
10	$x_{10\ 1}^1=0$	$x_{10\ 2}^1=1$	$x_{10\ 3}^1=0$	$x_{10\ 4}^1=0$	$x_{10\ 5}^1=0$	$x_{10\ 6}^1=0$
11	$x_{11\ 1}^1=0$	$x_{11\ 2}^1=1$	$x_{11\ 3}^1=0$	$x_{11\ 4}^1=0$	$x_{11\ 5}^1=0$	$x_{11\ 6}^1=0$
12	$x_{12\ 1}^1=1$	$x_{12\ 2}^1=0$	$x_{12\ 3}^1=0$	$x_{12\ 4}^1=0$	$x_{12\ 5}^1=0$	$x_{12\ 6}^1=0$
13	$x_{13\ 1}^1=0$	$x_{13\ 2}^1=1$	$x_{13\ 3}^1=0$	$x_{13\ 4}^1=0$	$x_{13\ 5}^1=0$	$x_{13\ 6}^1=0$
14	$x_{14\ 1}^1=0$	$x_{14\ 2}^1=0$	$x_{14\ 3}^1=0$	$x_{14\ 4}^1=0$	$x_{14\ 5}^1=0$	$x_{14\ 6}^1=0$
15	$x_{15\ 1}^1=1$	$x_{15\ 2}^1=0$	$x_{15\ 3}^1=0$	$x_{15\ 4}^1=0$	$x_{15\ 5}^1=0$	$x_{15\ 6}^1=0$
16	$x_{16\ 1}^1=0$	$x_{16\ 2}^1=1$	$x_{16\ 3}^1=0$	$x_{16\ 4}^1=0$	$x_{16\ 5}^1=0$	$x_{16\ 6}^1=0$
17	$x_{17\ 1}^1=0$	$x_{17\ 2}^1=1$	$x_{17\ 3}^1=0$	$x_{17\ 4}^1=0$	$x_{17\ 5}^1=0$	$x_{17\ 6}^1=0$
18	$x_{18\ 1}^1=0$	$x_{18\ 2}^1=0$	$x_{18\ 3}^1=0$	$x_{18\ 4}^1=0$	$x_{18\ 5}^1=0$	$x_{18\ 6}^1=0$
19	$x_{19\ 1}^1=1$	$x_{19\ 2}^1=0$	$x_{19\ 3}^1=0$	$x_{19\ 4}^1=0$	$x_{19\ 5}^1=0$	$x_{19\ 6}^1=0$
20	$x_{20\ 1}^1=0$	$x_{20\ 2}^1=1$	$x_{20\ 3}^1=0$	$x_{20\ 4}^1=0$	$x_{20\ 5}^1=0$	$x_{20\ 6}^1=0$
21	$x_{21\ 1}^1=1$	$x_{21\ 2}^1=0$	$x_{21\ 3}^1=0$	$x_{21\ 4}^1=0$	$x_{21\ 5}^1=0$	$x_{21\ 6}^1=0$
22	$x_{22\ 1}^1=1$	$x_{22\ 2}^1=0$	$x_{22\ 3}^1=0$	$x_{22\ 4}^1=0$	$x_{22\ 5}^1=0$	$x_{22\ 6}^1=0$
23	$x_{23\ 1}^1=1$	$x_{23\ 2}^1=0$	$x_{23\ 3}^1=0$	$x_{23\ 4}^1=0$	$x_{23\ 5}^1=0$	$x_{23\ 6}^1=0$

Fonte: próprio autor

A agrupamento das variáveis de decisão por caminhão cegonha mostra que a carga de número 1, alocada em j_1^1 é composta pelos veículos 3,6,7,8,9,12,15,19,21,22 e 23 enquanto a carga de número 2, alocada ao caminhão j_2^1 é composta pelos veículos 1,2,4,5,10,12,14,16,17 e 20.

Como se pode notar pelas cargas formadas, o veículo de número 18 com $x_{18\ 1}^1 = x_{18\ 2}^1 = x_{18\ 3}^2 = x_{18\ 4}^2 = x_{18\ 5}^3 = x_{18\ 6}^3 = 0$ não foi alocado em nenhum dos caminhões cegonha disponíveis no horizonte de planejamento, sendo deixado no centro de consolidação da empresa de transportes.

O veículo 18 foi o escolhido para ser deixado no centro de consolidação, assim como poderia ter sido qualquer outro, uma vez que são todos idênticos, de mesma categoria equivalente de morfologia, e qualquer veículo não carregado resultaria no mesmo valor da função objetivo.

Os valores obtidos pelo modelo matemático para as variáveis de decisão atendem restrição estabelecida pela expressão 12 (reapresentada a seguir), uma vez que não existe nenhum veículo cuja somatória da variável de decisão em t seja maior que 1.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j \in J} x_{vj}^t \leq 1 \quad \forall v \in V$$

Ainda, após a determinação das variáveis de decisão, podemos verificar se o resultado obtido respeita todas as restrições estabelecidas para todos os períodos do horizonte de planejamento. Entretanto, como não existem veículos com obrigatoriedade em $t = 2$ e $t = 3$ e somente caminhões disponibilizados em $t = 1$ foram utilizados, a verificação das variáveis de decisão no que diz respeito às restrições operacionais serão apresentadas a seguir apenas para $t = 1$.

A primeira restrição a ser avaliada se refere ao número mínimo de veículos que devem ser alocados, representada pela expressão (11), apresentada a seguir.

$$\begin{aligned}
\sum_{j \in J^t} \sum_{v \in V^t} x_{vj}^1 &\geq \text{Min}\{11 \cdot y_{jt}; |V^1| - R_m^t - R_g^t - R_{gg}^t - R_{Morf}^t\} \\
\sum_{j \in J^t} \sum_{v \in V^t} x_{vj}^1 &\geq \text{Min}\{11 \cdot 2; 23 - 0 - 0 - 0 - 0\} \\
\sum_{j \in J^t} \sum_{v \in V^t} x_{vj}^1 &\geq \text{Min}\{22; 23\} \\
\sum_{j \in J^t} \sum_{v \in V^t} x_{vj}^1 &\geq 22
\end{aligned}$$

Tem-se então que 22 veículos devem ser alocados em dois caminhões cegonhas. em j_1^1 e j_2^1 . Entretanto, ainda devem ser verificadas as restrições específicas aos grupos de morfologia equivalente.

Para a primeira carga formada (j_1^1) deve-se verificar sua factibilidade no que diz respeito a existência de um veículo do grupo “gg” de morfologia na carga, tal que

$$\begin{aligned}
\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V^t \setminus V_{gg}^t} x_{vj}^t &\leq 11 - 2 \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_{gg}^t} x_{vj}^t \\
x_{31}^1 + x_{61}^1 + x_{71}^1 + x_{81}^1 + x_{91}^1 + x_{121}^1 + x_{151}^1 + x_{191}^1 + x_{211}^1 + x_{221}^1 + x_{231}^1 &\leq 11 \\
11 &\leq 11
\end{aligned}$$

A seguir, é verificado o número máximo de veículos do grupo “gg” de morfologia alocados a carga. Como não existem veículos desta morfologia alocados ao caminhão j_1^1 tem-se

$$\begin{aligned}
\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_{gg}^t} x_{vj}^t &\leq 1 \quad \forall j \in J \\
0 &\leq 1
\end{aligned}$$

O número máximo de veículos do grupo “m” de morfologia alocados ao caminhão j_1^1 também deve ser verificado. Uma vez que $V_m^1 = \emptyset$, não existem veículos desta morfologia em j_1^1 . Logo

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_m^t} x_{vj}^t \leq 8$$

$$0 \leq 8$$

Também deve ser verificado o número máximo de veículos do grupo “g” de morfologia alocados a j_1^1 . Novamente, por não existirem veículos desta morfologia em V^1 , tem-se para este caminhão:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_g^t} x_{vj}^t \leq 6$$

$$0 \leq 6 \quad \forall j \in J$$

O número total de morfologias alocadas a carga também deve ser verificado, não podendo ultrapassar o limite de 13,28. Para isto calcula-se

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_p^t} x_{vj}^t + P_m^v \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_m^t} x_{vj}^t + P_g^v \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_g^t} x_{vj}^t + P_{gg}^v \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V_{gg}^t} x_{vj}^t \leq 13,28$$

$$x_{31}^1 + x_{61}^1 + x_{71}^1 + x_{81}^1 + x_{91}^1 + x_{121}^1 + x_{151}^1 + x_{191}^1 + x_{211}^1 + x_{221}^1 + x_{231}^1 +$$

$$P_m^v \cdot 0 + P_g^v \cdot 0 + P_{gg}^v \cdot 0 \leq 13,28$$

$$11 \leq 13,28$$

O número mínimo de 8 veículos alocados ao caminhão j_1^1 é verificado pela expressão abaixo.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v \in V^t} x_{vj}^t \geq \sum_{t=1}^T 8 \cdot y_{jt}$$

$$x_{31}^1 + x_{61}^1 + x_{71}^1 + x_{81}^1 + x_{91}^1 + x_{121}^1 + x_{151}^1 + x_{191}^1 + x_{211}^1 + x_{221}^1 + x_{231}^1 \geq \sum_{t=1}^T 8 \cdot y_1^1$$

$$11 \geq 8$$

A verificação da existência do caminhão para a alocação do veículo se dada pelas seguintes expressões:

$$x_{31}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{61}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{71}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{81}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{91}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{121}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{151}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{191}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{211}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{221}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

$$x_{231}^1 \leq y_{11} \quad \text{logo } 1 \leq 1$$

A existência de um único caminhão j_1 e de um único caminhão j_2 em $t = 1$ é dada pelas seguintes expressões:

$$\sum_{t=1}^T y_{jt} \leq 1$$

$$y_{11} \leq 1$$

$$1 \leq 1$$

e

$$\sum_{t=1}^T y_{jt} \leq 1$$

$$y_{21} \leq 1$$

$$1 \leq 1$$

O domínio das variáveis, determinado pelas expressões (22) e (23), reproduzidas a seguir, também foram respeitados uma vez que todas elas assumiram o valor de 1 ou zero.

$$x_{vj}^t \in \{0,1\} \quad \forall j \in J; t \in T; v \in V \quad (22)$$

$$y_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J; t \in T; v \in V \quad (23)$$

Com todas as restrições acima apresentadas já respeitadas, os valores de frete carreteiro e “9 Base” podem ser calculados.

$$Ft_j \geq \sum_{t=1}^T \sum_{v \in V} f \cdot P^v \cdot D^v \cdot x_{vj}^t$$

$$\begin{aligned} Ft_1 \geq & 1 \cdot 1190 \cdot x_{31}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{61}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{71}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{81}^1 + \\ & 1 \cdot 1190 \cdot x_{91}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{121}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{151}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{191}^1 + \\ & 1 \cdot 1190 \cdot x_{211}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{221}^1 + 1 \cdot 1190 \cdot x_{231}^1 \end{aligned}$$

$$Ft_1 \geq 13.090$$

Aplicando a mesma formulação em j_2 obtém-se o mesmo valor de frete carreteiro, igual a 13.090, uma vez que o mesmo número de veículos, de mesma morfologia e com as mesmas distâncias de entrega (1.190 km) foram nele alocados.

Para o cálculo do valor do frete “9 Base” de j_1 a equação (10) determina:

$$Ft_j \geq \sum_{t=1}^T 9 \cdot f \cdot D^v \cdot x_{vj}^t$$

$$Ft_1 \geq 9 \cdot 1 \cdot 1.190 \cdot 1$$

$$Ft_1 \geq 10.710$$

Assim como para o cálculo do frete carreteiro, aplicada a mesma formulação de frete “9 Base” em j_2 obtém-se o mesmo valor de frete, igual a 10.710, uma vez que o mesmo número de veículos, de mesma morfologia e com as mesmas distâncias de entrega (1.190 km) foram nele alocados.

A função objetivo será então igual à soma dos valores do frete de $j_1^1 = 13.090$ e $j_2^1 = 13.090$, uma vez que o valores de frete carreteiro são maiores que os valores de frete “9 Base”. Assim o valor da função objetivo é igual a 26.180, como mostra a formulação abaixo.

$$\begin{aligned} & \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} Ft_j \cdot y_{jt} \\ & Ft_1 y_1^1 + Ft_1 y_2^1 \\ & 13.090 + 13.090 \\ & 26.180 \end{aligned}$$

O detalhamento da aplicação das variáveis de decisão ao modelo matemática, como apresentado acima, tem como objetivo facilitar o entendimento de sua execução. Outras formulações matemáticas foram testadas antes que a versão aqui apresentada fosse definida.

4.4 Formulações matemáticas testadas durante o desenvolvimento do modelo matemático de PLIM

Durante o desenvolvimento do modelo matemático foram testadas diferentes formulações até a versão apresentada formalmente nesta tese. Dessa forma, a fim de esclarecer este processo e auxiliar futuras investigações científicas a respeito do tema, apresenta-se nesta seção um resumo das etapas que colaboraram para o modelo final, mas que foram suprimidas da formulação proposta por não apresentarem resultados satisfatórios.

O primeiro modelo matemático formalizado obrigava que todas as cargas formadas no dia de alocação fossem despachadas, mesmo que contivessem apenas veículos não obrigatórios na data de alocação. Tomemos como exemplo hipotético uma situação com horizonte de planejamento igual a 3 dias e data de alocação sendo 1 de fevereiro. Nesse dia, caso fosse formada uma carga contendo apenas veículos com data de obrigatoriedade em 3 de fevereiro, essa carga seria despachada já no dia 1, sem que contivesse um único veículo obrigatório de alocação no dia 1.

Tal regra fez com que muitas unidades disponíveis fossem despachadas antecipadamente em relação à sua data de obrigatoriedade de embarque, reduzindo o número de veículos disponíveis para alocações em períodos futuros, aumentando significativamente a incidência de cargas com frete do tipo "9 Base

A rotina de pós-processamento impõe que apenas as soluções contendo somente cargas com frete carreteiro são despachadas e aquelas com frete do tipo "9 Base" são destruídas. Entretanto, para reduzir o número de veículos que resultariam em entregas atrasadas pela aplicação do algoritmo, uma condição de destruição de cargas existente no pós-processamento foi relaxada para admitir cargas com frete do tipo "9 Base", porém, desde que contivessem ao menos um veículo com obrigatoriedade de embarque na data da alocação. Ou seja, uma carga com frete do tipo "9 Base" não é destruída se contiver ao menos um veículo que será entregue atrasado caso não seja despachado no dia corrente de alocação. Tal situação também fez com que o valor do frete total fosse significativamente maior que o valor da opção que obrigava a formação de fretes do tipo carreteiro.

Adicionalmente, a fim de tentar reduzir o atraso médio dos veículos entregues, foi adicionada uma restrição que obriga um determinado número mínimo de veículos a ser despachado todos os dias. Esta obrigatoriedade gerou situações de solução não factível que acontece quando, por exemplo, existirem 16 veículos disponíveis para embarque, sendo 4 da categoria de morfologia V_p , 5 da categoria V_m , 5 da categoria V_g , e 2 da categoria V_{gg} , com imposição de 11 veículos a serem despachados.

Tal situação hipotética não resulta solução factível pois não existe, com o conjunto de veículos exemplificado, formação que permita 11 veículos na carga. Caso o veículo V_{gg} fosse alocado, só poderiam ser alocados outros 9 veículos, totalizando 10 unidades. Por outro lado, mesmo não alocando nenhum dos veículos da categoria V_{gg} , a soma dos valores das morfologias dos 11 menores veículos ultrapassaria o limite de 13,28 morfologias permitidas na carga. Tal situação foi resolvida com a eliminação do número mínimo de veículos a serem embarcados e com a adição das equações que calculam a quantidade de veículos remanescentes em cada período de alocação, expressões (5), (6) e (7).

Ainda, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento requerido pelo modelo exato para obter as soluções, o limite superior do número de caminhões foi reduzido. O número de caminhões cegonha disponíveis para embarque afeta o tempo de processamento do algoritmo, pois o modelo matemático tem mais caminhões para tentar um agrupamento ótimo, gastando tempo para gerar cargas simétricas. Para tal redução, duas alterações foram feitas no algoritmo.

Inicialmente o referido limite superior foi calculado pela divisão do número total de veículos disponíveis no dia de alocação por 8, independentemente do número de veículos com obrigatoriedade de embarque em T . Essa regra fez com que um número de caminhões cegonha muito maior que o necessário fosse considerado no processo de alocação. O cálculo foi alterado para que apenas os veículos com $0 \leq Dt^v \leq (t - 1)$ fossem considerados no cálculo.

Concomitantemente, foi alterado o quociente da divisão da fórmula de cálculo do limite superior de caminhões cegonha disponíveis na operação de 8 para 9. Originalmente foram utilizados 8 veículos no quociente da equação, pois esse é o menor número de unidades que se pode carregar num caminhão cegonha para a formação de uma carga factível. Entretanto, como o objetivo do modelo matemático é a minimização do valor do frete, se espera que poucas ou nenhuma carga com o número mínimo de veículos seja montada. Ainda, caso tais cargas sejam montadas, seus respectivos valores de frete têm grandes possibilidades de serem do tipo “9 Base”, o que acarreta em sua destruição no pós-processamento.

Tais alterações tornaram possível a execução de todas as instâncias de teste, porém, ainda exigindo vários minutos de processamento.

Como alternativa para a redução do tempo de processamento se havia eliminado a restrição (18), admitindo a formação de cargas com menos de 8 veículos, as quais eram destruídas no pós-processamento. Esta opção aumentou drasticamente o número de veículos atrasados e o atraso médio, uma vez que os veículos com distância de entrega mais dispersa, formadores de cargas “9 Base”, foram alocados sozinhos, em cargas a serem destruídas pelo pós-processamento.

Para reduzir o número de cargas com de frete do tipo “9 Base” foi adicionada na função objetivo uma parcela de custo fixo pela utilização do caminhão cegonha. Tal parcela pretendia reduzir o número de caminhões utilizados, aumentando o número de veículos alocados em cada carga, o que favorece a geração de fretes do tipo carreteiro. Entretanto, como a função objetivo busca minimizar o frete total, tal alteração acabou sem efeito pois todas as possíveis cargas de frete carreteiro são sempre formadas, independente do custo pelo uso do caminhão.

4.5 Considerações finais do capítulo

O modelo matemático proposto foi capaz de obter as soluções ótimas para as 30 instâncias de teste criadas.

Os resultados dos testes executados pela aplicação do modelo de programação linear inteira mista nas 30 instâncias propostas, mostraram que o algoritmo é capaz de formar cargas factíveis, obedecendo a todas as restrições existentes e considerando um horizonte de planejamento, ao menos para pequenas instâncias do problema.

Ainda, o algoritmo foi capaz de corretamente calcular os valores de frete referentes às cargas formadas quando veículos de diferentes morfologias estão disponíveis para

embarque, com diferentes números de dias até sua obrigatoriedade de alocação e dispersões nas distâncias de entregas.

Assim, pode-se afirmar que no tocante aos aspectos de funcionalidade do modelo matemático desenvolvido, ele é capaz de considerar todas as variáveis, aplicar as restrições operacionais, calcular corretamente os valores de frete e encontrar as soluções ótimas.

No capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação do modelo matemático e do algoritmo de pós-processamento propostos a pequenas instâncias reais do problema, assim como sua limitação para a resolução de problemas com maiores volumes de veículos disponíveis para alocação.

Capítulo 5

APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO A INSTÂNCIAS REAIS DE PEQUENO PORTE

Após a validação das funcionalidades do modelo matemático desenvolvido para resolver o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil, testes foram feitos para a aplicação do algoritmo desenvolvido a instâncias reais do problema.

Ao aplicar o modelo matemático e o algoritmo de pós-processamento descritos anteriormente para a alocação de um conjunto real de veículos de um período específico, constatou-se a impossibilidade de obtenção de resultados em tempo compatível com as necessidades da dinâmica alocação dos veículos e despacho dos caminhões, dada a complexidade inerente ao problema proposto e à quantidade de veículos a serem alocados por dia.

Entretanto, para que seja possível verificar a capacidade da heurística proposta nesta tese para resolver problemas de formação de cargas de grande porte, é necessário obter os valores ótimos de instâncias reais do problema para que sejam balizadores das análises de desempenho posteriores. Nessas condições, foram investigadas alternativas de obtenção de soluções ótimas para o modelo exato desenvolvido pelo aumento da capacidade de processamento computacional.

Uma tendência atual nesse sentido é a utilização de computação de alto desempenho como, por exemplo, o Multi-threading, que permite a execução de um programa em diferentes partes, que são paralelamente ativadas em diferentes processadores de um ou vários computadores (Groothuijse, 2016).

Para isso, uma opção inicialmente escolhida foi a utilização do cluster de computadores formado por 64 servidores disponibilizado pela Universidade de São Paulo, sob a denominação de ÁGUIA-USP (HPC, 2016). O cluster ÁGUIA-USP tem como objetivo o processamento de dados de alto desempenho em máquinas computacionais interconectadas para aplicações de processamento computacional paralelo e/ou distribuído (<http://www.sti.usp.br/hpc/> acessado em 29 de junho de 2016).

Apesar da alta capacidade de armazenamento e processamento computacional do sistema ÁGUIA-USP, a sua utilização para os fins desta pesquisa mostrou-se inviável, dada a elevada demanda para utilização da infraestrutura. Testes preliminares resultaram em um tempo de espera em fila para submissão de até 7 dias para cada dia do horizonte de planejamento da análise.

Considerando-se as características do problema, em que os resultados de um período t qualquer devem ser re-submetidos para que o período $t + 1$ possa ser processado, o tempo de espera para processamento no ÁGUIA-USP torna-se um fator impeditivo à sua utilização. No limite, o processamento de um mês com 30 dias de operação poderia gerar uma espera de 210 dias (30 semanas), apenas para iniciar o processamento.

Uma alternativa ao ÁGUIA-USP é o NEOSERVER - Network-Enabled Optimization System Server (Gropp e More, 1997; Czyzyk et al., 1998; Dolan, 2001), um conjunto de servidores disponibilizados de forma gratuita para ser utilizado na resolução de problemas de otimização numérica. O serviço é mantido pelo governo do Estados Unidos e gerenciado pela Universidade de Wisconsin, disponibiliza mais de 60 *solvers* (CPLEX, Gurobi, XPRESS, KNITRO, MINOS, entre outros) para a resolução de diferentes tipos de modelos matemáticos de otimização. Mais informações estão disponíveis na página oficial do servidor em <https://neos-server.org/>.

Do ponto de vista de recursos disponíveis, existem diferenças entre as alternativas descritas. Enquanto a resolução de modelos matemáticos pelo ÁGUIA-USP é realizada em máquinas virtuais do tipo “Intel Xeon CPU E7- 2870” @ 2.40GHz (20

cores) com 512 GB de RAM, o NEOSERVER disponibiliza máquinas do tipo “Intel Xeon CPU E5-2698” @ 2.3GHz (32 cores) com 192 GB de RAM.

Apesar da menor capacidade de processamento do equipamento disponibilizado pelo NEOSERVER em relação aos disponibilizados pelo ÁGUIA-USP, testes preliminares indicaram que o tempo de espera em fila de processamento no NEOSERVER é praticamente nulo, o que viabiliza a sua utilização para resolver instâncias reais de pequeno porte.

Desta forma, decidiu-se pela utilização do NEOSERVER como plataforma de solução do modelo matemático de PLIM apresentado, sendo a submissão ao servidor feita através de interface implementada na linguagem de programação Java utilizando-se uma conexão via internet.

5.1 Instâncias reais de teste

Para os testes de desempenho do modelo matemático desenvolvido foram utilizadas as informações contidas na base de dados disponibilizada por uma transportadora de veículos zero-quilômetro, cuja análise foi apresentada no capítulo 3 deste trabalho.

Sabendo da existência das linhas de distribuição e dos subgrupos de destinos existentes em cada uma delas, como apresentado na seção 3.2 do capítulo 3 deste trabalho, as informações sobre o transporte dos veículos, contidas no referido do banco de dados, foram particionadas de forma correlata.

Utilizando os mesmos subgrupos de destinos apresentados no capítulo 3 (“Santos”, “Socorro”, “Vale” e “Sul”), quatro instâncias de testes foram criadas, sendo uma para cada respectivo subagrupamento.

Dentro de cada subagrupamento, a seleção das informações dos veículos a serem utilizadas para a formação das instâncias de teste foi feita a partir da seleção de um intervalo de dias que corresponda ao período de uma semana.

Assim, os veículos recebidos no intervalo de dias considerado foram admitidos ao conjunto V dos veículos a serem alocados. A esse conjunto foram adicionados todos os veículos recebidos antes das datas do intervalo, mas que ainda estavam disponíveis quando tal período se iniciou. Também foram adicionados ao referido conjunto V , todos aqueles veículos recebidos depois do mencionado período, mas passíveis de serem utilizados para a alocação dos veículos recebidos na semana considerada como período de avaliação.

Para a instância nomeada “Santos”, o período de recebimento dos veículos considerados para a comparação do valor do frete de distribuição obtido com alocação manual e do valor obtido com a alocação feita pelo modelo matemático de PLIM se inicia em 7 de fevereiro e termina no dia 12 do mesmo mês. Os veículos recebidos durante o período de avaliação estão destacados na cor verde na Tabela 5.1, totalizando 227 unidades.

Tabela 5.1– Caracterização da base de dados utilizada no agrupamento da linha “Santos”

Data de alocação (2011)	Data de recebimento (2011)																	Total	
	29/01	01/02	02/02	03/02	04/02	05/02	07/02	08/02	09/02	10/02	11/02	12/02	14/02	15/02	16/02	17/02	18/02		
08/02	1	5	4	13	14	13	7	1										58	
09/02	1			1	3	10	12	7	9									43	
10/02					1	7	1	10	8	8								35	
11/02						10		10	10	16	9							55	
14/02								4	15	20	6	15	3					63	
15/02										6	15	15	17	7				60	
16/02											2	7	4	11	9			33	
17/02											4	6	8	8	14	3		43	
18/02											1	3	4	11	6	18	7	50	
21/02														9	17	19	18	63	
22/02															4	9	7	20	
23/02																1	3	8	12
Total	2	5	4	14	18	40	20	32	42	50	37	46	36	46	51	52	40	535	
	83						277						225						

Fonte: próprio autor

Entretanto, antes do dia 7 de fevereiro, já existiam 83 veículos disponíveis para embarque, destacados na cor amarela da mesma tabela. Ainda, o último veículo recebido no período de avaliação só foi alocado no dia 18 de fevereiro, quando os

veículos recebidos até aquela data também já estavam disponíveis para embarque no pátio da transportadora.

Para contemplar a situação acima descrita, também foram adicionados ao grupo de veículos, todos aqueles recebidos até a data mais tardia de embarque dos veículos de referência. Logo, outros 225 veículos recebidos depois do período de avaliação também foram adicionados à base de dados do modelo matemático, os quais estão destacados na seção azul da Tabela 5.1.

Finalmente, tem-se o conjunto de 535 unidades a serem utilizadas para avaliar o desempenho do modelo matemático de PLIM na alocação dos 227 veículos recebidos no período de avaliação de 7 a 12 de fevereiro de 2011 para o grupo “Santos”.

O mesmo processo de seleção dos veículos foi feito para outros 3 agrupamentos de cidades. Entretanto, o período de avaliação dos agrupamentos não pode ser o mesmo para todas as instâncias pois, por exemplo, a quantidade de veículos a serem alocados de 7 a 12 de fevereiro para a instância “Socorro” era demasiadamente grande, inviabilizando a obtenção da solução ótima do modelo, mesmo utilizando-se da plataforma do NEOSERVER.

A Tabela 5.2 apresenta as características de cada uma das 4 instâncias de teste selecionadas no já mencionado banco de dados: “Santos”, “Vale”, “Sul” e “Socorro”. Nessas instâncias, a quantidade de veículos varia de 535 até 863.

Tabela 5.2 – Caracterização da composição de veículos nas instâncias reais de teste

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Período de avaliação no mês de fevereiro de 2011	7 a 12	7 a 12	7 a 12	14 a 19
Veículos recebidos antes período de avaliação	83	132	88	135
Veículos recebidos no período de avaliação	227	276	355	408
Veículos recebidos depois período de avaliação	225	455	155	25
Número total de veículos considerados na instância	535	863	598	568

Fonte: próprio autor

Considerando que o modelo matemático trabalha o horizonte de planejamento dia-a-dia, é importante destacar que o volume diário de veículos recebidos nas instâncias reais admitidas variou de 20 a 98 unidades, como mostra Tabela 5.3

Tabela 5.3 – Volumes máximos e mínimos recebidos por linha de distribuição no período de avaliação

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Maior volume diário de veículos recebidos	50	98	67	92
Menor volume diário de veículos recebidos	20	25	42	40

Fonte: próprio autor

Tais volumes não são grandes, representam a alocação de dois a dez caminhões cegonha por dia. Entretanto, tais instâncias foram mantidas com esse tamanho para que se pudesse ter certeza que o modelo matemático as conseguiria resolver.

5.2 Determinação do horizonte de planejamento

Antes de aplicar a modelagem matemática às instâncias descritas, foi necessário estabelecer o horizonte de planejamento para cada dia de alocação do modelo, ou seja, o valor do parâmetro T . Pela aplicação de três variações do modelo matemático, com horizonte de planejamento igual a 2, 3 e 4 dias, para a alocação dos veículos da linha “Santos” tem-se as seguintes conclusões:

- O modelo exato desenvolvido não obteve solução em tempo computacional aceitável, independentemente do horizonte de planejamento admitido, com a utilização de computadores pessoais;
- A solução obtida pelo modelo matemático de PLIM admitindo-se dois dias de horizonte de planejamento deixou de alocar alguns veículos com $Dt^v = 0$, mesmo utilizando computadores de grande porte para a sua aplicação;
- Para horizonte de planejamento igual a três dias, o método exato obteve soluções ótimas, em tempo computacional aceitável, quando computadores de grande porte foram utilizados para a sua aplicação;
- Para horizonte de planejamento igual a quatro dias, o modelo matemático não obteve uma solução em tempo computacional aceitável, pois o número de

veículos a serem diariamente considerados para alocação torna o problema demasiadamente grande para ser resolvido através do modelo matemático proposto.

Considerando o acima exposto, atribuiu-se para todas as instâncias um horizonte de planejamento igual a três dias.

5.3 Resultados da aplicação do modelo matemático a instâncias de pequeno porte

A Tabela 5.4 sumariza os resultados das soluções ótimas das aplicações do modelo matemático de PLIM a 4 instâncias reais do problema: “Santos”, “Vale”, “Sul” e “Socorro”. As subseções a seguir contêm análises sobre esses resultados no tocante aos valores totais de frete, atrasos nas entregas dos veículos e tempos computacionais de processamento obtidos para cada uma delas.

Pelos resultados obtidos é possível dizer que a aplicação do método exato proposto às instâncias reais do problema pode gerar reduções no valor do frete que variam desde 8,4 até 15,6%, se comparados com os valores de frete obtidos pela alocação manual feita por um funcionário da empresa de transportes que cedeu os dados para a realização desta pesquisa.

Para todos os resultados obtidos pelo modelo matemático, em outras palavras, para todas as soluções encontradas para cada dia de alocação de cada instância real resolvida, a diferença entre o valor encontrado pelo modelo exato e a solução ótima (GAP) foi igual a zero.

Ainda, houve significativa redução no número de veículos atrasados. Na instância “Socorro”, por exemplo, enquanto a alocação manual obteve 108 veículos entregues atrasados, o modelo matemático não gerou nenhuma entrega atrasada.

Tabela 5.4– Resumo dos resultados da aplicação da PLIM

Instâncias	Valor do Frete Pago	Valor do Frete na PLIM	Redução % do Frete	Veículos Entregues Atrasados	Atraso Médio Real (dias)	Atrasos na PLIM	Atraso Médio PLIM (dias)
Santos	16.615	15.215	8,4%	52	1,63	6	1,33
Vale	40.015	34.373	14,1%	27	2,67	1	1,00
Sul	506.844	434.364	14,3%	10	1,70	0	0
Socorro	49.381	41.667	15,6%	108	2,49	0	0

Fonte: próprio autor

É importante salientar que o valor de frete unitário igual a R\$1,00, admitido nesta tese e utilizado como parâmetro de entrada no modelo matemático, não sendo o real valor de frete pago pela empresa de transporte aos donos dos caminhões cegonha por quilômetro de distância que um veículo é transportado. O real valor é tratado como dado confidencial pela transportadora e não foi disponibilizado.

5.3.1 Análise dos valores do frete

Pelos resultados obtidos com a aplicação do modelo matemático de PLIM as instâncias reais do problema, apresentados na Tabela 5.4, não é possível afirmar que exista correlação entre o número de veículos a serem alocados e a potencial redução do valor do frete pago resultante da utilização do modelo matemático.

Caso houvesse tal correlação, seria possível inferir que quanto maior a quantidade de veículos a serem alocados, menos eficiente, do ponto de vista de minimização do frete total, seria a alocação feita de maneira subjetiva pelo funcionário da empresa, o que aumentaria o benefício da utilização do modelo matemático.

A dispersão das distâncias de entregas dos veículos também poderia ser um fator de dificuldade para a alocação subjetiva, gerando maior benefício da utilização do modelo de PLIM em instância com maiores dispersões de entrega.

Porém, ao comparar os coeficientes de variação das distâncias dos veículos a serem alocados em cada instância e a redução do valor do frete obtido pela utilização do

modelo matemático, também não se observa correlação entre esses valores, como pode ser observado na Tabela 5.5.

O coeficiente de variação é uma medida de dispersão padronizada, definida pela razão do desvio padrão pela média, sendo utilizada quando se deseja comparar a variação de conjuntos de observações que diferem na média (BARBETTA et al., 2004).

A análise da dispersão das distâncias faz sentido uma vez que maiores dispersões tendem a favorecer a incidência do frete tipo “9 Base”, como anteriormente apresentado no exemplo hipotético na seção 3.5 do capítulo 3 desta tese.

Tabela 5.5– Coeficiente de variação das distâncias e percentual de redução do valor do frete

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Coeficiente de variação das distâncias	0,67	0,38	0,18	0,22
Redução % frete	8,4%	14,1%	14,3%	15,6%

Fonte: próprio autor

Outra causa para as variações nos percentuais de redução do frete obtidos pelo modelo de PLIM poderia ser a quantidade de diferentes morfologias existentes no grupo de veículos disponíveis para alocação. Mais precisamente, da quantidade de veículos de morfologias diferentes da morfologia V_p existente no grupo, as quais apresentam menor número de restrições de agrupamento, aumentando o número de possíveis combinações de carga factíveis.

A Tabela 5.6 representa o percentual de participação das diferentes categorias de morfologia para cada instância de teste e o respectivo percentual de redução do frete, quando da utilização do modelo matemático. Novamente, não se observou haver correlação entre a participação das diferentes categorias de morfologias e reduções nos valores do frete obtido pelo modelo matemático.

Tabela 5.6– Morfologias das instâncias e percentual de redução do valor do frete

		Instâncias			
		Santos	Vale	Sul	Socorro
Participação	Morfologia V_p ;	90,0%	100%	97%	99%
	Morfologia V_m	0,6%	0%	1%	0%
	Morfologia V_g	9,0%	0%	2%	1%
	Morfologia V_{gg}	0,4%	0%	0%	0%
Valor do Frete Pago		16.615	40.015	506.844	49.381
Valor do Frete na PLIM		15.215	34.373	434.364	41.667
Redução % frete		8,4%	14,1%	14,3%	15,6%

Fonte: próprio autor

Pelas análises dos resultados, não foi possível definir um único fator determinante na variação do benefício da utilização do modelo exato. Mas, sem dúvida, a utilização de alguma ferramenta computacional com objetivo de minimizar o valor do frete pago trará benefícios à empresa de transporte.

Para exemplificar como a subjetividade na formação das cargas pode criar agrupamentos não ótimos, tomemos como exemplo a carga de número 15.349, formada pelo funcionário da empresa, cujo detalhamento é apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7– Composição e custo do frete da carga 15.349 da alocação manual

Chassis	Data de Recebimento	Data de Embarque	Data Prometida de Entrega	Morfologia	Distância	Valor do Frete por Unidade
12253693	07/02/11	08/02/11	11/02/11	1,00	51	57,38
12259083	07/02/11	08/02/11	11/02/11	1,00	51	57,38
12260867	07/02/11	08/02/11	11/02/11	1,00	51	57,38
12272502	05/02/11	08/02/11	10/02/11	1,00	51	57,38
12285799	04/02/11	08/02/11	09/02/11	1,00	51	57,38
12288643	03/02/11	08/02/11	08/02/11	1,00	51	57,38
12292387	04/02/11	08/02/11	09/02/11	1,00	51	57,38
12309642	07/02/11	08/02/11	11/02/11	1,00	51	57,38

Valor do frete a ser pago ao dono do caminhão cegonha = $\max(9 \cdot 1 \cdot 51; 8 \cdot 1 \cdot 51) = 459,0$

Fonte: próprio autor

Pela referida tabela, é possível notar que foram alocados 8 veículos de morfologia de valor 1,00 com distância de entrega igual a 51 quilômetros, resultando em um frete “9

Base” de valor igual a R\$459,00 e frete médio por unidade transportada igual a R\$57,38. Ressaltando que tais valores foram calculados considerando-se o valor de frete unitário por quilômetro igual a R\$1,00, o que não representa o valor real pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha.

Analisando as distâncias dos destinos de entrega das unidades alocadas a essa carga, tem-se que todos estão a 51 quilômetros do centro de distribuição. Sabendo-se que um caminhão cegonha pode viajar até 600 quilômetros por dia, todos esses veículos teriam como obrigatoriedade de embarque o próprio dia de entrega. Desta forma, na composição da carga apresentada na Tabela 5.7, apenas o veículo de número 12288643 é um veículo de alocação obrigatória no dia 8. Todas as outras alocações aconteceram para possibilitar o envio dessa única unidade.

A alocação manual criou uma carga de frete “9 Base” para o envio de uma única unidade com obrigatoriedade de embarque. Porém, outras opções poderiam ser consideradas para o envio desse veículo, tais como, atrasar sua entrega ou encontrar outras formações que o acomodassem sem a incidência do frete mínimo.

Analisando as cargas formadas pelo modelo matemático, pode-se notar que não existia a obrigatoriedade da criação de uma carga com frete do tipo “9 Base” para alocar a referida unidade naquela data.

A Tabela 5.8 mostra a carga de número 18 criada pelo modelo exato. Tal carga é composta por 9 unidades com destinos de entrega à 51 quilômetros do centro de distribuição, cujo frete incidente é um frete do tipo carreteiro. Dentre as unidades alocadas está o veículo de número 12288643, foco da análise.

Concluindo, a carga com frete “9 Base” contendo apenas um veículo com obrigatoriedade de alocação foi criada pela dificuldade de se montar cargas ótimas, considerando todas as variáveis envolvidas, utilizando um processo subjetivo, sem o auxílio de nenhuma ferramenta de decisão.

Tabela 5.8– Composição e custo do frete da carga 18 da PLIM

Chassis	Data de Recebimento	Data de Embarque	Data Prometida de Entrega	Morfologia	Distância	Valor do Frete por Unidade
1219756	29/01/11	08/02/11	03/02/11	1,00	51	51
12118449	01/02/11	08/02/11	05/02/11	1,00	51	51
12118481	05/02/11	08/02/11	10/02/11	1,00	51	51
12119777	04/02/11	08/02/11	09/02/11	1,00	51	51
12270371	07/02/11	08/02/11	11/02/11	1,00	51	51
12271730	04/02/11	08/02/11	09/02/11	1,00	51	51
12275263	07/02/11	08/02/11	11/02/11	1,00	51	51
12275936	05/02/11	08/02/11	10/02/11	1,00	51	51
12288643	03/02/11	08/02/11	08/02/11	1,00	51	51

Fonte: próprio autor

O custo adicional referente ao envio do veículo 12288643 é o resultado da diferença entre o custo médio por veículo da carga com valor de frete “9 Base”, valor igual a R\$57,38 e da carga com valor do frete carreteiro, valor igual a R\$51,00, logo R\$6,38; por unidade transportada.

Considerando tais fatores, a alocação manual gerou valores de frete 12,5% maiores que aqueles obtidos pelo modelo matemático de PLIM.

Situações análogas à apresentada resultam nos menores valores de frete incorridos pela aplicação do modelo proposto, quando comparados aos valores obtidos pela alocação manual feita pelo funcionário da empresa.

5.3.2 Análise dos atrasos de entrega

Outra análise feita nos resultados da aplicação do modelo matemático mostra que a utilização do modelo exato pode significativamente reduzir o número de veículos entregues atrasados, como apresentado na Tabela 5.9. Para a instância “Socorro”, por exemplo, o número de veículos entregues em atraso foi reduzido de 108 para 0.

Tabela 5.9– Veículos entregues atrasados: alocação manual e PLIM

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Entregas atrasadas - alocação manual	52	27	10	108
Entregas atrasadas - alocação PLIM	6	1	0	0
Atraso médio - alocação manual (em dias)	1,63	2,67	1,70	2,49
Atraso médio - alocação PLIM (em dias)	1,33	1,00	0,00	0,00
Redução % frete	8,4%	14,1%	14,3%	15,6%

Fonte: próprio autor

Além de diminuir o número de veículos atrasados, a utilização do modelo exato foi capaz de reduzir os dias de atraso médio em até mais de 60%, como foi o caso da instância “Vale” cujo atraso médio foi reduzido de 2,67 dias para apenas 1,00 dia.

Uma análise comparativa mostra que quanto maior a redução percentual no valor do frete, também é maior a redução no número de veículos entregues atrasados, como apresentado no gráfico da Figura 5.1

Figura 5.1 – Redução percentual no valor do frete e nas entregas atrasadas

Fonte: próprio autor

Uma das possíveis razões para tal correlação pode ser o fato do modelo exato ser menor “míope”, ou seja, ter melhor visibilidade de todos os veículos com potencial para a minimização do custo.

Em outras palavras, com tantos veículos zero-quilômetro disponíveis para alocação, pode ser que o funcionário da empresa de transporte não consiga visualizar e comparar todos possíveis veículos candidatos a serem embarcados, tendo em vista as datas de embarque mais próximas.

Tamanha complexidade faz com que se trabalhe formando uma carga por vez, minimizando o frete de cada uma delas individualmente consideradas. Desta forma, pensa estar fazendo melhor escolha alocando veículos de períodos futuros quando, na verdade, está duplamente penalizando a operação: aumentando os valores de frete e o número de veículos entregues atrasados ao não alocar veículos com datas de obrigatoriedade mais próximas.

Logo, é possível perceber que a formação subjetiva das cargas pode acarretar em maior número de cargas com frete do tipo “9 Base” do que seria necessário formar para a entrega dos veículos disponíveis para embarque. Ainda, é possível perceber que gerenciar, ao mesmo tempo, o valor do frete e o número de veículos atrasados é tarefa demasiadamente complexa para funcionários que não se utilizam de nenhuma ferramenta computacional para auxiliá-los nas decisões de alocação.

É necessário salientar que sendo o modelo matemático um modelo mono objetivo, o fato das soluções encontradas também apresentarem reduzido número de veículos entregues atrasados e atraso médio em relação à alocação subjetiva feita pelo funcionário da empresa de transportes, isso não significa que esta melhoria ocorra em outras instâncias nas quais o modelo matemático seja aplicado.

5.3.3 Análise dos tempos de processamento

A fim de buscar entender qual ou quais das características das instâncias reais aplicadas ao modelo exato mais influenciam no aumento do tempo de processamento para a obtenção da solução ótima, é apresentado na Tabela 5.10 um resumo dos

principais aspectos de cada uma delas. Os tempos de processamento apresentados correspondem ao tempo de processamento do modelo matemático quando da utilização de computadores de grande porte, mais especificamente o cluster denominado NEOSERVER e já caracterizado na introdução deste capítulo.

Pela análise das características das instâncias e seus respectivos tempos de processamento, não é possível identificar nenhuma relação de causa efeito entre um determinado aspecto da instância solucionada do problema e seu respectivo tempo de resolução.

Tabela 5.10– Características das instâncias e tempo de processamento do modelo exato

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Período de avaliação - fevereiro 2011	7 a 12	7 a 12	7 a 12	14 a 19
Tempo de Processamento (s)	175	792	95	21
Maior tempo de processamento diário (s)	139	788	51	5
Data do maior tempo de processamento	12/02	12/02	10/02	12/02
Dia da semana do maior tempo de processamento	sábado	sábado	quinta-feira	sábado
Veículos a alocar na data	182	199	213	192
Distância média de entrega (km)	63	124	1205	101
Coeficiente de variação das distâncias	0,67	0,38	0,18	0,22
% de morfologias diferentes de V_{α}	10%	0%	3%	1%

Fonte: próprio autor

De forma exemplificada, para a instância “Vale”, aquela com maior tempo total de processamento (792 s), verifica-se que no dia de alocação com maior tempo de processamento (788 s), o dia 12 de fevereiro de 2011, estavam disponíveis 199 veículos. Comparando esse resultado com os obtidos para a instância “Sul”, tem-se que em 10 de fevereiro, 213 veículos foram alocados em 95 segundos, sendo a distância média de entrega dessa linha 1.205 quilômetros, bastante maior que a distância média daquela (124 quilômetros).

Utilizando como parâmetro de comparação a dispersão das distâncias de entrega das concessionárias dos grupos de veículos a serem alocados, tem-se que o coeficiente de variação das distâncias da instância “Santos”, igual a 0,67 é maior que o mesmo coeficiente da instância “Vale”, igual a 0,38. Entretanto, o tempo de processamento da instância “Santos” para sábado, dia 12 de fevereiro de 2011, foi bastante menor

que o tempo de processamento da instância “Vale”, para o mesmo dia 12 de fevereiro, contendo, praticamente, o mesmo número de veículos a serem alocados.

Como anteriormente apresentado, o coeficiente de variação é uma medida de dispersão padronizada, definida pela razão do desvio padrão pela média, sendo utilizada quando se deseja comparar a variação de conjuntos de observações que diferem na média (BARBETTA et al., 2004).

Outra análise que pode ser feita com os resultados apresentados na Tabela 5.10 trata do conjunto de tipos de morfologias existente em cada instância. Enquanto a instância “Vale” contém apenas veículos da morfologia V_p , a instância “Santos” apresenta 10% de outras de morfologias, cujas regras de formação de grupo são mais restritivas. Entretanto, não se pode dizer que instâncias com maior frequência de veículos de morfologia V_p , aquela com menor restrição de agrupamento, apresentam menores tempos de processamento.

Pelas análises dos resultados, uma plausível causa para dias de alocação com maiores tempos de processamento pode ser o fato do domingo influenciar o processo de decisão de alocação.

Clarificando, considere-se para análise as instâncias “Santos” e “Vale”. Para tais instâncias o dia de maior tempo de processamento foi o sábado e as distâncias médias de entrega dos veículos a elas pertencentes são, respectivamente, 63 e 124 quilômetros. Distâncias médias que podem ser percorridas em um dia de viagem do caminhão cegonha.

Logo, sabendo-se que os embarques podem ser feitos no mesmo dia da promessa de entrega, os veículos que no sábado têm $Dt^v = 1$ não seriam obrigatórios para alocação. Entretanto, como alocações não são feitas aos domingos, mesmo os veículos com $Dt^v = 1$ no sábado passam a ser obrigatórios. Caso tais veículos não sejam alocados no sábado, sua alocação poderá ocorrer somente na segunda-feira, quando não existe mais a possibilidade da entrega na data programada.

Essa situação faz com que no sábado o número de veículos com obrigatoriedade de entrega seja maior que em outros dias, aumentando o tempo de processamento do modelo exato para esse dia de alocação. A mesma situação aconteceu na instância “Sul”.

Para a instância “Socorro”, o dia de maior tempo de processamento aconteceu no início do período de avaliação, uma vez que é necessário enviar o grande número de veículos em estoque, recebidos antes das datas de avaliação.

Análises feitas nas datas de entrega dos veículos disponíveis mostraram que enquanto as instâncias “Santos”, “Vale” e “Sul” apresentam, em média, 15% dos veículos recebidos antes do primeiro dia de alocação sendo avaliado, a instância “Socorro” apresenta 24%. Ou seja, havia um grande número de veículos com obrigatoriedade de alocação na data inicial $t = 1$ do período de planejamento, como mostra a Tabela 5.11.

Tabela 5.11– Percentual dos veículos recebidos antes do período de avaliação

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Veículos recebidos antes período de avaliação	83	132	88	135
Número total de veículos considerados na instância	535	863	598	568
Percentual dos veículos antes do período	16%	15%	15%	24%

Fonte: próprio autor

Finalmente, tem-se o gráfico apresentado na Figura 5.2, construído a partir dos tempos de processamento das alocações diárias das 4 instâncias do problema. Para a construção do referido gráfico, não foram considerados os dias de maior tempo de processamento de cada instância, uma vez que distorceriam o objetivo desta análise: verificar a tendência de maiores tempos de processamento quanto maiores forem os grupos de veículos a serem alocados.

Assim, para as instâncias “Santos”, “Vale” e “Socorro”, o dia 12 de fevereiro não foi considerado para a construção do gráfico apresentado, assim como o tempo de processamento da instância “Sul” para o dia 10 do mesmo mês.

A disposição dos pontos no gráfico parece sugerir uma tendência de crescimento exponencial do tempo de processamento em relação ao número de veículos disponíveis para alocação, o que pode caracterizar um problema de natureza combinatória, com ordem de complexidade não-polinomial.

Figura 5.2– Tempo de processamento em razão do número de veículos disponíveis para alocação
Fonte: próprio autor

Todos os fatores considerados, redução percentual nos valores de frete, reduções no número de veículos entregues atrasados e aceitável tempo de processamento, pode-se concluir que o propósito do desenvolvimento de um modelo exato foi atingido. Foram obtidos resultados ótimos para serem utilizados como elementos de validação da proposta de solução para instâncias de grande porte, um algoritmo de busca local multi-início, apresentada mais adiante no capítulo 6.

5.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados da execução do modelo matemático desenvolvido para a resolução de quatro instâncias de pequeno porte do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil.

Tais execuções mostram que a complexidade existente para a resolução do problema advém de diversos fatores como, o número de veículos disponíveis para embarque, o método de cálculo do valor do frete no mercado brasileiro, as restrições de formação de agrupamento de tipos de morfologias, a dispersão das distâncias de entrega e a existência de veículos com diferentes datas de chegada e de obrigatoriedade de embarque.

Essa complexidade inerente do problema tratado nesta tese fez com que o modelo matemático proposto não fosse capaz de resolver instâncias de porte compatíveis com o volume de veículos alocados pela empresa de transportes num dia típico de sua operação.

Entretanto, com a utilização de computadores de alto desempenho, o modelo exato foi capaz de resolver instâncias pequenas do problema, apresentando resultados em aceitável tempo computacional.

Pelos resultados obtidos é possível notar que não apenas o valor do frete pode ser reduzido, mas também se pode aumentar o nível de serviço desta operação, pela redução do número de veículos entregues atrasados em comparação com a alocação manual.

A realização de múltiplos testes, com instâncias de portes maiores, indicou que não é possível obter soluções ótimas para instâncias com tamanho compatível com aqueles existentes no dia-a-dia da operação de transportes, seja utilizando computadores pessoais ou clusters de computadores de elevada capacidade computacional.

Capítulo 6

HEURÍSTICA DE BUSCA LOCAL MULTI-INÍCIO

Como visto anteriormente, a solução do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro tratado nesta tese busca obter combinação factíveis de veículos a serem alocados em caminhões cegonha, em um horizonte de planejamento preestabelecido, tal que essas formações resultem no menor valor de frete total pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha, autônomos que são contratados pelas mesmas para fazer o transporte desses veículos.

O primeiro método utilizado para a resolução do problema foi um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), cujos resultados de sua aplicação a várias instâncias foram apresentados no capítulo 4. Os resultados indicam que utilizando um modelo exato, não é possível obter soluções ótimas para instâncias com tamanho compatível com aqueles existentes no dia-a-dia da operação de transportes, seja utilizando computadores pessoais ou clusters de computadores de elevada capacidade computacional.

Portanto, é necessário considerar uma proposta de solução heurística, para a obtenção de resultados com qualidade aceitável e em tempo computacional reduzido para a solução de instâncias de grande porte, similares àquelas encontradas no dia-a-dia da operação da transportadora.

Neste capítulo é apresentada uma nova proposta de solução, uma heurística de busca local multi-início (*BLMI*), desenvolvida para resolver grandes instâncias do problema, em aceitável tempo de processamento. No capítulo seguinte serão apresentados os

resultados da aplicação da referida heurística às instâncias reais de pequeno e grande porte do problema.

6.1 Motivação

A heurística proposta nesta tese para a solução do problema foi inspirada na meta-heurística GRASP (do inglês "Greedy Randomized Adaptive Search Procedure") proposta por Feo e Resende (1989, 1995).

O GRASP é uma meta-heurística do tipo multi-início que gera de forma construtiva uma única solução inicial a cada iteração. A construção é feita por um procedimento guloso que busca selecionar os candidatos de melhor contribuição para a função de avaliação. A avaliação dos elementos através dessa função leva à criação de uma lista restrita de candidatos (LRC), formada por elementos de elite, aqueles cuja incorporação na solução parcial corrente resulta nos menores custos incrementais (CUNHA, 2006) - no caso de um problema de minimização. O processo de geração das soluções iniciais é aleatório, pois aleatoriamente seleciona um indivíduo pertencente a LRC para ser adicionado à solução em construção. Finalmente, é um procedimento adaptativo, já que todos os custos incrementais são recalculados a cada inserção de um indivíduo à solução (MARTI, 2003).

No GRASP, buscas locais são realizadas em cada uma das soluções iniciais geradas, na tentativa de melhorar a qualidade das respectivas funções de avaliação – dado que não necessariamente representam o valor de ótimo global para o problema (RESENDE E RIBEIRO, 2010) –, até que um número máximo de iterações ou tempo máximo de execução seja atingido.

Como mencionado, a heurística de busca local multi-início proposto nesta tese foi inspirada no GRASP, porém, uma vez que executa diferente sequência de etapas, não pode ser classificada como sendo exatamente uma heurística GRASP.

Para melhor entendimento, considere nesse momento a sucinta explicação de algumas características da heurística proposta, feita para clarificar as diferenças entre ela e o método GRASP.

Na heurística proposta nesta tese várias soluções são criadas e armazenadas para posterior escolha daquelas a serem melhoradas pela aplicação de buscas locais. De forma diferente, no GRASP cada solução criada é imediatamente submetida a procedimentos de busca local.

No processo de criação das soluções iniciais do GRASP existe uma lista restrita de candidatos, dentre os quais um indivíduo é escolhido de forma aleatória para ser inserido na solução em construção, de modo a inserir alguma diversidade no método guloso de construção da solução no qual o GRASP se baseia. Na heurística aqui proposta a diversidade nas soluções se dá pela escolha aleatória do primeiro veículo inserido em cada caminhão cegonha utilizado. O sorteio do primeiro veículo de carga considera todos os veículos disponíveis para alocação. Os próximos veículos a serem inseridos são escolhidos de forma gulosa.

Tais características fazem com que a heurística proposta nesta tese e apresentada mais detalhadamente na seção a seguir, não possa ser categorizada como uma do tipo GRASP, mas como uma de busca local multi-início que foi inspirada no GRASP, conforme detalhado a seguir.

6.2 Heurística de busca local multi-início

A lógica da heurística de busca local multi-início (BLMI) se baseia na execução do ciclo composto pelas etapas de geração de um número de soluções iniciais (*NSI*) e escolha de um conjunto de melhores soluções, sobre as quais procedimentos de buscas locais (*BL1* e *BL2*) são aplicados. Ao final das buscas locais, a solução com melhor valor na função de avaliação é guardada como uma candidata à solução do problema. Tal ciclo é repetido um determinado número de vezes (*RA*), gerando várias soluções candidatas, até que os critérios de parada sejam atingidos. Dentre as várias

soluções guardadas, seguindo regras de escolha predefinidas, uma delas é considerada a solução final (SF), resultado da aplicação da heurística.

Para a aplicação da heurística foi determinado o horizonte de planejamento (T) como sendo igual a 3 dias, uma vez que foi o valor de melhor resultado nas análises feitas para a aplicação do modelo matemático, conforme apresentado na seção 5.2. Os caminhões cegonha disponíveis para alocação são homogêneos em termos de capacidade de carga, no que diz respeito ao número de veículos (C), tal que $C = 11$ e ao número de morfologias (CM) que neles se pode carregar ($CM = 13,28$ morfologias).

O fluxograma apresentado na Figura 6.1 ilustra o funcionamento da heurística. Para mais fácil compreensão, tal fluxograma foi subdividido em cinco partes: leitura dos parâmetros, construção de soluções iniciais, melhoria das soluções, critério de parada e escolha da solução final. O pseudocódigo da heurística *BLMI* proposta é apresentado na Figura 6.2.

A heurística tem início com a leitura dos parâmetros: Replicação do Algoritmo (RA) Atraso Máximo Permitido (AMP), Horizonte de Planejamento (T), Semente (AL), Número Soluções Iniciais (NSI) e Número Soluções Escolhidas (NSE) e, logo em seguida, executando a verificação da Linha de Distribuição (ld) cujos veículos devem ser alocados, linhas 1 a 3 da Figura 6.2

Inicia-se então a etapa de construção de soluções iniciais – linhas 10 a 14 na Figura 6.2. Uma sub-rotina denominada “Construção de Soluções Iniciais” é utilizada para a construção de cada solução $SI^n \in SI$, o conjunto de soluções iniciais, até que o número de soluções criadas seja igual a NSI . A sub-rotina de “Construção de Soluções Iniciais” é apresentada na seção 6.3 a seguir.

A seleção das soluções iniciais de melhor qualidade, em número igual ao NSE , é executada da seguinte forma. Dentre todas as soluções iniciais SI^n , aquelas com o mesmo valor de frete total (FSI), e este o menor entre todos os observados no conjunto SI , são segregadas formando um conjunto de soluções candidatas SC , que

eventualmente serão submetidas aos procedimentos de busca local da heurística multi-início, tal que $SC := SC \cup SI^n / FSI^n = MFSI = \text{mínimo}(FSI^n)$ - conforme apresentado nas linhas 15 a 25 na Figura 6.2.

Figura 6.1– Fluxograma representativo da lógica dos procedimentos da heurística

Fonte: próprio autor

A seguir, a solução inicial com menor valor no parâmetro de avaliação de atraso, o atraso total elevado ao cubo, no conjunto SC criado é atribuída a um conjunto de soluções escolhidas SE que de fato serão submetidas às buscas locais propostas para o algoritmo.

O valor do atraso total elevado ao cubo foi considerado, pois outras formulações não retratavam o benefício das trocas entre dois veículos de cargas diferentes.

A Tabela 6.1 mostra um exemplo no qual um veículo com atraso de 4 dias alocado originalmente no caminhão de número 1 é avaliado para a troca com outro veículo, pertencente ao caminhão de número 2, este com 3 dias de atraso – valores destacados na cor vermelha na tabela.

Rotina Principal	
1	Defina Semente de Número Aleatório (AL), Horizonte de Planejamento (T), Número de Soluções Iniciais (NSI), Número de Soluções Escolhidas (NSE), Atraso Máximo Permitido (AMP), Replicações do Algoritmo (RA)
2	Para toda linha de distribuição faça
3	Para todo atraso máximo (AM) entre 0 e AMP faça
4	Para toda replicação (R) entre 1 e RA faça
5	Leia lista de veículos disponíveis
6	Conta número de veículos obrigatórios ($Dt_v=0$)
7	Inicializa com vazio conjunto das soluções iniciais ($SI:=\emptyset$)
8	Inicializa com vazio conjunto das soluções escolhidas ($SE:=\emptyset$)
9	Inicializa com vazio conjunto das melhores soluções escolhidas ($MSE:=\emptyset$)
10	Enquanto número de soluções iniciais $\leq$ NSI faça
11	Cria solução inicial
12	Adiciona solução inicial a SI
13	Incrementa número de soluções iniciais
14	Fim Enquanto
15	Para todas as soluções iniciais criadas faça
16	Enquanto soluções escolhidas $\leq$ NSE faça
17	Identifica menor valor de frete entre soluções iniciais
18	Seleciona soluções iniciais com frete igual ao menor valor de frete
19	Identifica menor valor de atraso total ao cubo entre as soluções selecionadas de menor valor de frete
20	Seleciona a primeira solução da lista de selecionadas cujo atraso total ao cubo é igual ao menor valor de atraso total ao cubo
21	Adiciona a solução selecionada ao conjunto de soluções escolhidas SE
22	Remove as soluções iniciais com frete igual ao menor valor de frete do conjunto de soluções iniciais
23	Incrementa soluções escolhidas
24	Fim Enquanto
25	Para toda solução escolhida de SE faça
26	Executa Busca Local 1 na solução escolhida
27	Executa Busca Local 2 na solução escolhida
28	Fim Para
29	Identifica o menor valor de frete entre soluções escolhidas
30	Seleciona soluções escolhidas com frete igual ao menor valor de frete
31	Identifica menor valor de atraso total ao cubo entre as soluções selecionadas de menor valor de frete
32	Seleciona a primeira solução da lista de soluções escolhidas cujo atraso total ao cubo é igual ao menor valor de atraso total ao cubo
33	como melhor solução da replicação R com atraso máximo AM (MSE_R^{AM})
34	Adiciona MSE_R^{AM} ao conjunto de melhores soluções MSE
35	Para todo caminhão de MSE_R^{AM} faça
36	Identifica maior valor de atraso entre os veículos
37	Se o maior atraso é maior ou igual a AMP então
38	Libera caminhão para entrega
39	Remove veículos da lista de disponíveis para alocação
40	Senão
41	Remove um dia da data limite para embarque de cada veículo
42	Fim Se
43	Fim Para
44	Fim Para
45	Fim Para
46	Fim Para
47	Solução final (SF) é a solução de MSE com maior frequência de valor de frete, maior frequência de menor número de veículos atrasados e menor tempo de processamento
48	Imprima características de cada veículo da solução final
49	Fim Para

Figura 6.2– Pseudocódigo da rotina principal da heurística de busca local multi-início
Fonte: próprio autor

Como se pode notar na referida tabela, considerando a simples soma dos dias de atraso dos veículos contidos nas cargas ou considerando a soma dos dias de atraso dos veículos elevados ao cubo, tais resultados não se alteram nas situações antes e depois da troca, permanecendo em 18 e 144 respectivamente. Apenas a opção soma dos dias de atraso elevada ao cubo capturava o benefício da troca, levando a uma redução nos dias de atraso das cargas consideradas.

Ainda, ao se elevar os valores ao cubo, se penaliza mais os valores mais altos, considerando que maiores atrasos são mais prejudiciais à transportadora.

Tabela 6.1 – Comparação dos resultados das opções de índice de atraso consideradas

Formulações consideradas	Caminhão	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Total	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Total
	Valores antes da troca					Valores depois da troca					
Soma dos dias de atraso	1	4	3	2	1	10	3	3	2	1	9
	2	1	2	3	2	8	1	2	4	2	9
	Total					18					
Dias de atraso elevados ao cubo e somados	1	64	27	8	1	100	27	27	8	1	63
	2	1	8	27	8	44	1	8	64	8	81
	Total					144					
Soma dos dias de atraso elevada ao cubo	1	4	3	2	1	1000	3	3	2	1	729
	2	1	2	3	2	512	1	2	4	2	729
	Total					1512					

Este procedimento de obtenção de soluções escolhidas para aplicação das sub-rotinas de buscas locais é executado até que o conjunto SE tenha soluções em quantidade igual ao valor do parâmetro NSE , estabelecido na inicialização da heurística – apresentada na página 131.

Em seguida, todas as soluções escolhidas e alocadas ao conjunto SE são submetidas a dois processos de busca local ($BL1$ e $BL2$) sequenciais e independentes entre si. Enquanto a $BL1$ faz trocas entre veículos alocados em diferentes caminhões com vistas à redução do valor de frete total da solução (FSE^n), a $BL2$ executa trocas com o objetivo de reduzir o número de dias de atraso dessa solução, utilizando o parâmetro atraso ao cubo da solução escolhida ($ACSE^n$) - linhas 26 a 29 na Figura 6.2. Os procedimentos executados em cada uma dessas sub-rotinas são detalhados nas subseções a seguir deste capítulo.

Depois da aplicação sequencial das buscas locais em todas as soluções escolhidas, aquela com menor valor de frete de solução escolhida ($MFSE_R^{AM}$) - e no caso de mais de uma solução ter o mesmo valor de frete total, aquela que apresentar o menor valor do cubo da soma dos atrasos ($MACSE_R^{AM}$) é denominada como a “melhor solução escolhida da replicação R sob atraso máximo AM ” (MSE_R^{AM}). Tal solução é inserida no conjunto de “Melhores Soluções escolhidas” (MSE) – linhas 30 a 34 da Figura 6.2.

Para cada melhor solução escolhida e para cada caminhão, admite-se como máximo atraso (MA^j) o maior valor de atraso dentre os veículos (A^v) nele contidos.

Todos os caminhões cujo máximo atraso (MA^j) é igual ou maior que o atraso máximo permitido (AMP), ou seja, $MA^j \geq AMP$, e frete total (Ft^j) é igual ao frete do tipo carreteiro ($Ft^j = \sum_{v \in j} f \cdot Mor f^v \cdot D^v$) são despachados. Os veículos contidos nesses caminhões são removidos do conjunto de veículos disponíveis para alocação ($V := V - v$) e aqueles veículos contidos nos caminhões que não satisfazem as condições de atraso e tipo de frete têm o tempo remanescente para alocação reduzido em uma unidade ($Dt^v = Dt^v - 1$) – linhas 35 a 43 na Figura 6.2.

Desta forma, admitindo-se uma linha de distribuição ld qualquer, cujo atraso máximo permitido AMP é igual a 2 dias e o número de replicações do algoritmo RA seja igual a 3 dias, nove soluções MSE_R^{AM} são selecionadas para a fase da definição da solução final do algoritmo. Isso porque são 3 replicações $R = (1,2,3)$, para cada atraso máximo permitido, tal que $AM = (0,1,2)$, totalizam 9 melhores soluções escolhidas MSE_R^{AM} .

Como anteriormente mencionado, outro critério de parada é o atraso máximo permitido (AMP). Tal valor determina o número de dias de atraso máximo (AM) aceitável em cada replicação, tal que $0 \leq AM \leq AMP$. Assim, quando $AMP = 2$ a heurística executará replicações com $AM = (0,1,2)$.

Quando o número de soluções MSE_R^{AM} , determinado pelos valores de AM e R , for atingido, se encerra a execução dos ciclos de geração e melhoria de soluções e a heurística inicia a fase de “Definição da solução final”, última fase do fluxograma apresentado na Figura 6.1.

A definição da solução final (SF) da heurística se dá pela seleção da solução MSE_R^{AM} que tenha o valor de frete mais frequente dentre todas as soluções MSE_R^{AM} , cujo número de veículos entregues atrasados seja o menor dentre essas soluções.

Caso exista mais de uma solução com tais características, aquela com o menor tempo de processamento é admitida como solução final (SF) do algoritmo – linhas 47 na Figura 6.2. O tempo de processamento da replicação é um critério de pouca relevância, mas é necessário para a escolha de uma única solução final da heurística $BLMI$.

6.3 Criação das soluções iniciais

Após sua inicialização, a heurística é executada para cada linha de distribuição $ld \in LD$ separadamente, variando o parâmetro AM tal que $0 \leq AM \leq AMP$ para cada replicação (R), tal que $0 \leq R \leq RA$.

Como apresentado no fluxograma da Figura 6.1, cada replicação começa com a etapa de construção das soluções iniciais. O funcionamento da rotina de criação das soluções iniciais é apresentado no fluxograma da Figura 6.4, cujo respectivo pseudocódigo reduzido se encontra na Figura 6.3**Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Algoritmo de Solução Inicial	
1	Para lista veículos disponíveis faça
2	Executa sub-rotina de ordenação de veículos e cálculo do número de caminhões
3	Executa sub-rotina escolha aleatória do primeiro veículo de cada caminhão
4	Executa sub-rotina inclusão de veículo à solução em construção
5	Executa sub-rotina cálculo frete e índice de atraso
6	Fim Para
7	Retorna Solução Inicial (SI)

Figura 6.3– Pseudocódigo reduzido do algoritmo de construção de soluções iniciais

Fonte: próprio autor

Na primeira etapa da criação das soluções iniciais, os veículos V da linha ld disponíveis para alocação no dia da execução do algoritmo são lidos de uma base de dados, como apresentado na linha 1 na Figura 6.3**Erro! Fonte de referência não encontrada..** Esses veículos são utilizados para a construção de um número NSI de soluções iniciais, que agrupadas formam o conjunto de soluções iniciais SI , tal que $SI^n \in SI \forall n = (0, \dots, NSI)$.

A fim de considerar a criticidade dos veículos quanto às datas de entrega prometida, a heurística proposta divide os veículos disponíveis para embarque em dois subgrupos mantidos em sequência. O primeiro subgrupo é formado por veículos cuja obrigatoriedade de embarque acontece dentro do horizonte de planejamento T e o segundo é composto por veículos cuja obrigatoriedade de embarque é posterior a esse período.

Os veículos pertencentes a cada um desses grupos são ordenados primeiramente em ordem crescente quanto a seu valor de morfologia (P^v) multiplicado pela distância entre o centro de consolidação e sua respectiva concessionária de destino (D^v) e, na sequência, em ordem crescente do número de dias até sua obrigatoriedade de embarque (Dt^v) dentro de cada subgrupo de distâncias ordenadas. Tais ordenações são apresentadas nas linhas 1 a 4 na Figura 6.5.

Figura 6.4– Fluxograma representativo da lógica de construção das soluções iniciais
Fonte: próprio autor

Na sequência, é calculado o número de caminhões disponíveis para alocação dos veículos no horizonte de planejamento, de acordo com a expressão (4) e descrição do procedimento na linha 5 na Figura 6.5.

Algoritmo de Solução Inicial – sub-rotina de ordenação de veículos e cálculo do número de caminhões	
1	Ordena em ordem crescente de morfologia * distância a lista de veículos cujo embarque deve ser antes do horizonte de planejamento T, inclusive
2	Ordena em ordem crescente de dias até obrigatoriedade de embarque a lista de veículos cujo embarque deve ser antes do horizonte de planejamento T, inclusive
3	Ordena em ordem crescente de morfologia * distância a lista de veículos cujo embarque deve ser após o horizonte de planejamento T, exclusive
4	Ordena em ordem crescente de dias até obrigatoriedade de embarque a lista de veículos cujo embarque deve ser após o horizonte de planejamento T, exclusive
5	Calcula o número de caminhões disponíveis para formação das cargas igual ao maior número inteiro menor que a o quociente do número de veículos cujo embarque deve ser antes do horizonte de planejamento T, inclusive, dividido por 9

Figura 6.5– Pseudocódigo da sub-rotina de ordenação de veículos e cálculo do número de caminhões
Fonte: próprio autor

O início do processo de alocação de cargas se dá pela seleção aleatória de um veículo disponível para embarque para cada caminhão cegonha, ainda vazio, disponível para carregamento, como mostra o pseudocódigo apresentado na Figura 6.6. A seleção aleatória do primeiro veículo cria a diversidade de soluções e caracteriza a heurística multi-início.

Algoritmo de Solução Inicial – sub-rotina da escolha aleatória do primeiro veículo de cada caminhão	
1	Para cada caminhão faça
2	Escolha aleatoriamente um veículo da lista de disponíveis
3	Insira o veículo no caminhão
4	Remova o veículo da lista de disponíveis para alocação
5	Estabelece frete_medio
6	Fim Para

Figura 6.6– Pseudocódigo da sub-rotina da escolha aleatória do primeiro veículo de cada caminhão
Fonte: próprio autor

Assim, considere AL um número aleatório variando entre 1 e o número total de veículos disponíveis para alocação V^t ($0 \leq t \leq T$), cuja semente é estabelecida na inicialização do algoritmo principal (Figura 6.1). Tal valor AL é utilizado no sorteio do primeiro veículo a ser alocado a cada caminhão cegonha disponível.

Desta forma, para cada caminhão cegonha criado, um veículo $v \in V^t / 0 \leq t \leq T$ é sorteado e alocado a ele. Logo, para cada solução criada são sorteados veículos na mesma quantidade de caminhões cegonha disponíveis (J), tal que há garantia de que as cargas de cada solução são inicializadas de forma diferente, satisfazendo o critério de aleatoriedade da heurística multi-início, como apresentado no pseudocódigo da Figura 6.6

Depois que todas as cargas têm um primeiro veículo nelas alocado, o valor do frete de transporte do veículo a ele atribuído ($f \cdot Morf^v \cdot D^v$) é associado à variável de valor de frete médio de cada caminhão (FM^j) – linha 5 na Figura 6.6

Na sequência, toma-se o primeiro veículo da lista ordenada de veículos e calcula-se a diferença entre o valor do frete do veículo ($f \cdot Morf^v \cdot D^v$) e o valor do frete médio de cada caminhão ($FM^j = \frac{\sum_{v \in j} D^v \cdot Morf^v}{|v|}$, $\forall v \in j$), atribuindo-se esse valor à variável DFM_v^j (diferença entre o frete médio do caminhão j e o veículo v), que representa, em outras palavras, o valor do frete incremental do veículo v sob a hipótese de alocação ao caminhão j (linhas 3 a 6 na Figura 6.7).

Algoritmo de Solução Inicial – sub-rotina da inclusão de veículo à solução em construção	
1	Enquanto criterio_parada=falso faça
2	Seleciona o primeiro veículo da lista ordenada v'
3	Para cada caminhão faça
4	frete_medio = soma da distância multiplicada pela morfologia equivalente de cada veículo dividido pelo número de veículos do caminhão
5	Calcula a diferença entre o frete do veículo v' (morfologia equivalente multiplicada pela distância) e frete_medio do caminhão
6	Fim Para
7	Estabelece menor_diferenca=0
8	Enquanto houver veículos na lista ordenada ou menor_diferenca $\neq \infty$ faça
9	Seleciona caminhão j' com respectiva menor diferença entre frete do veículo v' e frete_medio de cada caminhão
10	Se restrições de morfologia do caminhão j' são atendidas pela inserção do veículo v' então
11	Adiciona veículo v' ao caminhão j'
12	Remove v' da lista ordenada de veículos
13	Senão
14	Estabelece menor_diferenca = ∞
15	Fim Se
16	Fim Enquanto
17	Se não houver veículos na lista ordenada ou menor_diferenca = ∞ então
18	Estabelece criterio_parada = verdadeiro
19	Fim Se
20	Fim Enquanto

Figura 6.7– Pseudocódigo da sub-rotina inclusão de veículo à solução em construção

Fonte: próprio autor

A seguir, identifica-se o menor valor da diferença (*MDFM*) dos valores de frete e procede-se a verificação da possibilidade de alocação do respectivo veículo ao caminhão a que se refere esse menor valor calculado, conforme critérios de viabilidade de formação da carga em termos de número de morfologias e veículos – linha 10 a 13 na Figura 6.7. Tais critérios são os mesmos apresentados nas seções 3.4 e 3.6 do capítulo 3 e mais uma vez detalhado na seção 6.4, a qual apresenta a lógica dos procedimentos da busca local 1.

Caso a alocação do veículo seja viável ao satisfazer aqueles critérios de inserção do veículo à carga, ele é alocado ao respectivo caminhão e as características da carga são atualizadas em termos de valor de frete ($Ft^j = \text{máximo} (\sum_{\{v \in j\}} f \cdot Morf^v \cdot D^v; 9 \cdot D^v \cdot 1)$), número de veículos e de morfologias alocadas a carga em formação.

Caso contrário, caso não se possa alocar o veículo à carga de menor diferença de frete, como mostra a linha 14 na Figura 6.7, identifica-se o caminhão com a segunda menor diferença entre o valor do frete do veículo sendo considerado para alocação e o valor do frete médio da carga. O procedimento de verificação de viabilidade de alocação é novamente executado em termos das condições de quantidade de veículos e morfologia, procedendo-se à alocação ou não do veículo.

O processo de escolha de um caminhão e verificação de viabilidade da carga é executado até que o veículo seja alocado a um dos caminhões existentes, removendo-o da lista ordenada e seguindo para o próximo veículo dessa lista. Se não for verificada a factibilidade de alocação de um veículo, depois que todos os caminhões foram avaliados, este é deixado de ser alocado e toma-se o segundo veículo da lista ordenada.

O procedimento de tentativa de alocação de veículos através da verificação de factibilidade da carga é executado até que toda a lista de veículos seja percorrida uma única vez, ou enquanto houver capacidade de carga disponível nos caminhões disponíveis para alocação - linhas 17 e 19 na Figura 6.7.

A cada veículo da lista ordenada alocado, o valor do frete médio dos caminhões é atualizado e recalcula-se a diferença entre o frete médio dos caminhões e o frete do primeiro veículo da lista ordenada ainda a ser alocado - a variável DFM_v^j , tal sequência de etapas é apresentada na sub-rotina inclusão de veículo à solução em construção.

Um índice utilizado para a avaliação dos dias de atraso dos veículos alocados em uma solução é igual ao valor da soma dos atrasos de cada veículo alocado à carga elevado ao cubo $(\sum_{v \in j} A^v)^3 \forall j \in J$, denominado atraso ao cubo da solução candidata (*ACSC*) - linha 3 na Figura 6.8.

Algoritmo de Solução Inicial -sub-rotina cálculo frete e índice de atraso	
1	Para cada caminhão faça
2	Calcula frete igual ao maior valor entre a soma da morfologia multiplicada pela distância dos veículos e o maior valor de distância multiplicada por nove
3	Calcula a soma do atraso dos veículos (diferença entre a data limite de entrega e o dia de alocação) elevada ao cubo
4	Adiciona caminhão à Solução Inicial (SI)
5	Adiciona soma de atraso ao cubo do caminhão à soma do atraso dos veículos elevada ao cubo da solução Inicial
6	Adiciona frete do caminhão ao frete da solução inicial
7	Fim Para

Figura 6.8– Pseudocódigo da sub-rotina cálculo frete e índice de atraso

Fonte: próprio autor

Assim, a solução inicial SI^n é obtida com as cargas formadas, seu respectivo valor de frete FSI^n é igual à soma dos valores de frete das cargas criadas, e calcula-se o cubo da soma dos atrasos de cada caminhão ($SAC^j = (\sum_{v \in j} A^v)^3$, em que A^v é o atraso do veículo), as quais são atribuídas à variável “Atraso ao Cubo da Solução Inicial” ($ACSI^n$) – linhas 1 a 7 na Figura 6.8.

Tal variável *ACSI* é utilizada como uma das funções de avaliação nos procedimentos de busca local.

6.4 Heurística de busca local por valor de frete (busca local 1 – BL1)

As buscas locais por soluções com menores valores de frete foram elaboradas considerando a troca de veículos entre duas cargas de uma solução corrente, como mostra o fluxograma da Figura 6.9 e o pseudocódigo apresentado na Figura 6.10.

São definidas as notações a seguir para a análise dos fluxogramas e dos pseudocódigos que representam os procedimentos de busca local 1 e busca local 2.

M	-	um número real positivo suficientemente grande
DFC	-	o conjunto de diferença do valor do frete entre caminhões
$DACC$	-	o conjunto das diferenças entre os atrasos ao cubo dos caminhões
NT	-	o índice da troca
$MRFT$	-	a maior redução no frete total decorrente de trocas entre veículos
$MRAT$	-	a maior redução no atraso total do caminhão decorrente de trocas entre veículos

A rotina de busca local 1 tem início com uma das soluções escolhidas (linhas 2 a 4 no pseudocódigo), provenientes da etapa de construção das soluções iniciais. Essa solução escolhida passa a ser a solução corrente da busca local e seu valor de frete FSE^n é denominado o valor do frete da solução corrente (FSC), como mostra a linha 5 na Figura 6.10.

Dado um caminhão nessa solução corrente, são realizadas trocas virtuais pareadas entre todos os seus veículos e todos os veículos dos demais caminhões da solução, tal que a troca efetivamente realizada entre pares de veículos é aquela que resulta na maior redução do valor de frete total ($MRFT$) e que mantenha a factibilidade das cargas.

Figura 6.9– Fluxograma representativo do procedimento de busca local 1 aplicada às soluções escolhidas
Fonte: próprio autor

Procedimento de Busca Local 1	
1	Para Solução Escolhida (SE) faça
2	frete_BL1 = ∞
3	frete_solucão_escolhida = soma do frete dos caminhões da Solução Escolhida (SE)
4	Enquanto frete_BL1 > frete_solucão_escolhida faça
5	Estabelece frete_BL1 = frete_solucão_escolhida
6	Inicializa lista_frete_trocas := $\emptyset$
7	Para cada caminhão j_1 da solução escolhida faça
8	Para cada veículo v_1 do caminhão j_1 faça
9	Para cada caminhão j_2 da solução escolhida faça
10	Se caminhão j_2 é diferente de caminhão j_1 então
11	Para cada veículo v_2 do caminhão j_2 faça
12	Cria caminhão auxiliar j_1'
13	Cria caminhão auxiliar j_2'
14	Adiciona todo veículo de j_1 a j_1' à exceção de v_1
15	Adiciona todo veículo de j_2 a j_2' à exceção de v_2
16	Estabelece troca_realizada_1 = falso
17	Estabelece troca_realizada_2 = falso
18	Se restrições de morfologia do caminhão j_1' são atendidas pela inserção do veículo v_2 então
19	Adiciona veículo v_2 ao caminhão j_1'
20	Calcula frete de j_1' igual ao maior valor entre a soma da morfologia multiplicada pela distância dos veículos e o maior valor de distância multiplicada por nove
21	Calcula a soma do atraso dos veículos (diferença entre a data limite de entrega e o dia de alocação) elevada ao cubo de j_1'
22	troca_realizada_1 = verdadeiro
23	Fim Se
24	Se restrições de morfologia do caminhão j_2' são atendidas pela inserção do veículo v_1 então
25	Adiciona veículo v_1 ao caminhão j_2'
26	Calcula frete de j_2' igual ao maior valor entre a soma da morfologia multiplicada pela distância dos veículos e o maior valor de distância multiplicada por nove
27	Calcula a soma do atraso dos veículos (diferença entre a data limite de entrega e o dia de alocação) elevada ao cubo de j_2'
28	troca_realizada_2 = verdadeiro
29	Fim Se
30	Estabelece frete_auxiliar=0
31	Se troca_realizada_1 = verdadeiro e troca_realizada_2 = verdadeiro então
32	Calcula frete_auxiliar = (frete de j_1' + frete de j_2') – (frete de j_1 + frete de j_2)
33	Atualiza lista_frete_trocas := lista_frete_trocas U frete_auxiliar
34	Fim Se
35	Estabelece troca_efetivada=falso
36	Enquanto lista_frete_trocas $\neq \infty$ e troca_efetivada=falso faça
37	índice_menor_frete = posição do menor valor da lista_frete_trocas
38	Se lista_frete_trocas[índice_menor_frete] < 0 então
39	Remove j_1 e j_2 da Solução Escolhida
40	Adiciona j_1' e j_2' referente ao menor valor da lista_frete_trocas à Solução Escolhida (SE)
41	Subtraia (frete de j_1 + frete de j_2) do frete Solução Escolhida (SE)
42	Soma (frete de j_1' + frete de j_2') ao frete Solução Escolhida (SE)
43	Subtraia (soma de atraso ao cubo de j_1 + soma de atraso ao cubo de j_2) da soma de atraso ao cubo Solução Escolhida (SE)
44	Adiciona (soma de atraso ao cubo de j_1' + soma de atraso ao cubo de j_2') à soma de atraso ao cubo Solução Escolhida (SE)
45	Estabelece troca_efetivada = verdadeiro
46	Estabelece frete_solucão_escolhida = soma atualizada do frete dos caminhões da Solução Escolhida (SE)
47	Senão
48	Remove lista_frete_trocas[índice_menor_frete]
49	Fim Se
50	Fim Enquanto
51	Fim Para
52	Fim Se
53	Fim Para
54	Fim Para
55	Fim Para
56	Fim Enquanto
57	Fim Para

Figura 6.10– Pseudocódigo do procedimento de busca local 1Fonte: próprio autor

Seja $j_1 \in J$ um caminhão do conjunto de cargas da solução corrente e um veículo $v_1 \in j_1$. Para todo caminhão $j_2 \in J \setminus \{j_1\}$ são criadas réplicas (j'_1 e j'_2) e inseridos os veículos pertencentes a cada uma delas como na solução corrente, respectivamente, à exceção do veículo $v_1 \in j_1$ e de um veículo $v_2 \in j_2$, como apresentado nas linhas 12 a 15 na Figura 6.10.

Na sequência, a troca virtual entre os veículos é realizada tal que $j'_1 = j'_1 \cup v_2$ e $j'_2 = j'_2 \cup v_1$, executando-se um procedimento de verificação da factibilidade das cargas em termos de morfologia e número total de veículos. Se os caminhões resultantes (j'_1 e j'_2) forem viáveis, eles tornam-se candidatos à troca do veículo v_1 , caso contrário são descartados (linhas 18 a 23 e 25 a 29 na Figura 6.10).

O procedimento de Verificação de Trocas, caracterizado por “VERIFICA TROCA (v, j)” tem como parâmetro de entrada um veículo v e um caminhão j , cujo propósito é avaliar a viabilidade da inserção do veículo na carga, mediante as configurações de morfologia possíveis e o número de veículos no caminhão, conforme pseudocódigo apresentado na Figura 6.11.

A rotina de Verificação de Trocas tem por finalidade verificar se todas as restrições que tratam de agrupamentos de veículos são respeitadas, em termos de tipos e quantidades de morfologias que se pode alocar em um mesmo caminhão cegonha.

Procedimento de Verificação de Trocas	
1	INSERE VEICULO (v, j)
2	Se ($ V_{gg}^j = 0$ e $P^v = 2,0$ e $\sum_{v' \in j} P^{v'} + P^v \leq 13,28$ e $ j + 1 \leq 10$) ou
3	($ V_m^j < 8$ e $P^v = 1,30$ e $\sum_{v' \in j} P^{v'} + P^v \leq 13,28$ e $ j + 1 \leq 11$) ou
4	($ V_g^j < 6$ e $P^v = 1,57$ e $\sum_{v' \in j} P^{v'} + P^v \leq 13,28$ e $ j + 1 \leq 11$) ou
5	($ V_p^j < 11$ e $P^v = 1,00$ e $\sum_{v' \in j} P^{v'} + P^v \leq 13,28$ e $ j + 1 \leq 11$) então
6	$j := j \cup v$
7	Calcule $Ft^j = \text{máximo}(\sum_{v' \in j} f \cdot \text{Morf}^{v'} \cdot D^{v'}; 9 \cdot D^v \cdot 1)$ e $SAC^j = (\sum_{v' \in j} A^{v'})^3$
8	$TR = \text{verdadeiro}$
9	Fim Se
10	Retorna TR

Figura 6.11– Pseudocódigo do procedimento de Verificação de Trocas

Fonte: próprio autor

Se a factibilidade do caminhão for verificada essa rotina retorna um valor de variável TR igual a “*verdadeiro*” se a troca for possível, senão retorna “*falso*” caso a carga não seja factível.

A rotina de verificação de trocas atualiza a solução corrente caso as duas cargas envolvidas na troca resultem em uma solução de melhor qualidade (redução de custo) desde que ambos os caminhões sejam factíveis do ponto de vista de morfologia e quantidade de veículos alocados.

Se as variáveis binárias de trocas realizadas (TR_1 e TR_2) foram ambas iguais a verdadeiro, então o conjunto de diferença de frete dos caminhões (DFC) é ajustado com um valor referente à diferença dos fretes dos caminhões antes e depois da troca.

Os procedimentos de troca virtual e verificação de factibilidade quanto à $v_1 \in j_1$ são executados para todos os veículos $v_2 \in j_2$ dado que $j_2 \in J \setminus \{j_1\}$. A troca efetivamente realizada é aquela que resulta na maior diferença entre a soma do frete inicial de j_1 e j_2 e a soma do frete das cargas j'_1 e j'_2 após a troca, ou seja, aquela de maior redução no frete total da solução ($MRFT$), desde que essa diferença resulte em redução de frete (linhas 21 a 26 na Figura 6.10).

Sob essas circunstâncias, a n -ésima solução escolhida SE^n é atualizada, removendo-se os caminhões originais (j_1 e j_2), adicionando-se os caminhões atualizados (j'_1 e j'_2), atualizando o frete (FSE^n) e o cubo da soma dos atrasos ($ACSE^n$) da solução, como mostram as linhas 31 a 34 na Figura 6.10.

O processo de trocas é realizado sequencialmente para todo veículo $v_1 \in j_1$ e todo caminhão $j_1 \in J$ da solução corrente (linhas 36 a 50 na Figura 6.10).

6.5 Heurística de busca local por redução de atraso (busca local 2 – BL2)

De forma análoga aos procedimentos do algoritmo de busca local para a redução do valor total do frete, a heurística de busca local para a redução do índice de atraso avalia todas as trocas de veículos entre cargas formadas para cada solução escolhida SE^n . Entretanto, diferentemente da avaliação do frete total da solução feita pela BL1, esta busca local analisa possíveis reduções nos dias de atraso para a entrega dos veículos alocados. O fluxograma da Figura 6.12 e o pseudocódigo na Figura 6.13, apresentam a sequência de etapas e passos da heurística.

As buscas locais por soluções com menores atrasos de entrega dos veículos foram elaboradas considerando a troca de veículos entre duas cargas de uma solução corrente.

O procedimento de busca local 2 – BL2 tem início com uma das soluções escolhidas provenientes da etapa de construção das soluções iniciais que já foi submetida ao procedimento do algoritmo de busca local 1. Naquele procedimento, a solução escolhida SE^n é denominada solução corrente da busca local 2 e tem uma medida de mérito que caracteriza o atraso da solução, denominada “Atraso ao Cubo da Solução Escolhida SE^n ” ($ACSE^n$) – linha 3 na Figura 6.13. O valor de $ACSE^n$ é calculado pelo cubo da soma dos atrasos dos veículos (A^v) de um j -ésimo caminhão (SAC^j), para todos os caminhões que compõem essa solução.

Dado um caminhão nessa solução corrente, são realizadas trocas virtuais pareadas entre todos os seus veículos e os veículos dos demais caminhões da solução, tal que para cada veículo considerado, dentre todas as possíveis trocas com redução no valor do atraso ao cubo, já explicado na seção 6.2, a troca efetivamente realizada entre pares de veículos é aquela que resulta na maior redução do atraso total ao cubo ($MRAT$) da solução, calculado pelo cubo da soma dos atrasos, mantendo a factibilidade das cargas, sem aumentar o valor do frete total da solução.

Figura 6.12– Fluxograma representativo da lógica da busca local 2 aplicada a cada solução
Fonte: próprio autor

Procedimento de Busca Local 2	
1	Para Solução Escolhida (SE) faça
2	atraso_cubo_BL2 = ∞
3	atraso_cubo_solucao_escolhida = soma dias de atraso ao cubo dos veículos dos caminhões da (SE)
4	Enquanto atraso_cubo_BL2 > atraso_cubo_solucao_escolhida faça
5	Estabelece atraso_cubo_BL2 = atraso_cubo_solucao_escolhida
6	Inicializa com vazio lista_frete_trocas ($:= \emptyset$)
7	Inicializa com vazio lista_atraso_trocas ($:= \emptyset$)
8	Para cada caminhão j_1 da solução escolhida faça
9	Para cada veículo v_1 do caminhão j_1 faça
10	Para cada caminhão j_2 da solução escolhida faça
11	Se caminhão j_2 é diferente de caminhão j_1 então
12	Para cada veículo v_2 do caminhão j_2 faça
13	Cria caminhão auxiliar j_1'
14	Cria caminhão auxiliar j_2'
15	Adiciona todo veículo de j_1 a j_1' à exceção de v_1
16	Adiciona todo veículo de j_2 a j_2' à exceção de v_2
17	Estabelece troca_realizada_1 = falso
18	Estabelece troca_realizada_2 = falso
19	Se restrições de morfologia do caminhão j_1' são atendidas pela inserção do veículo v_2 então
20	Adiciona veículo v_2 ao caminhão j_1'
21	Calcula frete de j_1' igual ao maior valor entre frete carreteiro e frete "9 Base"
22	Calcula a soma do atraso dos veículos elevada ao cubo de j_1'
23	Estabelece troca_realizada_1 = verdadeiro
24	Fim Se
25	Se restrições de morfologia do caminhão j_2' são atendidas pela inserção do veículo v_1 então
26	Adiciona veículo v_1 ao caminhão j_2'
27	Calcula frete de j_2' igual ao maior valor entre frete carreteiro e frete "9 Base"
28	Calcula a soma do atraso dos veículos elevada ao cubo de j_2'
29	Estabelece troca_realizada_2 = verdadeiro
30	Fim Se
31	Estabelece frete_auxiliar=0
32	Estabelece atraso_auxiliar=0
33	Se troca_realizada_1 = verdadeiro e troca_realizada_2 = verdadeiro então
34	Estabelece frete_auxiliar = (frete de j_1' + frete de j_2') – (frete de j_1 + frete de j_2)
35	Estabelece atraso_auxiliar = (soma ao cubo de atrasos de j_1' + soma ao cubo de atrasos de j_2') – (soma ao cubo de atrasos de j_1 + soma ao cubo de atrasos de j_2)
36	Estabelece lista_frete_trocas $:=$ lista_frete_trocas U frete_auxiliar
37	Estabelece lista_atraso_trocas $:=$ lista_atraso_trocas U atraso_auxiliar
38	Fim Se
39	Estabelece troca_efetivada=falso
40	Enquanto lista_frete_trocas $\neq \infty$ e troca_efetivada=falso faça
41	indice_menor_atraso = posição do menor valor da lista_atraso_trocas
42	Se lista_atraso_trocas[indice_menor_atraso]<0 e lista_frete_trocas[indice_menor_atraso]≤0 então
43	Remove j_1 e j_2 da Solução Escolhida
44	Adiciona j_1' e j_2' referente ao menor valor da lista_frete_trocas à Solução Escolhida (SE)
45	Subtraia (frete de j_1 + frete de j_2) do frete Solução Escolhida (SE)
46	Soma (frete de j_1' + frete de j_2') ao frete Solução Escolhida (SE)
47	Subtraia (soma de atraso ao cubo de j_1 + soma de atraso ao cubo de j_2) da soma de atraso ao cubo Solução Escolhida (SE)
48	Adiciona (soma de atraso ao cubo de j_1' + soma de atraso ao cubo de j_2') à soma de atraso ao cubo Solução Escolhida (SE)
49	Estabelece troca_efetivada = verdadeiro
50	Estabelece frete_solucao_escolhida = soma atualizada do frete dos caminhões da (SE)
51	Senão
52	Remove lista_atraso_trocas[indice_menor_atraso]
53	Remove lista_frete_trocas[indice_menor_atraso]
54	Fim Se
55	Fim Enquanto
56	Fim Para
57	Fim Se
58	Fim Para
59	Fim Para
60	Fim Para
61	Fim Enquanto
62	Fim Para

Figura 6.13– Pseudocódigo do procedimento de busca local 2

Fonte: próprio autor

Seja $j_1 \in J$ um caminhão do conjunto de cargas da solução corrente e um veículo $v_1 \in j_1$. Para todo caminhão $j_2 \in J \setminus \{j_1\}$ são criadas réplicas (j'_1 e j'_2) e inseridos os veículos pertencentes a cada uma delas como na solução corrente, respectivamente, à exceção do veículo $v_1 \in j_1$ e de um veículo $v_2 \in j_2$ (linhas 8 a 18 na Figura 6.13).

Na sequência, a troca virtual entre os veículos é realizada tal que $j'_1 = j'_1 \cup v_2$ e $j'_2 = j'_2 \cup v_1$, executando-se um procedimento de verificação da factibilidade das cargas em termos de morfologia e número total de veículos. Se os caminhões resultantes (j'_1 e j'_2) forem viáveis, eles tornam-se candidatos à troca do veículo v_1 , caso contrário são descartados (linhas 19 a 24 e 25 a 30 na Figura 6.13).

Os procedimentos de troca virtual e verificação de factibilidade quanto à $v_1 \in j_1$ são executados para todos os veículos $v_2 \in j_2$ dado que $j_2 \in J$ e $j_2 \neq j_1$. A heurística de Verificação de Trocas, que confere a factibilidade da troca, é caracterizada por “VERIFICA TROCA (v, j)” e teve seu pseudocódigo anteriormente apresentado na Figura 6.7.

A troca efetivamente realizada é aquela que resulta na maior redução do atraso total ou, em outras palavras, na maior diferença entre a soma dos valores de soma de atraso ao cubo dos caminhões j_1 (dada por SAC^{j_1}) e j_2 (dada por SAC^{j_2}), e dos valores de soma de atraso ao cubo dos caminhões j'_1 ($SAC^{j'_1}$) e j'_2 ($SAC^{j'_2}$), desde que essa diferença obtenha uma redução do cubo da soma dos atrasos da solução corrente ($ACSE^n$) sem aumento do valor de frete total dessa solução. Tais valores ficam armazenados no conjunto $DACC$ de diferença no atraso ao cubo dos caminhões (linhas 33 a 38 na Figura 6.13).

Sob essas circunstâncias, a n -ésima solução escolhida SE^n é atualizada, removendo-se os caminhões originais (j_1 e j_2), adicionando-se os caminhões atualizados (j'_1 e j'_2), atualizando o valor do frete da solução (FSE^n) e cubo da soma dos atrasos ($ACSE^n$) - linhas 42 a 50 na Figura 6.13.

O processo de trocas é realizado sequencialmente para todo veículo $v_1 \in j_1$ e todo caminhão $j_1 \in J$ da solução corrente.

6.6 Escolha da solução final

A definição da solução final (SF) se dá pela seleção da solução MSE_R^{AM} que tenha o valor de frete mais frequente dentre todas as soluções MSE_R^{AM} e cujo número de veículos entregues atrasados seja o menor dentre essas soluções.

Caso exista mais de uma solução com tais características, aquela com o menor tempo de processamento é admitida como solução final (SF) do algoritmo – linha 47 na Figura 6.2.

6.7 Considerações finais do capítulo

Dada as limitações apresentadas pelo modelo exato para a resolução do problema para instâncias de grande porte do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro, faz-se necessário o desenvolvimento de um método de solução que seja capaz de obter resultados satisfatórios em tempo de processamento aceitável.

A heurística de busca local multi-início apresentada neste capítulo, até onde se sabe, é o primeiro método de solução proposto para a solução de instâncias de grande porte, considerando todas as dificuldades combinatórias que surgem das características do problema no mercado brasileiro.

Para avaliar a capacidade da heurística proposta em resolver problemas de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil, o capítulo seguinte apresenta uma série de experimentos computacionais realizados com sua aplicação às instâncias de pequeno e grande porte.

A verificação da capacidade da referida heurística em resolver instâncias reais do problema é feita pela comparação dos resultados de sua aplicação com os resultados obtidos pelo modelo matemático de PLIM para as instâncias “Santos”, “Sul”, “Socorro” e “Vale”.

Ainda são apresentados os resultados da aplicação da proposta de solução em duas instâncias de grande porte, para o qual não se pôde encontrar uma solução ótima utilizando o modelo exato.

Capítulo 7

EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Nesse capítulo são apresentados os resultados da aplicação da heurística de busca local multi-início (BLMI) às mesmas instâncias de pequeno porte resolvidas com a aplicação do modelo exato e cujas soluções ótimas foram encontradas. Esta heurística foi desenvolvida para a resolução de instâncias de grande porte do problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil, recorrentes no dia-a-dia da operação das empresas de transporte.

Os resultados de solução ótima da aplicação do modelo exato às quatro instâncias reais do problema (“Santos”, “Vale”, “Sul” e “Socorro”) serão utilizados para a análise de desempenho da referida heurística.

Para a aplicação da heurística proposta aos problemas de pequeno e grande porte, cujos resultados são apresentados neste capítulo, foi utilizado um computador pessoal com processador Intel i7-5500 @ 2.40GHz com 12 GB de memória RAM.

Ainda neste capítulo são apresentados os resultados da execução da heurística BLMI para a resolução de duas instâncias de porte condizentes com os volumes diários da operação da transportadora de veículos zero-quilômetro considerada como referência para esta pesquisa. As respectivas discussões sobre os resultados obtidos pelas aplicações da heurística *BLMI* desenvolvida são apresentadas na sequência.

7.1 Parâmetros

A definição dos parâmetros de execução da heurística é necessária para estabelecer os critérios de inicialização das soluções e execução de buscas por melhorias. Os valores dos parâmetros de execução da heurística *BLMI* proposta foram definidos

com base nas características da operação real de transportes de veículos zero-quilômetro e no tempo de processamento admitido como viável para aplicações práticas.

Considerando os resultados dos testes computacionais apresentados na seção 5.2 do capítulo 5, que mostraram ser o horizonte de planejamento (T) igual a 3 dias aquele que resulta no maior número de veículos alocados, o mesmo valor foi utilizado para a execução da heurística.

Também se faz necessário definir o número de soluções iniciais a serem geradas (NSI) e o número de soluções escolhidas (NSE) para participarem da segunda fase do algoritmo, a fase de busca local.

Para avaliar o desempenho da heurística *BLMI* no que diz respeito à criação de boas soluções iniciais, três diferentes valores para o parâmetro NSI foram considerados: 100, 50 e 20. O número de soluções escolhidas (NSE) foi determinado com sendo igual a 5, independentemente dos outros parâmetros utilizados. Isso se justifica pelos resultados os testes de parametrização, com as instâncias “Santos”, “Socorro”, “Vale” e “Sul”, considerando $NSI = 20$, $RA = 5$, $AMP = 10$ e variando NSE de 3 a 6, os quais mostraram que quando $NSE = 3$, o atraso médio das soluções é maior que aquele quando 4, 5 ou 6 é utilizado.

Os testes também mostraram que o tempo de processamento da *BLMI*, quando $NSR = 6$, é o maior dentre os valores considerados. Assim entre as opções de $NSE = 4$ e $NSE = 5$, com tempos de processamento aceitáveis, optou por $NSE = 5$. Comparativamente, $NSE = 5$ gera maior número de soluções iniciais e maiores chances de se encontrar uma boa solução para o início das buscas locais que $NSE = 4$.

Sabendo-se que o número de dias de atraso máximo admitido para a entrega das unidades influencia na determinação dos possíveis agrupamentos de veículos que se pode fazer com um mesmo conjunto disponível para embarque, para não limitar as

possibilidades de agrupamentos da heurística *BLMI* na busca pela melhor solução possível, evitou-se determinar um único valor para tal variável.

Assim, ao invés da atribuição de um valor único e fixo para *AM*, limites inferiores e superiores foram criados para a variação desse parâmetro, tal que $0 \leq AM \leq AMP$, sendo *AMP* o atraso máximo permitido pela operação. Desta forma, cada solução final da heurística *BLMI* é encontrada depois das alocações considerando todos os possíveis atrasos do intervalo permitido.

Para a execução da heurística *BLMI* na resolução do problema de distribuição de veículos zero-quilômetro, foi determinado *AMP* como sendo igual 10 dias. Desta forma, para chegar a solução final, o algoritmo faz todas as alocações com atraso variando de zero a 10.

A fim de avaliar o efeito da variação do número de replicações na qualidade da solução final da heurística *BLMI*, são utilizados os seguintes valores como parâmetros para o número de replicações do algoritmo (*RA*): 100, 50, 20, 10 e 5.

A fim de garantir a aleatoriedade e a repetitividade dos resultados da heurística de busca local multi-início, um número foi determinado como semente para ser utilizada no sorteio aleatório do primeiro veículo de cada caminhão cegonha e tal valor é mantido fixo para todas as replicações de todos os atrasos permitidos. Com a semente sendo sempre a mesma a sequência dos números aleatórios por ela gerada se mantém, criando ao mesmo tempo aleatoriedade e repetitividade das aplicações do algoritmo.

Adicionalmente, para avaliar outras possíveis combinações de parâmetros para a utilização da heurística *BLMI*, foram testadas execuções nas quais somente a *BL1* foi ativada, não sendo executadas as buscas locais para a redução dos atrasos, feitas pela *BL2*. A heurística foi então aplicada às quatro instâncias consideradas (“Santos”, “Socorro”, “Vale” e “Sul”), primeiramente somente com *BL1* ativa e, posteriormente, com as duas buscas locais ativadas.

Não foram efetuados testes com a *BL1* desativada, uma vez que é ela que busca soluções de menor valor de frete, não fazendo sentido a aplicação do algoritmo sem essa funcionalidade, uma vez que a mesma está diretamente relacionada à função objetivo que busca minimizar.

Considerando o acima exposto, 14 combinações de parâmetros para a heurística *BLMI* foram criadas. A Tabela 7.1 mostra, para cada um desses conjuntos, quais valores foram atribuídos a cada parâmetro.

Tabela 7.1– Combinação de parâmetros utilizados

Combinação de Parâmetros de Aplicação da Heurística de Busca Local Multi-Início														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
BL 1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
BL 2	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A
RA	100	100	100	50	20	10	5	100	100	100	50	20	10	5
NSI	100	50	20	20	20	20	20	100	50	20	20	20	20	20
NSE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
BL1: busca local para redução do valor do frete; BL2: busca local para redução dos atrasos; RA: replicações do algoritmo; SI: soluções iniciais geradas; SE: soluções escolhidas; A: ativa; I: inativa.														

Fonte: próprio autor

A cada combinação de parâmetros foi associado um nome, composto pelos valores ou características atribuídas a cada um de seus componentes: busca local para redução do valor do frete: (*BL1*), busca local para redução dos atrasos (*BL2*), replicações do algoritmo (*RA*), soluções iniciais geradas (*NSI*) e número de soluções escolhidas (*NSE*). Assim o nome de cada conjunto é dado por:

$$< BL1 [A / I] > - < BL2 [A / I] > - < RA > - < NSI > - < NSE >$$

Tomadas as 14 combinações de parâmetros e as quatro instâncias reais consideradas, ao todo foram executados 56 experimentos da heurística de busca local multi-início, cujos resultados serão utilizados para a avaliação dessa nova proposta de solução para o problema abordado nesta tese.

7.2 Resultados dos experimentos com instâncias de pequeno porte

Os resultados das aplicações da heurística *BLMI* às quatro instâncias de pequeno porte do problema, anteriormente solucionadas à otimalidade pelo modelo exato, possibilitam uma análise comparativa do desempenho dos métodos utilizados.

Os valores de redução de frete obtidos pelos experimentos da referida heurística serão utilizados para determinar qual conjunto de parâmetros resulta em melhor desempenho do algoritmo em relação aos resultados do modelo exato: valor do frete e número de veículos entregues atrasados.

O tempo de processamento requerido para a heurística *BLMI* encontrar uma solução de boa qualidade será utilizado para a avaliação da possibilidade de sua utilização em situações reais, do dia-a-dia da empresa de transportes. Longos tempos de processamento podem tornar a espera por soluções um fator impeditivo à sua utilização.

Os resultados obtidos pelas 56 execuções da heurística *BLMI* são detalhados a seguir.

7.2.1 Reduções de valor de frete

A avaliação da qualidade da heurística *BLMI* proposta se dá pela comparação de seus resultados com aqueles obtidos pela solução exata. Uma solução final da referida heurística é de boa qualidade quando seu valor de frete total for igual ao valor de frete total obtido pelo modelo exato, quando aplicados a uma mesma instância considerada.

Para as quatro instâncias consideradas e em todos os 56 experimentos a heurística *BLMI* obteve como solução os mesmos valores de frete que aqueles encontrados pelo modelo matemático.

Ao comparar as cargas formadas pelo modelo matemático com aquelas formadas pela solução heurística, não foi possível encontrar o exato mesmo conjunto de cargas criadas pelo método exato dentre as soluções geradas pela heurística *BLMI*. Isto acontece porque este problema apresenta várias diferentes soluções que podem chegar a um mesmo valor de frete total.

Considere como exemplo uma situação na qual existam 10 caminhões cegonhas sendo que, independentemente dos veículos já a eles alocados, exatamente um veículo de morfologia p possa ser adicionado a cada um deles. Considere ainda que existam 10 veículos de morfologia p com a mesma distância de entrega ainda a serem alocados. Neste exemplo existiriam $10!$ (dez fatorial) diferentes possíveis soluções com o mesmo valor final de frete total e a heurística *BLMI* teria escolhido apenas uma.

Cabe lembrar que o número de soluções criadas pela heurística *BLMI* é determinado pelos parâmetros *RA* e *AMP*, sendo a solução final aquela com maior frequência observada de valor de frete, menor quantidade de veículos entregues atrasados e com o menor tempo de processamento, como explicado anteriormente na seção 6.2 do capítulo 6.

A frequência percentual das soluções da heurística *BLMI* com valores de frete iguais aqueles das soluções do modelo exato é apresentada na Tabela 7.2. Para melhor entendimento da mencionada tabela, considere-se a instância “Santos” e a combinação de parâmetros A-A-5-20-5. Foram obtidas 55 soluções, uma vez que foram determinadas 5 replicações para cada um dos 11 valores de atrasos permitidos ($0 \leq AM \leq 10$). Dentre as 55 soluções encontradas, 17 delas atingiram o valor ótimo em relação ao frete, representando uma frequência percentual de 31%, como destacado na Tabela 7.2.

Como o valor da solução final da heurística *BLMI* é aquela de maior frequência, menor número de veículos atrasados e menor tempo de processamento, as soluções dessas 17 replicações são consideradas para a seleção da melhor delas.

Tabela 7.2– Frequência percentual de soluções finais da heurística BLMI iguais às soluções do modelo exato

Conjunto de Parâmetros	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
<i>A-I-100-100-5</i>	32%	86%	88%	28%
<i>A-I-100-50-5</i>	29%	84%	87%	30%
<i>A-I-100-20-5</i>	31%	85%	87%	27%
<i>A-I-50-20-5</i>	28%	85%	88%	30%
<i>A-I-20-20-5</i>	29%	84%	87%	23%
<i>A-I-10-20-5</i>	29%	85%	87%	28%
<i>A-I-5-20-5</i>	25%	84%	85%	33%
<i>A-A-100-100-5</i>	32%	86%	88%	26%
<i>A-A-100-50-5</i>	32%	85%	87%	28%
<i>A-A-100-20-5</i>	31%	86%	87%	26%
<i>A-A-50-20-5</i>	33%	86%	88%	26%
<i>A-A-20-20-5</i>	32%	85%	87%	25%
<i>A-A-10-20-5</i>	30%	86%	87%	27%
<i>A-A-5-20-5</i>	31%	82%	85%	31%

Fonte: próprio autor

Os resultados obtidos mostram que existem variações no percentual de vezes que a heurística *BLMI* encontra a solução ótima para uma determinada instância, quando diferentes conjuntos de parâmetros são utilizados. Logo, diferentes combinações de parâmetros podem resultar em maior ou menor assertividade da heurística, determinando uma ou outra combinação como a melhor a ser utilizada para a resolução de instâncias de grande porte.

O número de veículos entregues atrasados é outro fator de avaliação considerado nas análises para avaliação da qualidade dos resultados obtidos pela heurística *BLMI*. Para a análise dos resultados, no que diz respeito ao número de veículos entregues atrasados, a Tabela 7.3 apresenta, para cada combinação de parâmetros utilizados pela heurística em cada experimento, a frequência de soluções de mesmo valor de frete que aqueles obtidos pela programação linear inteira mista e que não apresentaram ocorrências de entregas atrasadas.

Considere-se novamente o exemplo da instância “Santos” e aplicação da heurística *BLMI* utilizando a combinação de parâmetros A-A-5-20-5, a qual resultou em 17 soluções com valor da função objetivo igual a ótima. Dentre essas 17 soluções apontadas, 12 delas não apresentaram veículos com entregas atrasadas, como

mostra o destaque na cor azul na Tabela 7.3; outras 5 soluções apresentaram veículos entregues atrasados entre 1 e 4 dias. Essas 5 soluções não estão computadas nos resultados apresentados na referida tabela, uma vez que são de qualidade inferior às outras 12 soluções, uma vez que o número de veículos atrasados é maior.

Pode-se notar na referida tabela que a aplicação da heurística *BLMI* à instância “Socorro”, utilizando o conjunto de parâmetros *A-I-10-20-5*, foi a única a não encontrar valor de frete igual ao obtido pelo modelo exato sem a ocorrência de veículos entregues atrasados, como mostra o destaque na cor vermelha na referida tabela. Tal combinação de parâmetros se mostra, portanto, de pior desempenho que outras combinações, as quais conseguiram encontrar solução de mesmo valor de frete e todos os veículos entregues até a data prometida.

Tabela 7.3– Número de soluções sem entregas atrasadas e redução de frete igual à obtida pelo modelo exato

Conjunto de Parâmetros	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
<i>A-I-100-100-5</i>	270	568	955	58
<i>A-I-100-50-5</i>	243	534	948	53
<i>A-I-100-20-5</i>	254	526	951	48
<i>A-I-50-20-5</i>	117	273	484	31
<i>A-I-20-20-5</i>	48	102	192	13
<i>A-I-10-20-5</i>	20	51	94	0
<i>A-I-5-20-5</i>	13	21	46	2
<i>A-A-100-100-5</i>	275	552	955	52
<i>A-A-100-50-5</i>	254	548	948	62
<i>A-A-100-20-5</i>	254	534	951	41
<i>A-A-50-20-5</i>	125	254	484	24
<i>A-A-20-20-5</i>	51	102	192	6
<i>A-A-10-20-5</i>	27	50	94	3
<i>A-A-5-20-5</i>	12	25	46	2

Fonte: próprio autor

Ainda, quando comparados os resultados de duas aplicações da heurística *BLMI* em uma mesma instância, cuja única diferença nos parâmetros utilizados nessas aplicações seja a ativação ou não da *BL2*, conclui-se que a busca local por diminuição no número de dias de atraso traz benefícios para a qualidade da solução final. Em tal comparação, todas as combinações com a *BL2* ativada obtiveram menores números

de veículos entregues atrasados que aquelas combinações onde somente a *BL1* está ativa.

A análise comparativa dos resultados finais obtidos pela heurística *BLMI* com aqueles obtidos pelo modelo de PLIM mostra que a heurística proposta conseguiu encontrar a solução ótima no que diz respeito ao valor do frete para todas as quatro instâncias de pequeno porte, para todas as combinações de parâmetros utilizadas.

Além disso, como apresentado na Tabela 7.4, as soluções obtidas pelo modelo de PLIM para as instâncias “Vale” e “Santos” contém respectivamente 1 e 6 veículos entregues atrasados, enquanto a solução obtida pela heurística *BLMI* proposta não apresenta nenhuma entrega atrasada, para essas duas mesmas instâncias, como anteriormente mencionado.

Tabela 7.4– Veículos entregues atrasados: PLIM

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Entregas atrasadas - PLIM	6	1	0	0

Fonte: próprio autor

Os melhores resultados obtidos pela heurística *BLMI* no que diz respeito ao número de veículos entregues no prazo pode ser decorrência da estrutura lógica da heurística proposta, a qual busca otimizar duas medidas de desempenho, tanto o valor do frete quanto o número de veículos entregues atrasados. No modelo exato, apenas um objetivo é buscado, a redução do valor do frete, expresso em sua função objetivo.

Logo, a análise da capacidade da heurística *BLMI* em atingir soluções de boa qualidade mostra que variações nos parâmetros *NSI*, *NSE* e *RA* não alteraram a sua qualidade para encontrar as mesmas soluções que aquelas encontradas pelo modelo de PLIM, no que diz respeito ao valor do frete.

Dessa forma, a decisão sobre qual combinação de parâmetros, dentre aquelas com a *BL2* ativa, é a mais indicada para a aplicação da heurística *BLMI* às instâncias de grande porte se dá pela consideração de seus tempos de processamento.

Vale ressaltar que a redução média obtida pela BL1 quando aplicada às soluções iniciais escolhidas foi de 3,28%. Tal redução pode ser considerada pequena, entretanto também pode refletir a boa qualidade das soluções iniciais geradas pelo heurística de criação das soluções iniciais.

Pelos resultados apresentados na Tabela 7.5 é possível notar que maiores percentuais de redução no valor do frete total apresentam menores contribuições da aplicação da BL1 às soluções iniciais criadas pela heurística, o que pode novamente indicar que a heurística de criação de soluções iniciais consegue gerar soluções iniciais de boa qualidade. Segundo Marti (2003) heurísticas de boa qualidade geralmente apresentam bons processos de criação de soluções iniciais, como direcionam os resultado da heurística BLMI.

Tabela 7.5– Resultado da aplicação da BL1 às soluções iniciais e redução no valor do frete total

	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
Redução obtida pela BL1	7,1%	6,2%	2,6%	3,9%
Redução % frete	8,4%	14,1%	14,3%	15,6%

Fonte: próprio autor

7.2.2 Tempos de processamento

Para a aplicação da heurística de busca local multi-início às instâncias de grande porte, se faz necessária a identificação do conjunto de parâmetros que possibilita ao algoritmo encontrar a solução, neste caso igual àquela obtida pelo modelo de PLIM, no menor tempo de processamento possível.

Os tempos de processamento necessários para a heurística *BLMI* solucionar cada uma das quatro instâncias de pequeno porte, utilizando cada uma das 14 combinações de parâmetros criadas, são encontradas na Tabela 7.6. Os resultados mostram que quanto maior o número de replicações do algoritmo e quanto maior o número de soluções iniciais criadas, maior é o tempo de processamento necessário para a heurística encontrar a solução do problema.

Por exemplo, para a linha “Santos” enquanto a heurística *BLMI* levou 406 segundos para encontrar a solução do problema utilizando o conjunto de parâmetros *A-A-5-20-5*, o conjunto *A-A-100-100-5* requereu 8.278 segundos para atingir o critério de parada. Tais variações nos tempos de processamento também aconteceram para as outras três instâncias do problema: “Socorro”, “Vale” e “Sul”.

Tabela 7.6– Tempo de processamento (s) por conjunto de parâmetros

Conjunto de Parâmetros	Instâncias			
	Santos	Vale	Sul	Socorro
<i>A-I-100-100-5</i>	7.611	24.541	23.725	10.949
<i>A-I-100-50-5</i>	7.334	23.943	22.290	10.142
<i>A-I-100-20-5</i>	6.709	21.655	20.382	9.157
<i>A-I-50-20-5</i>	3.349	10.820	9.986	4.408
<i>A-I-20-20-5</i>	1.334	4.870	4.151	1.822
<i>A-I-10-20-5</i>	688	2.271	2.114	885
<i>A-I-5-20-5</i>	369	1.082	1.000	478
<i>A-A-100-100-5</i>	8.278	26.251	25.343	12.185
<i>A-A-100-50-5</i>	7.877	25.187	23.710	11.147
<i>A-A-100-20-5</i>	7.226	22.757	21.384	9.895
<i>A-A-50-20-5</i>	3.556	11.433	10.710	4.972
<i>A-A-20-20-5</i>	1.467	4.591	4.213	2.032
<i>A-A-10-20-5</i>	769	2.289	2.227	990
<i>A-A-5-20-5</i>	406	1.160	1.089	519

Fonte: próprio autor

Considerando o fato da heurística *BLMI* ter encontrado a mesma solução que o modelo exato, independentemente do conjunto de parâmetros utilizados, o agrupamento de parâmetros que determinou o menor tempo de processamento da heurística deve ser considerado para a aplicação do método proposto às instâncias de grande porte.

Pode-se concluir que valores maiores para os parâmetros *NSI*, *NSE* e *RA* levam a um aumento dos tempos de processamento da heurística *BLMI* sem benefício extra para a qualidade da solução.

Desta forma, conclui-se que a melhor combinação de parâmetros para ser utilizada pela heurística *BLMI* na resolução de problemas de grande porte é a *A-A-5-20-5*, por ter conseguido encontrar a solução ótima, sem a ocorrência de veículos entregues atrasados e no menor tempo computacional dentre as opções com a *BL2* ativa.

7.3 Aplicação em instâncias de grande porte

Para avaliar a aplicabilidade da heurística *BLMI* proposta em situações reais, se faz necessária sua utilização para resolver problemas com quantidade de veículos compatível com aquelas diariamente recebidas e embarcadas por uma empresa de transporte.

Uma análise na já referida base de dados mostrou que a média diária de veículos recebidos e embarcados por linha de distribuição é, respectivamente, de 100 e 120 veículos. Ainda, foi possível verificar que em aproximadamente 80% dos dias tais volumes são inferiores a 200 unidades, como apresentado na Figura 3.7 e na Figura 3.8 da seção 3.2 do capítulo 3.

Desta forma, para a avaliação da heurística *BLMI* desenvolvida, foram selecionadas duas instâncias de grande porte, utilizando as informações dos veículos transportados pertencentes a linha “Sul”, partido do centro de consolidação considerado nesta tese.

Algumas características da linha de distribuição “Sul” fazem com que seja a melhor opção para a validação da heurística *BLMI* proposta como novo método de solução do problema. A característica mais importante é ser uma linha de distribuição sem subagrupamento de concessionárias. Em outras palavras, nessa linha de distribuição não existem concessionárias agrupadas de acordo com suas rodovias de acesso, como acontece com as concessionárias do Estado de São Paulo.

Ainda, o grande número de destinos contidos nessa linha de distribuição, apresentados na Tabela 7.7, cria a possibilidade de maior número de diferentes rotas e, conseqüentemente, diferentes possibilidades de alocação de carga, ajudando a aumentar a dificuldade da resolução desses problemas. A tabela abaixo apresenta os 78 destinos contidos na mencionada linha de distribuição.

A existência de um grupo único de concessionárias ainda evita a necessidade de parcelamento dos dados para a divisão do grupo de veículos disponíveis para embarque em subgrupos de acordo com sua cidade/concessionária de destinos.

Tabela 7.7– Cidades atendidas pela linha de distribuição “Sul”

Destino	Destino	Destino
ALEGRETE	FLORIANOPOLIS	PORTO UNIAO
ARARANGUA	FOZ DO IGUAU	RIO DO SUL
BAGE	GRAMADO	RIO GRANDE
BALNEARIO CAMBORIU	GRAVATAI	SANTA MARIA
BENTO GONCALVES	GUAPORE	SANTA ROSA
BLUMENAU	GUARAPUAVA	SANTANA DO LIVRAMENTO
BRUSQUE	IJUI	SANTIAGO
CACADOR	ITAJAI	SANTO ANGELO
CACHOEIRA DO SUL	JARAGUA DO SUL	SAO BENTO DO SUL
CAMAQUA	JOACABA	SAO GABRIEL
CAMPOS NOVOS	JOINVILLE	SAO JOAQUIM
CANELA	LAGES	SAO JOSE
CANOAS	LAGOA VERMELHA	SAO LEOPOLDO
CANOINHAS	LAJEADO	SAO MIGUEL D'OESTE
CAPINZAL	LONDRINA	SAPIRANGA
CARAZINHO	MAFRA	SAPUCAIA DO SUL
CASCAVEL	MARINGA	SOLEDADE
CAXIAS DO SUL	MONTENEGRO	TAQUARA
CHAPECO	NOVA PETROPOLIS	TIJUCAS
CONCORDIA	NOVA PRATA	TORRES
CRICIUMA	NOVO HAMBURGO	TUBARAO
CURITIBANOS	OSORIO	VACARIA
DOIS IRMAOS	PASSO FUNDO	VENANCIO AIRES
ENCANTADO	PELOTAS	VERANOPOLIS
ERECHIM	PONTA GROSSA	VIDEIRA
FARROUPILHA	PORTO ALEGRE	XANXERE

Ainda, considerando um único conjunto de destinos o volume de veículos recebidos e embarcados é maior que aquele de uma situação com a existência de subagrupamentos.

O maior volume de veículos com destino às concessionárias desta linha de distribuição também gera agrupamentos com representantes de todas as classes de morfologia (V_p , V_m , V_g e V_{gg}), o que melhor representa a uma situação real e aumenta a dificuldade de resolução dessas instâncias.

Outra característica importante é o fato das entregas serem feitas em concessionárias bastante distantes do centro de consolidação de carga, o que faz com que os valores de frete sejam maiores, também sendo maior o impacto de um erro de alocação.

Para a construção das instâncias de grande porte foram selecionados dois períodos distintos de avaliação, sendo o primeiro de 14 a 19 de fevereiro e o segundo de 4 a 9 de abril, ambos do ano de 2011.

Tais períodos de avaliação são benéficos para a avaliação de desempenho da heurística *BLMI* uma vez que contém todos os dias da semana, evitando um melhor ou pior desempenho influenciado pelo volume de veículos recebidos em um dia específico da semana.

As instâncias formadas e nomeadas “Sul-1” e “Sul-2” contêm, respectivamente, 1.492 e 1.757 veículos a serem alocados no período de 6 dias considerados na avaliação.

As informações contidas na Tabela 7.8 e Tabela 7.9 mostram que as duas instâncias criadas têm maior volume de recebimentos diários que a média diária do conjunto de linhas de distribuição que partem do centro de consolidação tomado como referência para este estudo. Enquanto a instância “Sul-1” chega a ter recebimentos diários de até 365 veículos, a instância “Sul-2” chega a ter 386 veículos recebido num só dia.

Tais volumes de veículos contidos em cada uma das instâncias criadas é suficientemente grande para que os resultados obtidos pela aplicação da heurística *BLMI* sejam válidos para comprovar seu desempenho para a resolução de problemas de grande porte.

Tabela 7.8– Veículos disponíveis para alocação – instância Sul1

		Data de Recebimento (2011)						
		Desde 08/02	14/02	15/02	16/02	17/02	18/02	19/02 Até 25/02
Data de Embarque (2011)	08/02		16					
	09/02		17					
	10/02		41	6				
	11/02		93	5	1			
	12/02		145	30	6			
	14/02		47	115	70	10	21	2
	15/02			55	124	25	22	46
	16/02				68	72	53	26
	17/02					40	187	31
	18/02						82	33
	19/02							3
		813	359	211	269	147	365	141 1.560
		813	1.492					1.560

Fonte: próprio autor

Tabela 7.9– Veículos disponíveis para alocação – instância Sul2

		Data de Recebimento (2011)						
		Desde 28/03	04/04	05/05	06/04	07/04	08/04	09/04 Até 16/04
Data de Embarque (2011)	04/04		39					
	05/04		76	32				
	06/04		73	172	59			
	07/04		12	49	135	23		
	08/04		4	15	127	170	32	
	09/04		4	4	35	47	69	2
	11/04			4	23	58	122	159
	12/04			1	6	10	68	56
	13/04				1		10	18
	14/04							29
	15/04							5
	16/04							8
		620	208	277	386	308	301	277 1432
		620	1.757					1.432

Fonte: próprio autor

Nas duas instâncias criadas, o conjunto de morfologias contém representantes dos quatro agrupamentos, como mostra a Tabela 7.10. Tal representação é importante para que todas as funcionalidades do algoritmo, no que diz respeito a aplicação das regras/restrições de formação de grupos possam ser avaliadas.

Tabela 7.10– Morfologia equivalente dos veículos disponíveis para alocação

Morfologia Equivalente	Instância “Sul-1”	Instância “Sul-2”
V_p	3.728	3.498
V_m	89	250
V_g	44	45
V_{gg}	4	16
Total	3.865	3.809

Fonte: próprio autor

As características das instâncias de grande porte selecionadas, resultam em problemas de grande número de possíveis combinações de carga, dado o volume de veículos a serem alocados, destinos a serem atendidos e a diversidade nos tipos de morfologia. Tais dificuldades se somam àquelas inerentes ao problema no que diz respeito às regras de formação de grupos e cálculo do valor do frete.

Como anteriormente descrito, o resultado final da aplicação da heurística de busca local é aquela solução cujo valor de frete é o mais frequente dentre as soluções de todas as replicações, que apresente o menor número de veículos entregues atrasados e o menor tempo de processamento.

Como discutido anteriormente, utilizou-se o conjunto de parâmetros A-A-5-20-5, sendo considerado o atraso máximo permitido igual a 10 dias ($AMP = 10$) tal que $0 \leq AM \leq AMP$.

Com tais parâmetros admitidos, 55 replicações são executadas para cada instância de teste, sendo 5 deles para cada um dos 11 valores admitidos para AM .

7.3.1 Resultados

Os resultados da aplicação da heurística *BLMI* às duas instâncias de grande porte geraram, nas duas ocasiões, 100% das soluções das replicações com a mesma redução percentual no valor do frete, em comparação com o valor do frete obtido com

a alocação manual. Enquanto na instância “Sul-1” a redução obtida no valor do frete foi de 15,40%, na instância “Sul-2” tal redução foi de 12,17%.

Para que se pudesse ter certeza que a heurística *BLMI* não criou uma única solução, repetida em várias replicações, uma análise no valor das maiores morfologias dentre as cargas formadas em cada solução mostrou que estas eram diferentes, comprovando um diferente conjunto de cargas por replicação. A Tabela 7.11 apresenta a frequência dessas morfologias máximas nas replicações da heurística *BLMI* para cada instância do problema.

Tabela 7.11– Frequência do maior valor de morfologia da carga

Morfologia Equivalente	Instância “Sul-1”	Instância “Sul-2”
12,67	1	
12,71	2	
12,72	1	
12,74	1	
12,77	4	
12,78	3	
12,83	1	
12,85	1	
12,88	2	
12,97		1
12,99	4	
13,01	3	2
13,04	3	
13,05	2	
13,07	7	
13,10	3	26
13,15	6	4
13,18	6	2
13,21		1
13,24	5	19
Total	55	55

Fonte: próprio autor

Uma vez que todas as replicações resultam no mesmo valor de frete total e no mesmo número de veículos entregues atrasados, a heurística *BLMI* escolhe a de menor tempo de processamento. Para a instância “Sul-1” a replicação de menor tempo de processamento foi a primeira do conjunto de 5 replicações admitindo atraso máximo igual a 6 dias e para a instância “Sul-2” foi a terceira replicação de mesmo atraso máximo admitido.

Desta forma, foi utilizado o critério do menor tempo de processamento como fator de escolha da solução final da heurística *BLMI* aplicada às mencionadas instâncias, nas quais análises nos valores de frete foram feitas, conforme critério de escolha apresentado no algoritmo da Figura 6.2.

A Tabela 7.12 mostra a distribuição das cargas por tipo de frete, comparando aquelas formadas pelo funcionário da empresa com aquelas formadas pela heurística. É possível notar que o funcionário da empresa monta maior número de cargas que a heurística *BLMI* para transportar os veículos do período de avaliação. Enquanto a heurística *BLMI* utilizou, respectivamente 162 e 175 cargas para o envio dos veículos das instâncias “Sul-1” e “Sul-2” o funcionário da empresa precisou, respectivamente, de 241 e 269 caminhões. Tal fato reduziu a utilização média dos caminhões cegonha, gerando fretes do tipo “9 Base”, fretes de maior valor, como mostra a Tabela 7.13.

Tabela 7.12– Distribuição das cargas por tipo de frete				
	Instância “Sul-1”		Instância “Sul-2”	
	Alocação manual	Heurística	Alocação manual	Heurística
Carreteiro	182	162	204	175
9 Base	59	0	65	
	241	162	269	175

Fonte: próprio autor

Os valores médios dos fretes incorridos pela alocação manual e pela alocação feita pela heurística *BLMI*, para cada uma das instâncias consideradas, são apresentados na Tabela 7.13.

Pode-se notar que o valor médio do frete por carga formada é menor quando a alocação manual é utilizada, respectivamente, para as instâncias “Sul-1” e “Sul-2” tem-se R\$8.667 e R\$8.024. Os fretes de menor valor, quando comparados aqueles obtidos pela heurística, podem evidenciar cargas de frete carreteiro sem a total utilização da capacidade de um caminhão cegonha.

Mesmo apresentando menores valores de frete médio, considerando o maior número de cargas formadas pelo funcionário da empresa, o valor do frete total torna-se maior.

Tabela 7.13– Valor médio de frete por carga e tipo de frete

	Instância “Sul-1”		Instância “Sul-2”	
	Alocação manual	Heurística	Alocação manual	Heurística
Carreteiro	R\$8.407	R\$10.909	R\$8.036	R\$10.833
9 Base	R\$9.470		R\$7.988	
	R\$8.667	R\$10.909	R\$8.024	R\$10.833

Fonte: próprio autor

Essa situação pode retratar a lógica de formação de cargas utilizada pelo funcionário da empresa que buscando minimizar o valor do frete por carga formada acaba por gerar maior número delas e maior valor de frete total. Um típico caso de vários ótimos parciais não gerando uma solução de ótimo global.

Além dos maiores valores de frete obtidos pela alocação manual, tal alocação também gera maior número de veículos entregues atrasados.

Considerando o atraso nas entregas, para as duas instâncias de grande porte, o algoritmo obteve resultados com 100% das entregas feitas no prazo.

O fato da alocação feita pela heurística BLMI ter gerado 100% de entregas no prazo não causa estranheza, dado o baixo volume de ocorrências de atraso registrada mesmo com a alocação manual. A Tabela 7.14 mostra o número de veículos entregues atrasados como resultado da alocação manual para as duas instâncias consideradas.

Tabela 7.14– Veículos entregues atrasados pela alocação manual

Número de dias de atraso	Instância “Sul-1”	Instância “Sul-2”
7		3
5	1	
3	3	4
2	15	43
1	36	24
Total	55	74

Fonte: próprio autor

Para a execução das 55 replicações para a instância “Sul-1” a heurística precisou de 34.710 segundos para encontrar a solução, entretanto, nessa instância de teste foram resolvidos os problemas de formação de cargas de 18 dias consecutivos de operação. Desta forma, o tempo médio de alocação para cada dia de operação foi de 32 minutos.

Foram contabilizados 18 dias de alocação pois o primeiro veículo considerado como disponível para embarque foi recebido no pátio da empresa de transportes no dia 8 de fevereiro e o último veículo considerado foi recebido no dia 25 do mesmo mês.

Para a geração de todas as 55 replicações da instância “Sul-2” a heurística precisou de 22.597 segundos para encontrar a solução, entretanto foram resolvidos problemas de alocação de 19 dias de operação, resultando num tempo médio por dia de alocação igual a 19,8 minutos.

Cabe aqui ressaltar que segundo informações fornecidas por um funcionário da empresa de transportes, que supervisiona com o processo de montagem das cargas, o tempo médio para um funcionário experiente decidir sobre a alocação de 300 veículos é maior que 60 minutos. Neste comparativo de tempos foram considerados apenas o tempo de alocação de carga sem que o tempo dispendido em outras etapas do processo como, por exemplo, reunir os documentos necessários e preparar os dados.

7.4 Considerações finais do capítulo

As análises dos resultados obtidos pela heurística *BLMI* proposta nesta tese como um novo método de solução para o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil mostram que:

- para problemas de pequeno porte, a heurística *BLMI* é capaz de encontrar os mesmos valores de soluções ótimas que aqueles encontrados pelo modelo exato;
- para problemas de pequeno porte, a heurística *BLMI* conseguiu maiores reduções no número de veículos entregues atrasados que aquelas obtidas pelo modelo matemático, em comparação com os resultados da alocação manual;

- para a aplicação da heurística *BLMI*, tanto em problemas pequenos quanto em problemas de grande porte, não foi preciso a utilização de capacidade de processamento maior que aquela disponível no mercado – um laptop com processador Intel i7-5500 @ 2.40GHz com 12 GB de memória RAM;
- para problemas de grande porte, não solucionáveis pelo modelo exato, a heurística *BLMI* proposta foi capaz de encontrar soluções com significantes reduções nos valores de frete, em comparação com os resultados da alocação manual;
- para problemas de grande porte, a heurística *BLMI* também foi capaz de reduzir o número de entregas feitas atrasadas, em comparação com os resultados da alocação manual;
- para problemas de grande porte, o tempo de processamento requerido para que a heurística *BLMI* encontre uma solução é menor que o tempo requerido para que o funcionário da empresa faça tais alocações.

Os resultados anteriormente apresentados evidenciam que a proposta de solução é capaz de avaliar dois objetivos na busca de uma solução final, atingindo não apenas o resultado de melhor valor de frete, mas também aquele com menor número de veículos entregues atrasados.

Caso fosse considerada uma multa por dia de atraso nas entregas dos veículos, tal como mencionado por Novo (2005), o benefício da utilização da heurística seria, financeiramente, bastante maior.

Considerando o conjunto dos fatores avaliados, redução no valor do frete, aumento no número de veículos entregues no prazo e o tempo de processamento requerido pela heurística *BLMI*, é possível afirmar que o método de solução proposto nesta tese atingiu os objetivos quando aplicado às instâncias de porte compatíveis com aqueles encontrados no dia-a-dia da operação de transporte.

Assim, a heurística *BLMI* desenvolvida e apresentada nesta tese torna-se, até onde se tem conhecimento, a única opção de resolução disponível na literatura para o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero quilômetro no Brasil.

Capítulo 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta tese apresentou uma nova solução para o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro, mais especificamente para o problema existente no mercado brasileiro.

Resolver tal problema significa construir soluções com a seleção, dentre os milhares de veículos disponíveis, das melhores combinações a serem carregadas nos caminhões cegonha, para serem entregues às suas respectivas concessionárias, em um horizonte de planejamento preestabelecido, tal que essas formações resultem no menor valor de frete total pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha, respeitando todas as restrições existentes.

Tadei et al. (2002) mostram que a resolução do problema de formação de carga não é trivial; uma vez que sua simplificação o reduz a um típico problema das múltiplas mochilas binárias, um clássico problema NP-Difícil.

Assim, as resoluções apresentadas pelos autores que estudaram esse tipo de problema, como, por exemplo, Tadei et al. (2002), Dell’Amico et al. (2011, 2015) e Cordeau et al. (2015), utilizam como estratégia a sua divisão em dois problemas menores, a serem sequencialmente resolvidos, sendo um de roteirização e outro de carregamento. Dell’Amico et al. (2011) salientam que apesar da divisão do problema gerar dois subproblemas de menor complexidade, tais problemas resultantes ainda são do tipo NP-Difícil.

Além das dificuldades de resolução presentes nos problemas tratados pelos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, no caso brasileiro dificuldades adicionais são encontradas.

Na situação existente no Brasil, a complexidade recorrente dos problemas de formação de carga, no que diz respeito ao grande número de diferentes veículos e às várias possíveis combinações de tamanhos a serem entregues às diversas concessionárias de uma determinada rota, é acompanhada de adicional dificuldade gerada pelas restrições de formação de grupo e pelo método de cálculo do frete.

Apesar de existirem trabalhos disponíveis na literatura sobre o processo de formação de carga e roteirização de entregas de veículos zero-quilômetro, não foi possível encontrar nenhuma referência a um problema que contemple a redução do valor do frete total quando da existência de um valor de frete mínimo, calculado para cada carga formada, variável, de acordo com os veículos alocados ao caminhão, como acontece no caso tratado neste trabalho.

Para tentar resolver o problema tratado nesta tese, foi construído um modelo matemático cuja finalidade é obter resultados de solução ótima, em tempo computacional aceitável, ao menos para instância de pequeno porte.

O modelo matemático desenvolvido para a resolução do problema de formação de cargas foi aplicado a quatro diferentes instâncias reais e de pequeno porte, obtendo soluções ótimas para diferentes distâncias médias de entrega, obrigatoriedades de embarque e morfologias dos veículos a serem entregues.

Entretanto, considerando o modelo matemático desenvolvido, a execução de múltiplos testes indicou que não é possível obter soluções ótimas para instâncias com tamanho compatíveis com aqueles existentes no dia-a-dia da operação de transportes, seja utilizando computadores pessoais ou cluster de elevada capacidade computacional.

Concluiu-se então da impossibilidade de se resolver instâncias de grande porte desse problema, condizentes com aquelas encontradas na realidade, utilizando métodos exatos. Tal conclusão foi a mesma obtida por Dell'Amico et al. (2011, 2015), Tadei et al., 2002, Novo (2005) e Cordeau et al., 2015 em seus respectivos trabalhos.

Tem-se então a necessidade do desenvolvimento de uma heurística de solução, capaz de resolver problemas maiores, em aceitável tempo computacional.

Foi então desenvolvida uma nova solução heurística, cuja utilização é factível para a resolução de instâncias reais do problema, de tamanho condizentes com aqueles encontrados no dia-a-dia de operação de uma transportadora.

A heurística de busca local multi-início desenvolvida foi utilizada para resolver as mesmas instâncias de pequeno porte que haviam sido solucionadas pelo modelo exato e seu desempenho foi avaliado pela comparação de seus resultados com aqueles obtidos com as aplicações daquele modelo.

A heurística proposta conseguiu encontrar a solução ótima para todas as quatro instâncias reais e de pequeno porte. Ainda, reduziu o número de veículos entregues atrasados, na comparação com os resultados obtidos pelo modelo matemático.

Por fim, a heurística desenvolvida foi utilizada para solucionar problemas de grande porte, obtendo soluções com valores de frete menores que aqueles obtidos pela alocação manual e reduzindo drasticamente o número de veículos entregues atrasados, com tempos de execução aceitáveis para sua aplicação prática.

A heurística de busca local multi-início desenvolvida, até onde se sabe, é o primeiro método de solução proposto para a solução de instâncias de grande porte, em tempo computacional aceitável, considerando todas as dificuldades combinatórias que surgem das características do problema no mercado brasileiro.

8.1 Limitações da pesquisa

A pesquisa apresentada nesta tese tem limitações cujo destaque é necessário.

A primeira limitação surge do fato desta pesquisa utilizar dados fornecidos por uma das várias empresas de transporte de veículos zero-quilômetro que existem em nosso

país. Desta forma, os resultados obtidos podem, por alguma razão, não representar a situação de alguma outra empresa atuando no setor, dada a baixa representatividade da amostra.

A segunda limitação a ser destacada trata da idade dos dados primários coletados. Os valores que caracterizam os tamanhos dos veículos e a distribuição dos volumes entre os destinos podem ser diferentes desde 2011 até 2017, principalmente considerando os vários novos modelos de veículos introduzidos pelas montadoras no mercado nacional.

8.2 Sugestões para estudos futuros

Esta tese contribui para a geração de conhecimento, sendo o primeiro trabalho que apresenta uma proposta de solução para o problema de formação de carga e distribuição de veículos zero-quilômetro no Brasil.

Como conclusão anteriormente apresentada, a referida proposta de solução é capaz de construir soluções, selecionando combinações de veículos a serem carregadas nos caminhões cegonha, tal que essas formações resultam no menor valor de frete total pago pela transportadora aos donos dos caminhões cegonha, respeitando todas as restrições existentes.

A tese apresenta uma nova opção para a organização das restrições à alocação dos veículos. Este trabalho não utiliza restrições que se aplicam a um veículo por vez, como, por exemplo, na possibilidade de alocação de um veículo a uma determinada posição de carregamento. Esta tese apresenta restrições mais amplas, de formação de grupo, as quais consideram a interferência da decisão de alocação de uma unidade na decisão de alocação de todas as outras do caminhão cegonha.

A proposição contribui também para o desenvolvimento de conhecimento sobre problemas nos quais exista um valor de frete mínimo ou formulações paralelas de cálculo de frete como, por exemplo, quando da utilização das tabelas de peso cubado.

Ao contribuir para o melhor entendimento do problema, pode motivar novos trabalhos sobre temas correlatos, um pouco mais distante daquele tratado nesta tese, como, por exemplo, para descobrir qual seria o impacto que a utilização de veículos autônomos, viajando em comboio, teriam na formação das rotas e na formação das cargas dos caminhões cegonha.

Uma possibilidade para a continuidade dos estudos sobre o problema tratado nesta tese diz respeito à eliminação das linhas de distribuição. A existência das linhas de distribuição cria situações nas quais uma cidade que contenha duas concessionárias com baixo volume de veículos a serem recebidos num mesmo dia precise ser visitada por dois caminhões cegonha diferentes, caso tais concessionárias pertençam a linhas diferentes de distribuição. Essa situação não permite a otimização global do sistema e representa uma nova oportunidade de pesquisa.

Outra possibilidade se encontra na análise do impacto da eliminação dos limites de morfologias do tipo V_m e V_g que podem ser alocados em um mesmo caminhão cegonha. Tal eliminação tende a criar cargas mais homogêneas e reduzir o número de veículos não alocados por dificuldades em se agrupar no máximo 6 e 8 unidades, respectivamente, de cada morfologia. Existe a hipótese que menores restrições podem reduzir o número de caminhões necessários à operação, reduzindo os valores de frete total, hipótese ainda a ser analisada.

Estudar o impacto da utilização do modelo matemático e da heurística proposta em outros centros de consolidação da empresa, verificando sua qualidade para a resolução de problemas com diferentes distribuições de destinos, é outra alternativa de estudo.

Ainda, seria interessante calcular o ganho que se pode ter com a inclusão dos veículos de transferência entre centros de consolidação como veículos disponíveis para embarque. Tal suposição considera os centros de consolidação como destinos de entrega, assim como são as concessionárias a serem visitadas. Pode ser que o valor do frete total para o transporte dos veículos de transferência seja menor com a proposta apresentada do que ele realmente é com a segregação de tal operação.

Ainda considerando outros centros de consolidação se poderia fazer um sistema de planejamento antecipado, já considerando como veículos disponíveis para alocação, no horizonte de planejamento, aqueles em trânsito entre centros de consolidação.

Sabendo-se que grandes dispersões de destinos de entrega podem influenciar na maior incidência de fretes do tipo “9 Base”, considerando a nova formulação apresentada nesta tese, poder-se-ia pensar na utilização de um valor máximo de distância entre dois veículos sequencialmente alocados a uma carga em formação.

Ainda, mesmo que hoje as transportadoras não sejam penalizadas pelas entregas atrasadas, entregar os veículos no prazo é importante para a sua competitividade. Logo, existe a possibilidade de se desenvolver modelos matemáticos biobjetivos, que também considerem o impacto das entregas atrasadas em suas funções objetivos.

Outra possibilidade de desenvolvimento da proposta apresentada nesta tese é a inclusão de procedimentos que avaliem o número de remontes necessários para a entrega das cargas formadas. Mesmo que no problema tratado nesta tese não exista custo relacionado aos remontes, existe o risco de avarias e acidentes, os quais também podem ser minimizados.

Ainda, a inclusão de um algoritmo de roteirização das cargas formadas pode reduzir o custo das viagens para os donos dos caminhões cegonha e, conseqüentemente, gerar menores valores de frete por unidade de morfologia transportada por quilômetro, sem a necessidade de alteração na metodologia de cálculo do frete ou nas restrições de carregamento.

As inúmeras oportunidades de continuidade no desenvolvimento de conhecimento sobre o tema apresentado nesta tese advêm da importância do tema tratado, de seu ineditismo e da originalidade com que foi tratado.

Capítulo 9

BIBLIOGRAFIA

AGBEGHA, G. **An optimization approach to the auto carrier problem**. 1992. 166p. (Tese Doutorado) - Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1992

AGBEGHA, G. Y.; BALLOU, R. H.; MATHUR, K. (1998). Optimizing auto-carrier loading. **Transportation Science**, v.32, p. 174 – 188.

ANFAVEA (2014) **Guia Setorial da Indústria Automobilística Brasileira – 2013**. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Editora da ANFAVEA, São Paulo, SP. Disponível em: <http://www.virapagina.com.br/anfavea2014/#36>. Acesso em 21 jul. 2014.

BALDI, M.M.; CRAINIC, T.G.; PERBOLI, G.; TADEI, R. (2012). The Generalized Bin Packing Problem. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, vol. 48, n. 6, p. 1205-1220

BARBETTA, P. A., REIS, M. M., BORNIA, A. C., **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. São Paulo: Atlas, 2004

CORDEAU, J-F.; GENDREAU, M.; LAPORTE G.; POTVIN J-Y.; SEMET F. (2000). A guide to vehicle routing heuristics. **Journal of the Operational Research Society**, v.53, p. 512–22.

CORDEAU, J.-F.; DELL’AMICO, M.; FALAVIGNA, S.; IORI, M. (2015). A Rolling Horizon Algorithm for Auto-Carrier Transportation. **Transportation Research Part B**, 76, p. 68-80.

CUADRADO, M.; GRIFFIN, V. (2007). Modelos Matemáticos para la Optimización de la Distribución de Vehículos Nuevos en Venezuela. Caso: Clover International CA Ingeniería Industrial. **Actualidad y Nuevas Tendencias**. Ano 1, v. I, n.1, p. 53-65.

CUNHA, C. B. (2000) Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. **Transportes**, v.8, n.2, p. 51-74.

CUNHA, C. B. (2006) **Contribuição à Modelagem de Problemas em Logística e Transportes**. 315p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

CUNHA, C. B, MAINIERI, G., YOSHIKAWA, H. T. Y., MALUTA, L., HENRIQUES, L.R.S. (2008) Heurísticas para o Problema de Bin-Packing no Contexto da Distribuição Física de Produtos. In: XL SBPO - 40º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2008, João Pessoa. Anais (CD-ROM) p. 712-723.

CZYZYK, J., MESNIER, M. P.; MORÉ, J. J. (1998). The NEOS Server. **IEEE Journal on Computational Science and Engineering** v. 5, n. 3, p. 68-75.

DELL'AMICO, M.; S. FALAVIGNA; IORI, M. (2014). Optimization of a real-world auto-carrier transportation problem. **Transportation Science**. V. 49, n. 2, p. 402-419

DELL'AMICO, M.; S. FALAVIGNA; IORI, M. (2011). A metaheuristic algorithm for auto-carrier transportation. In **VII ALIO/EURO Workshop in Applied Combinatorial Optimization**, Porto, Portugal (May 6, 2011).

DAWANDE, M.; KALAGNANAM, J.; SETHURAMAN, J. (2001). Variable sized bin packing with color constraints. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, v. 7, p. 154-157.

DOLAN, E. (2001). The NEOS Server 4.0 Administrative Guide. Technical Memorandum ANL/MCS-TM-250, Mathematics and Computer Science Division, **Argonne National Laboratory**.

DOLAN, E. D., FOURER, R., MORE J., MUNSON T. S. (2002): Optimization on the NEOS Server, **SIAM News**, v. 35, p. 8–9.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem, **Operations Research Letters**, v. 8, p. 67–71.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures, **Journal of Global Optimization**, v.6, p. 109-133.

Global Wage Report 2012/13: Wages and equitable growth Geneva, **International Labour Office**, 2013

GROOTHUIJSE, J. J. H.; KOOPMAN, P. W. M.; ACHTEN, P. M. **Parallelism by means of multithreading in Clean**. 2016. Master's Thesis Computing Science Radboud University Nijmegen April 17, 2016

GROPP, W.; MORE, J. J. (1997). **Optimization Environments and the NEOS Server. Approximation Theory and Optimization**, M. D. Buhmann and A. Iserles, eds., Cambridge University Press, pages 167-182.

Gurobi Optimization, Inc. Gurobi Optimizer Reference Manual. 2015. <http://www.gurobi.com>

HPC. HIGH PERFORMANCE COMPUTING. **Universidade de São Paulo**. Acessado em 06/2016. <http://www.usp.br/hpc/index.php>

LIN, CHIH-HUNG. (2010). An Exact Solving Approach to The Auto-Carrier Loading Problem, **Journal of society for transportation and traffic studies**, v. 1, pp.93-107.

LOIOLA, E. M.; ABREU, N. M. M. DE; BOAVENTURA-NETTO, P. O. (2004). Uma revisão comentada das abordagens do problema quadrático de alocação. **Pesquisa Operacional**, v. 24 (1), p. 73-110.

LOIOLA, E. M.; ABREU, N. M. M. DE; BOAVENTURA-NETTO, P. O.; HAHN, P.; QUERIDO, T. (2007). A survey for the quadratic assignment problem, **European Journal of Operational Research**. v.1. p. 657– 690.

LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O. C.; STÜTZLE, T. (2010). **Iterated local search: Framework and applications. Handbook of Metaheuristics**. p. 363-397. Springer US.

LUKE, S. (2013). **Essentials of Metaheuristics**. Department of Computer Science George Mason University. Segunda Edição. Disponível em http://www.sau.ac.in/~vivek/ai_new/Luke_Essentials.pdf . Acessado em 25 Set 2014.

MARTÍ, R. (2003). “Multi-Start Methods.”. In Glover F. Kochenberger G. A. (Ed.), **Handbook of Metaheuristics**, International Series in Operations Research & Management Sciences, p. 355–368.

MARTÍ, R. RESENDE M.G.C. E RIBEIRO C.C., (2013). “A survey of multi-start methods for combinatorial optimization”, **European Journal of Operational Research** v. 226, p. 1-8.

MILLER, B. M. (2003). **Auto Carrier Transporter Loading and Unloading Improvement**. (Tese doutorado), Graduate School of Engineering and Management - Air Force Institute of Technology.

NOVO, D. P. C. (2005). **Metodologia para a resolução do problema da distribuição de veículos**. 135 p. (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

RESENDE, M. G. C. (2008). Metaheuristic hybridization with greedy randomized adaptive search procedures. **Tutorials in Operations Research. State-of-the-Art Decision-Making Tools in the Information-Intensive Age**, p. 295-319.

RESENDE, M. G. C.; RIBEIRO, C. C. (2010). "Greedy randomized adaptive search procedures: Advances, hybridizations, and applications. **Handbook of Metaheuristics**. Springer US, 2010. pp.283-319.

RESENDE, M. G. C.; RIBEIRO, C. C. (2016). **GRASP: Greedy Randomized Adaptive Search Procedures**. Springer Science+Business Media New York 2016. p 43

TADEI R.; PERBOLI G.; DELLA CROCE, F. (2002). A heuristic algorithm for the auto-carrier transportation problem. **Transportation Science**, v. 36(1), p.56–62.

TALBI, EL-GHAZALI (2009). **Metaheuristics: from design to implementation**. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA, p. 586.

TOTH, P; VIGO, D. (Eds.). **The Vehicle Routing Problem**. SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia; 2002.

VIEIRA NETO, E.; VELASCO, A. S.; PAULA JUNIOR, G. G. (2012). GRASP: a influência da lista restrita de candidatos nas soluções iniciais para otimização do corte unidimensional. Revista **GEPROS**, v. 3, pp. 29.