ADAM SUSSUMU TAMURA

**ESTUDO DE UM PROBLEMA DE COLETA DOMICILIAR URBANA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS**

**São Paulo
2014**

ADAM SUSSUMU TAMURA

**ESTUDO DE UM PROBLEMA DE COLETA DOMICILIAR URBANA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção de título de
Mestre em Engenharia**

São Paulo

2014

ADAM SUSSUMU TAMURA

**ESTUDO DE UM PROBLEMA DE COLETA DOMICILIAR URBANA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção de título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica**

**Orientador: Prof. Dr.
André Bergsten Mendes**

**São Paulo
2014**

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

São Paulo, 07 de outubro de 2014.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Adam Susumu

Ficha catalográfica

Tamura, Adam Susumu

**Estudo de um problema de coleta domiciliar urbana de resíduos sólidos / A.S. Tamura. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.
91 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Resíduos sólidos (Coleta) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio e suporte de minha família e a compreensão e incentivo de meus amigos e colegas de trabalho.

Agradeço também a meu orientador e aos funcionários do departamento que me auxiliaram no decorrer da pesquisa, tanto em questões administrativas como em questões técnicas.

Tudo o que é difícil deve
tentar-se enquanto é fácil.

(Lao-Tsé)

RESUMO

O presente trabalho aborda o Problema de Coleta Domiciliar Urbana (PCDU) de resíduos sólidos, tratado no nível tático de planejamento, em que zonas de coleta são definidas para cada dia da semana e designadas aos veículos coletores, cuja frota deve ser dimensionada. O problema estudado é baseado em um caso real, o qual possui como particularidades: cada zona de coleta é formada por regiões adjacentes e será representada por um nó-semente; a demanda de cada zona deverá ser atendida dentro do período de uma semana, conforme múltiplos programas possíveis de coleta; em um turno de um dia de trabalho um veículo poderá realizar múltiplas viagens; e há uma garagem para a frota e uma estação de transbordo, a qual possibilita que o veículo seja esvaziado para realizar outras viagens. A literatura apresenta alguns métodos heurísticos para a resolução de variantes deste problema, sendo os métodos exatos utilizados somente na resolução de instâncias pequenas, dado que o problema de VRP (*Vehicle Routing Problem*) é classificado como NP-hard. A imposição de adjacência é uma característica particular, a qual é justificada pela possível melhoria na utilização dos veículos em posterior planejamento operacional. São propostos um modelo matemático e um método heurístico para resolver o problema, sobre os quais são realizados experimentos computacionais. O método heurístico é aplicado sobre um estudo de caso de um problema de escala real, sendo obtida solução heurística como resultado.

Palavras-chave: coleta urbana de resíduos sólidos, planejamento tático, periodicidade, roteirização, múltiplas viagens, clusterização adjacente.

ABSTRACT

The present work addresses the Urban Household Solid Waste Problem (UHSWP) on a tactical planning level, wherein collection zones are assigned to every week daywork and collection vehicles, which fleet is to be sized. The studied problem is based on a real case, such peculiarities as: each collection zone is a set of adjacent areas and a seed node represents it; the demand each zone must attended within a week, according to the several possible collection schedule; on a work day shift a vehicle can be assigned to multiple trips; and there is a base depot for the fleet and a transfer station, where the vehicles are unloaded, restoring their load capacity for the next trips. Literature presents heuristic methods for the solving of its problem variants, in which exact methos are only applied to small instances, due to the VRP (Vehicle Routing Problem) NP-hard property. The adjacency imposition is a peculiar feature, which is justified by the potential improvement on vehicle usage considering a posterior operational planning. A mathematical model and a heuristic method are proposed for the problem solving and evaluated by computational experiments. A real scale problem case study is solved by the heuristic method and the results are presented.

Keywords: urban solid waste collection, tactical planning, periodic, routing, multiple trips, adjacency clustering.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa.....	2
1.2	Objetivos	5
1.3	Estrutura da dissertação	5
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	10
3.1	Descrição do problema	10
3.2	Modelo	18
3.2.1	Dados de Entrada.....	18
3.2.2	Variáveis de Decisão	20
3.2.3	Função objetivo	21
3.2.4	Restrições	22
3.2.5	Extensão do modelo	25
3.3	Dimensão do problema	26
4	MÉTODO DE SOLUÇÃO.....	27
4.1	Algoritmo principal.....	29
4.2	Algoritmo construtivo.....	31
4.3	Heurística de busca local	35
4.3.1	Nível inferior	36
4.3.2	Nível superior	44
5	RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	50

5.1	Problema em escala reduzida.....	50
5.1.1	Instâncias analisadas	51
5.1.2	Resultados	53
5.2	Problema em escala real.....	58
5.2.1	Estudo de caso.....	58
5.2.2	Resultados	60
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	ANEXO A: MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO PARA O GAMS.....	71
	ANEXO B: RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO RODADO NO GAMS, INSTÂNCIA F.....	76
	ANEXO C: RESULTADOS DO MODELO HEURÍSTICO EM ESCALA REDUZIDA, INSTÂNCIA F.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Curva ABC de produção e classificação de setores censitários por nível de relevância. _____	14
Figura 3.2: (a) Exemplo de zona de coleta; (b) Exemplo de roteiro com viagem adicional. _____	16
Figura 3.3: Esquema de roteiros em função da quantidade de viagens (ou rotas). _	16
Figura 3.4: Transformação da rede: (a) rede viária urbana; (b) delimitação de áreas; (c) rede simplificada. _____	17
Figura 4.1: Obtenção da solução heurística segundo estratégia <i>multi-starting</i> . ____	30
Figura 4.2: Algoritmo de inicialização <i>multi-starting</i> . _____	31
Figura 4.3: (a) Exemplo de conjunto de setores censitários; (b) Exemplo de conjunto de setores censitários a serem coletados em um período específico, <i>SC(4ª feira)</i> ; (c) Exemplo de zonas de coleta em <i>Z(4ª feira)</i> , com destaque para a caracterização de uma ilha. _____	32
Figura 4.4: Algoritmo Construtivo, geração de zonas de coleta. _____	33
Figura 4.5: Métrica de economia para a definição de zonas de coleta como viagens primárias. _____	34
Figura 4.6: Algoritmo Construtivo, alocação de veículos. _____	35
Figura 4.7: Esquema de busca tabu em heurística de melhoria por busca local. ____	38
Figura 4.8: Algoritmo de melhoria por busca local, nível inferior. _____	39
Figura 4.9: Algoritmo de construção de vizinhança em nível inferior. _____	40
Figura 4.10: Algoritmo de checagem de viabilidade de movimento em nível inferior. _____	42
Figura 4.11: Algoritmo de atualização de solução em função da execução de movimento em nível inferior. _____	42

Figura 4.12: Exemplificação de movimentos (a) roteirização nó a nó; (b) roteirização com nó-semente. _____	44
Figura 4.13: Obtenção da solução heurística com busca local de melhoria em nível superior. _____	45
Figura 4.14: Algoritmo de melhoria por busca local, nível superior. _____	47
Figura 4.15: Algoritmo de construção de vizinhança em nível inferior. _____	48
Figura 4.16: Algoritmo de checagem de viabilidade de movimento em nível superior. _____	48
Figura 4.17: Algoritmo de atualização de solução em função da execução de movimento em nível superior. _____	49
Figura 4.18: Algoritmo de obtenção de períodos que devem ser atualizados pela execução de movimento em nível superior. _____	49
Figura 5.1: Localização dos nós e relações de adjacências. _____	51
Figura 5.2: Solução do método heurístico da instância F, com frota de um único veículo. _____	56
Figura 5.3: Atendimento dos nós, por veículo e período, para a instância F, cujas soluções foram obtidas respectivamente pelo modelo matemático e modelo heurístico. _____	57
Figura 5.4: Localização dos nós e relações de adjacências, estudo de caso (turno diurno). _____	59
Figura 5.5: Solução heurística, sem hora-extra. _____	61
Figura 5.6: Solução heurística, com hora-extra. _____	62
Figura C.1: Solução heurística da instância F. _____	82
Figura C.2: Atendimento dos nós, por veículo e período, para a instância F. _____	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Classificação de resíduos, Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, artigo 13º, inciso I. _____	3
Tabela 2.1: Literatura relevante ao problema estudado com métodos heurísticos com aplicação em nível tático. _____	9
Tabela 3.1: Exemplo de combinações de programas de coleta disponíveis para um setor censitário. _____	12
Tabela 3.2: Exemplo da sazonalidade da demanda em função das diversas combinações de coleta e da curva de sazonalidade de produção semanal média. _	13
Tabela 3.3: Classificação da produção semanal pela curva ABC. _____	14
Tabela 3.4: Ordem de grandeza das variáveis binárias do problema. _____	26
Tabela 3.5: Porte de municípios em relação à quantidade de variáveis binárias no modelo matemático. _____	26
Tabela 4.1: Nomenclatura de parâmetros do modelo heurístico. _____	27
Tabela 5.1: Variação de parâmetros para as instâncias analisadas: (1) capacidade do veículo, em kg; (2) quantidade máxima diária de viagens por veículo; (3) fator de afastamento entre zonas de coleta e garagem e estação de transbordo. _____	52
Tabela 5.2: Variação de parâmetros para a análise de sensibilidade. _____	53
Tabela 5.3: Resumo da resolução do problema para diversas instâncias rodadas no modelo computacional. _____	54
Tabela 5.4: Resumo da resolução do problema para as diversas variações dos parâmetros de calibração do modelo computacional. _____	55
Tabela 5.5: Distribuição do atendimento de setores censitários por veículo e dia da semana. _____	58
Tabela 5.6: Sumário executivo do problema em escala real. _____	63

Tabela A.1: Modelo matemático implementado no GAMS, exemplificado pela Instância A.	71
Tabela B.2: Arquivo “SAIDA.put” do modelo matemático resolvido no GAMS, instância F.	76
Tabela C.3: Sumário executivo da instância F.	81
Tabela C.4: Distribuição do atendimento semanal para a instância F.	81
Tabela C.5: Utilização de veículo para cada dia da semana, instância F.	81

LISTA DE SIGLAS

CARP	<i>Capacitated Arc Routing Problem</i> (Problema de Roteirização com Arco Capacitado)
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i> (Busca Adaptiva Aleatória Gulosa)
GVNT	<i>Guided Variable Neighbourhood Thresholding</i> (Vizinhança Variável Guiada por Limitante)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PCDU	Problema de Coleta Domiciliar de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSDU	Resíduos Sólidos Domiciliares Urbanos
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos
SPVRPTW	<i>Stochastic Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows</i> (Problema de Roteirização Veicular Periódica Estocástica com Janela de Tempo)

TSP	<i>Travelling Salesman Problem</i> (Problema do Caixeiro Viajante)
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i> (Problema de Roteirização Veicular)
VRPMTW	<i>Vehicle Routing Problem with Multiple facilities and Time Windows</i> (Problema de Roteirização Veicular com Múltiplas Instalações e Janela de Tempo)

1 INTRODUÇÃO

O adensamento populacional em áreas urbanas tem impacto significativo sobre a geração de resíduos, uma vez que o volume de bens consumidos e consequente descarte de resíduos é proporcional à população de determinada área de controle (BEIGL, P. *et al.*, 2008). Somado ao adensamento urbano, é necessário que a destinação dos resíduos seja feita de forma regulamentada e planejada, a fim de mitigar os impactos negativos ambientais, evitando o descarte inadequado, podendo até mesmo gerar energia.

Cabe ao poder público o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, definindo áreas candidatas a instalações de tratamento por meio de leis de zoneamento, garantindo e regulamentando a destinação dos resíduos, no caso do governo brasileiro, conforme Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), promovida pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e instituída na Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010.

A gestão dos resíduos sólidos, todavia, pode ser executada por empresas privadas que, por meio de concessão, adquirem o direito de explorar o potencial energético e/ou são remuneradas mediante contraprestação por realizar o serviço público de transporte e coleta domiciliar. Acordos privados de transporte e coleta devem ser realizados quando o resíduo gerado possui característica específica, como origem industrial, hospitalar ou até mesmo em alguns casos comerciais, quando definidos pela instituição pública.

O planejamento da gestão de resíduos sólidos pode, por sua vez, ser estratificado em três níveis (GHIANI, G. *et al.*, 2013): estratégico (escolha de localização de instalações, como aterros, garagens e estações de transbordo, ou escolha de tecnologia, como containerização, *bunkeres* e praça de serviço), tático (particionamento da área de controle em zonas de coleta, dimensionamento de frota e estabelecimento de programação de atendimento e de frequência de coleta) e operacional (definição de roteiro para cada veículo).

A presente pesquisa é direcionada ao nível tático, em que se estuda o problema sob a ótica do operador do serviço, seja ele o poder público ou uma empresa privada concorrente a uma licitação, visando a minimização de custo operacional (parcelas de

custo fixo de veículo e custo variável de combustível e de horas-extras) por meio de dimensionamento de frota e definição de plano de coleta. A pesquisa foi motivada por um projeto do qual o autor participou e cujo acordo de confidencialidade restringe a divulgação de dados, sendo, contudo, apresentados parâmetros de ordem de grandeza coerente.

Adicionalmente, são consideradas características relevantes ao problema que devem ser observadas: são fixas as localizações de uma garagem (de onde partem os veículos) e de uma estação de transbordo (onde é realizado o alívio da carga e renovação da capacidade do veículo); permitem-se múltiplas viagens ao longo do turno de um veículo, podendo este renovar sua capacidade para prosseguir a outra zona de coleta; e uma zona de coleta deve consistir em uma área contínua, visitada por um único veículo em seu turno. Esta definição de zona de coleta torna o problema mais complexo, sendo discutido em profundidade conforme desenvolvimento do texto.

1.1 Justificativa

Os resíduos podem ser classificados em função da origem, sendo neste estudo considerados aqueles cuja a responsabilidade é municipal e que se enquadram como não perigosos, conforme apresentado na Tabela 1.1. Os resíduos de estabelecimentos comerciais usualmente são coletados juntamente com os resíduos sólidos urbanos, por não haver discriminação na prática, enquanto o serviço de limpeza urbana é realizado por veículo dedicado. Portanto, o presente trabalho considera, além dos resíduos sólidos domiciliares urbanos (RSDU), eventual parcela proveniente de estabelecimentos comerciais.

Tabela 1.1: Classificação de resíduos, Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, artigo 13º, inciso I.

Tipo de resíduo quanto à origem	Responsabilidade
resíduos sólidos urbanos (domiciliares e de limpeza urbana)	Município
resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços	Município/Gerador
resíduos dos serviços públicos de saneamento básico	Gerador
resíduos industriais	Gerador
resíduos de serviços de saúde	Gerador
resíduos da construção civil	Gerador
resíduos agrossilvopastoris	Gerador
resíduos de serviços de transportes	Gerador
resíduos de mineração	Gerador

De acordo com o artigo 3º, inciso X, define-se como gerenciamento de resíduos sólidos “o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei”.

Como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos se definem os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não o aterramento. O potencial de reaproveitamento energético de resíduos sólidos no Brasil é bastante latente, pois pouco é aproveitado do que é indevidamente descartado em aterros ou até mesmo em lixões quando comparado à países na vanguarda da preocupação ambiental, como Alemanha e Japão. Desta forma, há um potencial econômico para empresas privadas atuarem em concessões, que por fomento da PNRS por meio da FUNASA¹ aumentam a atratividade do mercado energético, resultando em melhorias ambientais.

A atuação de empresas privadas em serviços públicos mediante regulação adequada é de extrema importância para o sucesso da gestão e do gerenciamento dos resíduos sólidos do PNRS, uma vez que informações e dados podem ser armazenados e

¹ Manual de orientações técnicas para elaboração de propostas para o programa de resíduos sólidos (FUNASA,[2013?]). Outros manuais podem ser encontrados no SINIR.

utilizados como base para gestão e planejamento, pois a situação atual das informações de produção é muito esparsa e não padronizada, carecendo de métricas adequadas, o que resulta em indicadores muitas vezes errôneos.

A remuneração pela prestação de serviço público de manejo de resíduos sólidos urbanos, conforme Decreto nº 7.217 de 21 de junho de 2010, artigo 14º, deverá levar em conta a adequada destinação dos resíduos coletados, bem como poderá considerar:

I - nível de renda da população da área atendida;

II - características dos lotes urbanos e áreas neles edificadas;

III - peso ou volume médio coletado por habitante ou por domicílio; ou

IV - mecanismos econômicos de incentivo à minimização da geração de resíduos e à recuperação dos resíduos gerados.

Usualmente, paga-se à empresa concessionada, dependendo dos incisos relevantes considerados pela esfera administrativa, uma tarifa mensal por tonelada de resíduos sólidos manejados, uma tarifa fixa mensal ou uma tarifa mensal em função dos custos operacionais de modo a fixar uma margem de lucro. Contudo, a estratégia adotada deve estar alinhada com o PNRS e deve assegurar competitividade no mercado de resíduos sólidos, incentivando inovação e sustentabilidade econômica, a fim de que isto reflita em níveis de serviço adequados e consequentemente na redução de impactos ambientais negativos.

É neste contexto que a redução de custos de coleta e de transporte se mostra relevante, pois viabilizaria uma maior margem de lucro para as empresas privadas interessadas na concessão, garantindo competitividade. Além disso, ambientalmente seria também interessante, pois uma operação mais eficiente tende a reduzir a emissão de gases para a atmosfera.

A partir do planejamento tático, pode-se obter indicadores que servem como entrada para análises em nível estratégico, tal como é possível avançar em um planejamento em nível operacional de modo iterativo, melhorando a qualidade de informação.

1.2 Objetivos

Os objetivos desta pesquisa são:

- Desenvolver um modelo matemático do problema de coleta domiciliar urbana de resíduos sólidos tratado nesta pesquisa, buscando minimizar o custo operacional por meio do dimensionamento da frota e particionamento em zonas de coleta para o período de planejamento;
- Aplicar método construtivo de solução viável e desenvolver algoritmos capazes de melhorar uma dada solução conhecida de forma iterativa, visando minimizar a função objetivo enunciada e respeitando as restrições do problema.

Consequentemente, são efetuados experimentos computacionais que permitam avaliar o desempenho da heurística em termos de eficiência (tempo de processamento) e eficácia (qualidade das soluções) e em seguida são levantadas possíveis extensões para continuidade desta pesquisa.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho foca o planejamento em nível tático da coleta de RSDU, sendo no Capítulo 2 apresentada uma revisão da literatura relevante para o problema. No Capítulo 3 é apresentada a caracterização do problema e sua modelagem matemática, sendo no Capítulo 4 apresentado o método de solução e algoritmos desenvolvidos. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos de testes computacionais, tanto do modelo matemático como do modelo heurístico. No Capítulo 6 são feitas considerações finais acerca do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo visa revisar a literatura existente referente ao *Problema de Coleta Domiciliar de Resíduos Sólidos* (abreviado como PCDU).

O problema estudado no presente trabalho envolve tópicos relativos ao dimensionamento de frota, à roteirização de veículos, à periodicidade de atendimento, à regionalização e a múltiplas viagens. Analisou-se, portanto, a literatura recorrente ao citado PCDU, buscando artigos correlacionados ao tema de pesquisa, que pudessem ser aplicáveis.

Ghiani *et al.* (2013) levantaram publicações referentes à pesquisa operacional da gestão de resíduos sólidos, tanto em nível estratégico como em nível tático, algumas das quais, relevantes ao problema tratado no presente trabalho.

Sahoo *et al.* (2005) realizaram um projeto para a *Waste Management*, empresa privada de grande porte de manejo de resíduos com atuação em toda a extensão dos EUA e em parte do Canadá, cujo objetivo era desenvolver uma ferramenta de roteirização que pudesse otimizar a rota de cada veículo, minimizando a quantidade de veículos em um dia, e o tempo de viagem, maximizando a compactação das rotas e balanceando a carga entre os veículos, respeitando as restrições de capacidade do veículo e das rotas, janela de tempo de almoço e a possibilidade de múltiplas viagens com alívio em pontos de transbordo (VRPMTW). O método de solução empregado foi apresentado, detalhadamente, em publicação seguinte (KIM *et al.*, 2006), em que o problema foi abordado iterativamente em duas fases, sendo na primeira aplicado um algoritmo construtivo, buscando-se um balanceamento da carga por meio de clusterização (ou regionalização), respeitando-se a compactação das rotas e gerando uma solução inicial; na segunda fase, são realizadas melhorias por meio de busca tabu e heurística de intercambiamento CROSS proposta por Taillard *et al.* (1997), a fim de se respeitar as janelas de tempo por meio do método de inserção de Solomon (SOLOMON, M. M., 1987) e roteirizar por meio do algoritmo do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem* - TSP) (LAWLER, E. L. *et al.*, 1985). Caso necessárias mais rotas, estas são criadas e o processo se repete até que não haja mais possibilidade de melhoria.

Nuortio *et al.* (2006) apresentam a resolução de um problema classificado como roteirização periódica estocástica com janela de tempo (SPVRPTW) aplicado a um caso real na Finlândia, por meio de metaheurística de busca de vizinhança variável guiada com tolerância (GVNT, *Guided Variable Neighbourhood Thresholding*) proposta por Kytöjoki (2004) e melhorada em Kytöjoki *et al.* (2007). A abordagem é também conduzida iterativamente em duas fases, sendo a fase construtiva conceitualmente similar à proposta por Kim *et al.* (2006) e a fase de melhoria baseada em trocas intrarrotas segundo as heurísticas 2-opt, Or-opt e 3-opt e posteriormente em trocas interrotas conforme estratégia de busca de vizinhança variável de Mladenovic e Hansen (1997). Além disso, são aceitas soluções que podem piorar o valor da função objetivo dentro de uma tolerância pré-estabelecida em conjunto com uma busca local guiada analisando a função objetivo.

Benjamin e Beasley (2010), baseado principalmente nos trabalhos de Kim *et al.* (2006) e Nuortio *et al.* (2006), propõem resolver o problema de VRPMTW com mais de um ponto de transbordo através das metaheurísticas apresentadas nos dois trabalhos anteriores, considerando desta vez adjacência entre os clientes como restrição.

Todavia, a abordagem do problema no presente estudo difere do tratado no problema padrão de roteirização de veículos (VRP), em que os diversos nós são atendidos formando um roteiro partindo da garagem/base até o ponto de transbordo, pois a condição de adjacência imposta implica a necessidade de compactação de nós em zonas de coleta, estas representadas por nós-semente, de modo que os roteiros ficam simplificados e o problema também pode ser entendido como de designação, de maneira similar ao apresentado por Ronen (1991).

Problemas de roteirização são altamente combinatórios, do tipo NP-hard (LENSTRA, J. K. e RINNOOY KAN, A. H. G., 1981), e para grandes dimensões, é impreterível a utilização de métodos heurísticos para a obtenção de soluções de boa qualidade, sendo difícil se definir a otimalidade. Dado o alto processamento computacional, é, portanto, vantajosa a aplicação de *multi-threading* (processamento paralelo). Como apresentado, a resolução do problema é dividida usualmente em uma primeira fase construtiva e uma segunda fase de melhoria, de modo que iterativamente se atinge uma solução heurística dada como a melhor obtida (TAN, C. C. R. e BEASLEY, J. E., 1984). Na fase construtiva, podem ser encontrados diversos algoritmos, tais como

inserção gulosa (ANGELELLI, E. e SPERANZA, M. G., 2002) e (KYTÖJOKI, J. *et al.*, 2007), varredura (ALONSO, F. *et al.*, 2008), aleatória (DRUMMOND, L. M. A. *et al.*, 2001), (TOOBAIE, S. e HAGHANI, A., 2004) e (VIDAL, T. *et al.*, 2012) e método das economias (PETCH, R. J. e SALHI, S., 2004), (HEMMELMAYR, V. C. *et al.*, 2009) e (AZI, N. *et al.*, 2010). Já na fase de melhorias, encontram-se algoritmos de busca tabu (CORDEAU, J.-F. *et al.*, 1997), (ANGELELLI, E. e SPERANZA, M. G., 2002; ALONSO, F., 2008; JIN, J. *et al.*, 2012), busca por vizinhança (MLADENOVIC, N. e HANSEN, P., 1997; PETCH, R. J. e SALHI, S., 2004; KYTÖJOKI, J. *et al.*, 2007; HEMMELMAYR, V. C. *et al.*, 2009; AZI, N. *et al.*, 2010), geração de colunas (MOURGAYA, M. e VANDERBECK, F., 2007) e algoritmo genético (DRUMMOND, L. M. A. *et al.*, 2001; TOOBAIE, S. e HAGHANI, A., 2004; SALHI, S. e PETCH, R. J., 2007; VIDAL, T. *et al.*, 2012).

A Tabela 2.1 apresenta a classificação de publicações mais relevantes encontradas para dar suporte ao problema abordado no presente trabalho, sendo todas voltadas à métodos heurísticos com aplicação em nível tático.

Tabela 2.1: Literatura relevante ao problema estudado com métodos heurísticos com aplicação em nível tático.

Referência	Problema Estudado	Função Objetivo	Dimensão do Problema	Múltiplos Períodos	Múltiplas Viagens	Existência de Estação de Transbordo	Clusterização	Método de Solução
(Drummond, L. M. A. <i>et al.</i> , 2001)	Roteirização periódica	minimizar distância total percorrida	pequeno porte - teste com até 417 clientes	sim	não	não	não	algoritmo genético a partir de cromossomos definidos por dois vetores, sendo o primeiro a ordenação dos nós e o segundo, as combinações de visita
(Angelelli, E. & Speranza, M. G., 2002)	Roteirização periódica com alívio em pontos de transbordo	minimizar distância total percorrida	pequeno porte - instâncias de Solomon até R54	sim	sim	sim	não	fase 1: atribuição inicial de dias de coleta; fase 2: roteirização para cada dia; fase 3: busca tabu com trocas em diferentes níveis
(Toobaie, S. & Haghani, A., 2004)	Particionamento de rede viária para limpeza de neve	minimizar a quantidade de veículos e as distâncias mortas balanceado a demanda	pequeno porte - teste com menos de 100 arcos	não	não	não	adjacência e balanceamento de veículos	algoritmo genético a partir de cromossomos definidos por vetor ordenado de arcos
(Petch, R. J. & Salhi, S., 2004)	Roteirização com múltiplas viagens	minimizar o máximo do tempo excedente dos veículos	?	não	sim	base	não	fase 1: construção de rotas por Clarke & Wright e varredura; fase 2: alocação de rotas a veículos; fase 3: metaheurísticas de melhoria próprias
(Nuortio, T. <i>et al.</i> , 2006)	Roteirização agendada de resíduos	minimizar distância total percorrida	grande porte - da ordem de 1E4 clientes	não	não	não	não	fase 1: construção de rotas por proximidade com a base; fase 2: busca guiada por vizinhança variável com tolerância
(Kim, S. <i>et al.</i> , 2006)	Roteirização de coleta de resíduos com janela de tempo	minimizar quantidade de veículos e distância total percorrida balanceando demanda, compactando rotas	grande porte - da ordem de 1E4 clientes	não	não	não	p-mediana e balanceamento de demanda	fase 1: clusterização; fase 2: roteirização respeitando janela de tempo; fase 3: busca tabu com trocas segundo o algoritmo CROSS
(Salhi, S. & Petch, R. J., 2007)	Roteirização com múltiplas viagens	minimizar o máximo do tempo excedente dos veículos	médio porte - testes com até 200 clientes	não	sim	base	não	algoritmo genético a partir de cromossomos definidos pelos ângulos entre clientes e base
(Mourgaya, M. & Vanderbeck, F., 2007)	Roteirização periódica	maximizar a separação em clusters balanceando a demanda	pequeno porte - entre 50 a 80 clientes	sim	não	não	compactação de rotas e balanceamento dos veículos	geração de colunas com relaxação lagrangeana e branch-and-price
(Kytöjoki, J. <i>et al.</i> , 2007)	Método heurístico para resolver problemas de roteirização de grande porte	minimizar distância total percorrida	grande porte - da ordem de 1E4 clientes	não	não	não	não	fase 1: geração de solução inicial aplicando sete algoritmos de melhoria; fase 2: reaplicação dos sete algoritmos de melhoria segundo a busca por vizinhança decremental
(Alonso, F. <i>et al.</i> , 2008)	Roteirização periódica com múltiplas viagens e restrições veículo-cliente	minimizar custo variável	médio porte - testes com até 1000 clientes	sim	sim	sim	não	fase 1: atribuição inicial de dias de coleta por varredura; fase 2: roteirização para cada dia (GENIUS); fase 3: busca tabu
(Hemmelmayr, V. C. <i>et al.</i> , 2009)	Busca variável de vizinhança para roteirização periódica	minimizar distância total percorrida	?	sim	não	não	não	fase 1: atribuição inicial de dias de coleta; fase 2: roteirização para cada dia por Clarke & Wright; fase 3: busca por vizinhança
(Benjamin, A. M. & Beasley, J. E., 2010)	Roteirização de coleta de resíduos com janela de tempo e pontos de transbordo	minimizar distância total percorrida e quantidade de veículos	médio porte - testes com cerca de 2000 clientes	não	sim	sim	não	fase 1: atribuição de cliente a veículo; fase 2: busca por vizinhança variável por meio de busca tabu
(Azi, N. <i>et al.</i> , 2010)	Roteirização com múltiplas viagens	minimizar distância total percorrida	médio porte - testes com até 1000 clientes	não	sim	base	não	fase 1: construção de rotas por Clarke & Wright; fase 2: busca adaptiva por vizinhança extensa
(Jin, J. <i>et al.</i> , 2012)	Roteirização de veículos	minimizar distância total percorrida	grande porte - testes com benchmarks	não	não	não	não	análise paralela de vizinhança de solução por busca tabu
(Vidal, T. <i>et al.</i> , 2012)	Roteirização de veículos com multi-atributos	minimizar custo total	médio porte - inúmeros testes com benchmarks	sim	não	não	não	algoritmo genético híbrido

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo, o *Problema de Coleta Domiciliar Urbana de Resíduos Sólidos* (PCDU) será devidamente caracterizado, sendo indicadas as condições de contorno deste problema, bem como um modelo matemático representativo.

3.1 Descrição do problema

A presente pesquisa foca o nível tático do PCDU, em que um plano de coleta deve ser desenvolvido para uma determinada região urbana. Isto implica definir zonas de coleta para atendimento da demanda do período de interesse, considerado como o intervalo de uma semana de seis dias úteis, e dimensionar a quantidade de veículos que minimize o custo operacional, sendo considerada uma frota homogênea.

Conforme salientado por Beigl *et al.* (2008), informações confiáveis em relação ao volume e à composição do que é gerado de resíduos sólidos são difíceis de se obter em nível desagregado, pois, diferentemente de medição de infraestrutura, como gás, água e luz, não se mede a geração de lixo por domicílio. Salvo exceções, como em sistemas em que o volume de lixo é taxado (*pay-as-you-throw*) ou quando há certo nível de agregação, como em sistemas de containerização (domiciliar ou comunitária), ou em serviço privado de coleta. A situação no Brasil não foge à exceção, e, portanto, a demanda deve ser estimada em função de análise estatística e de dados históricos disponíveis, seja por operadoras ou órgãos públicos.

O censo realizado pelo IBGE apresenta dados socioeconômicos em nível censitário (IBGE, 2010), sendo possível obter uma estimativa da produção semanal de resíduos sólidos a partir de análise de regressão múltipla, correlacionando-a com dados históricos de coleta (BACH *et al.*, 2004; AFROZ *et al.*, 2010; HOCKETT *et al.*, 1995) ou por outros métodos de projeção (NUORTIO *et al.*, 2004; CHEN e CHANG, 1999). A partir da análise e extrapolação de dados históricos, informações como tempos de coleta, distâncias percorridas e custo de coleta podem ser estimados para cada setor censitário. Tais análises foram conduzidas no decorrer do projeto que motivou a presente pesquisa, contudo, será apresentado aqui somente um esboço.

Um setor censitário é a menor unidade territorial oficial geográfica e é definido como a área contínua em função de uma quantidade amostral pré-definida de domicílios que um agente censitário consegue percorrer em campo durante o período de pesquisa. As delimitações geográficas são pré-estabelecidas pelo IBGE e consideram o adensamento de domicílios, o que pode causar distorções quando realizado o planejamento em nível operacional, uma vez que este requer conhecimento da malha viária, porém, em nível tático, tais distorções são toleradas por não haver informações mais adequadas ao problema.

Dispondo de dados históricos, pode-se relacionar as demandas de cada zona de coleta existente com a composição aproximada e equivalente da agregação de setores censitários (pseudo zona), associando a cada conjunto a respectiva demanda. Através de regressão linear múltipla, podem ser correlacionados a demanda de cada pseudo zona com os dados socioeconômicos agregados do conjunto de setores censitários respectivos, obtendo-se uma expressão aplicável em nível desagregado, realizados os devidos ajustes de escala, extrapolando, portanto, informações como tempos e distâncias de coleta e de viagem tal como a demanda semanal em nível censitário. Adicionalmente, parte-se da premissa que as decisões em nível estratégico são definidas, tais como região de atuação e demanda a ser atendida (divisão em turnos considerada pré-estabelecida) e que existe pelo menos um plano de coleta capaz de atender cada setor.

Para o problema tratado nesta pesquisa, busca-se especificar as zonas de coleta, sendo uma zona definida como o agrupamento de setores censitários que serão visitados por um veículo em um dia (ou mais especificamente no respectivo turno analisado). Assim, está implícito que o volume coletado deverá ser inferior à capacidade do veículo coletor típico. Na hipótese de uma zona conter mais de um setor censitário, requer-se que os setores sejam adjacentes entre si. Tal imposição reflete uma prática operacional do sistema real estudado, e permite a geração de rotas supostamente mais compactas, em que os motoristas desenvolvem um melhor conhecimento da região a ser percorrida (MOURGAYA e VANDERBECK, 2007), de modo a facilitar o planejamento em nível operacional em uma eventual etapa posterior. Estes aspectos são importantes em um PCDU, principalmente quando da execução dos serviços de coleta.

O atendimento em cada setor censitário deve seguir um *programa de coleta*, que consiste em um conjunto de dias pré-fixados em que os setores, em suas correspondentes zonas, serão visitados. Assim, inerente a um programa tem-se a frequência de coleta de um setor. A Tabela 3.1 ilustra alguns programas de coleta, com frequências iguais a 1 (programas A, B e C), a 2 (programas D e E), a 3 (programas F e G), a 4 (programas H e I), a 5 (programas J e K) e a 6 (programa L). Não são consideradas coletas aos domingos e o espaçamento entre dias de coleta deve ser o mais esparsos possível, a fim de não acumular uma demanda alta para a próxima coleta. Além disso, a distribuição da demanda não será uniforme ao longo da semana, sendo adotada como conhecida uma curva sazonal média, a qual estabelece a relação entre demanda e o programa de coleta, conforme apresentado no exemplo da Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Exemplo de combinações de programas de coleta disponíveis para um setor censitário.

dia da semana	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab
programa	1, há coleta no dia; 0, não há coleta						
A; freq=1	0	1	0	0	0	0	0
B; freq=1	0	0	0	0	1	0	0
C; freq=1	0	0	0	0	0	1	0
D; freq=2	0	0	1	0	0	1	0
E; freq=2	0	0	0	1	0	0	1
F; freq=3	0	1	0	1	0	1	0
G; freq=3	0	0	1	0	1	0	1
H; freq=4	0	1	0	1	1	0	1
I; freq=4	0	1	1	0	1	1	0
J; freq=5	0	1	1	0	1	1	1
K; freq=5	0	1	1	1	1	1	0
L; freq=6	0	1	1	1	1	1	1

Tabela 3.2: Exemplo da sazonalidade da demanda em função das diversas combinações de coleta e da curva de sazonalidade de produção semanal média.

dia da semana	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab
sazon. média	10%	16%	16%	16%	16%	16%	10%
programa	proporção da produção semanal no dia de coleta						
A; freq=1	100%						
B; freq=1	100%						
C; freq=1	100%						
D; freq=2	52%						
E; freq=2	55%						
F; freq=3	36%						
G; freq=3	39%						
H; freq=4	23%						
I; freq=4	36%						
J; freq=5	23%						
K; freq=5	36%						
L; freq=6	23%						

O critério para definir as frequências de coleta (mínima e máxima) dos setores censitários será baseado em uma curva ABC do Diagrama de Pareto (ver Figura 3.1), das demandas dos setores, usando os limites indicados na Tabela 3.3. Os setores que pertencem ao “grupo A” de demanda (maiores produtores que correspondem a 60% da produção semanal acumulada), deverão ser visitados todos os 6 dias da semana. Já os setores que pertencem ao “grupo B” de demanda (produtores intermediários, entre 60 e 95% da produção semanal acumulada), devem ser visitados entre 3 e 6 vezes. Por último, os setores remanescentes podem ser visitados em qualquer frequência (1 a 6 vezes por semana).

Figura 3.1: Curva ABC de produção e classificação de setores censitários por nível de relevância.

Tabela 3.3: Classificação da produção semanal pela curva ABC.

% acumulada da produção semanal total	frequência semanal mínima de coleta	frequência semanal máxima de coleta
(A) 60%	6	6
(B) 95%	3	6
(C) 100%	1	6

Associado ao problema de definição das zonas de coleta está o problema do dimensionamento dos recursos necessários para efetuar a coleta. E, subjacente à questão do dimensionamento, tem-se o problema de como alocar os veículos às zonas de coleta, a cada dia, roteirizando-os. Portanto, faz-se necessário apresentar a rede, a qual será composta pelos seguintes elementos:

- *Garagem* – é um nó da rede, de onde os veículos coletores saem e retornam ao término da jornada de trabalho. Para o problema desta pesquisa será considerada apenas uma garagem.
- *Estação de transbordo* – é um nó da rede para o qual o veículo carregado, após ter visitado uma zona de coleta, se dirige e onde o veículo é esvaziado, tornando-se apto a realizar uma nova rota ou para se dirigir para garagem. Para o problema desta pesquisa será considerado apenas uma estação de transbordo.

- *Setor censitário* – é um nó da rede, centroide da área onde está concentrada a demanda dos domicílios daquele setor.
- *Nó-semente* – cada zona de coleta, formada por um agrupamento de setores censitários adjacentes, será *representada* por um nó, designado de nó-semente (ver Figura 3.2(a)). Este nó será determinado pelo modelo de decisão, como o nó que contabiliza o menor custo dentre aqueles que compõem uma zona de coleta, e servirá para cálculo dos tempos de deslocamento do veículo entre a garagem e zona de coleta e entre zona de coleta e a estação de transbordo.
- *Arcos* – entre cada um dos nós da rede é conhecido um arco, cuja distância e tempo de deslocamento são fornecidos.

O turno de um veículo se inicia e se encerra na base (garagem). Na hipótese de que, em um dia de trabalho, o veículo realize apenas 1 rota, esta terá início na base, de onde o veículo coletor se deslocará até o nó-semente, atendendo a correspondente zona de coleta, e depois prosseguindo até uma estação de transbordo para alívio da carga, após o qual regressará à base. No caso de 2 rotas serem realizadas, após o transbordo da carga, o veículo se deslocará para o atendimento da próxima zona de coleta de seu roteiro (nó-semente), retornando à estação de transbordo para então regressar à base, fechando o ciclo do turno. Tais roteiros são apresentados na Figura 3.2(b) e na Figura 3.3.

Cabe ressaltar que a roteirização interna à zona de coleta é tratada de forma simplificada e agregada, sendo os tempos, distâncias e custos internos somados.

Figura 3.2: (a) Exemplo de zona de coleta; (b) Exemplo de roteiro com viagem adicional.

Figura 3.3: Esquema de roteiros em função da quantidade de viagens (ou rotas).

Em relação ao veículo coletor serão aplicadas as seguintes restrições:

- *Capacidade do veículo* – considerando frota homogênea, a capacidade depende do tipo de veículo coletor, sendo analisado 3.500 kg, 9.000 kg e 12.000 kg;
- *Jornada de trabalho* – a jornada de trabalho regular considerada é de 8 horas diárias, podendo ser diferenciada em turno diurno e turno noturno, porém tal diferenciação será tratada de forma independente, pois se trata de uma decisão estratégica;
- *Número de viagens por turno* – a quantidade máxima de viagens por turno para cada veículo é limitada pela capacidade física dos coletores, uma vez que o serviço de coleta considerado é realizado de forma manual, sendo adotado como prática o valor de 3 viagens, calibrado para um veículo de capacidade de 12.000 kg.

A hora-extra é uma extensão da jornada de trabalho regular, em que se permite violá-la mediante pagamento de adicional horário. O custo excedente é calculado para cada turno e cada veículo, sendo aplicado sobre as duas primeiras horas um fator adicional salarial de 50%, e acima desta primeira faixa, um fator adicional salarial de 100%, proporcional à quantidade excedida. As regras da CLT (Consolidação das Leis do Trabalho) e acordos sindicais ainda regulamentam a quantidade máxima de horas extras acumuladas a cada semana para cada funcionário, porém tais restrições não serão consideradas, uma vez que no planejamento tático proposto na presente pesquisa a escala de trabalho dos funcionários não será tratada. Ainda assim, a restrição de jornada de trabalho é estendida para 12 horas, com 4 horas de *buffer* além da jornada regular para absorver as horas-extras de cada turno quando necessárias, e também evitando eventual superposição entre turno diurno e noturno.

A rede utilizada (Figura 3.4) para o planejamento é uma simplificação da rede viária da região considerada, formada pelos centroides dos setores censitários (nós) conectados em função da relação de adjacência (arcos), reduzindo a complexidade da rede, ao se eliminar a necessidade de se ter a informação em nível de detalhe desagregado (KULCAR, T., 1996). A Figura 3.4(a) é uma representação de rede que é aplicado o planejamento operacional, em que a abordagem por modelos de arco capacitado (CARP) fariam mais sentido, ao passo que a Figura 3.4(c) é uma representação simplificada da rede que permite o planejamento em nível tático ao se agregar a informação de subconjuntos de arcos em nós centroides.

Figura 3.4: Transformação da rede: (a) rede viária urbana; (b) delimitação de áreas; (c) rede simplificada.

Há formas de associar o planejamento em nível tático e o planejamento em nível operacional, porém, o nível de detalhe de informação exigido é muito grande,

requerendo estimativas de produção por sentido do arco, além de tabelas de conversões dos nós da rede (MALE, J. W.; LIEBMAN, J. C., 1978), cuja complexidade adicional não traria ganho proporcional.

Conforme apresentado, pode-se encarar o PCDU, portanto, como um problema em nível tático de dimensionamento de frota com roteirização periódica, múltiplas viagens e designação com adjacências.

3.2 Modelo

O modelo matemático a seguir apresentado contempla um conjunto de decisões que são inerentes ao PCDU, tais como (1) decidir quais veículos utilizar em cada dia; (2) escolher quais setores censitários serão os nós sementes; (3) formar zonas de coleta por meio da clusterização de setores censitários que sejam adjacentes; (4) escolher a combinação periódica de coleta das zonas de coleta; e (5) agrupar rotas em um veículo. A demanda diária de cada setor censitário depende da combinação periódica de coleta, de modo que, um mesmo setor censitário pode fazer parte de zonas de coleta distintas para cada dia atendido. O modelo visa a minimização de custo associado à utilização e à ociosidade dos veículos, tal como o custo de combustível correspondente às rotas realizadas. Além disso, pode-se contabilizar o custo adicional de se utilizar horas-extra. As restrições do problema são definidas pelas capacidades do veículo (carga, tempo e quantidade máxima de viagens diárias) e pela continuidade das zonas de coleta.

3.2.1 Dados de Entrada

Os seguintes dados de entrada caracterizam o problema:

$N = \{1, \dots, n\}$ Setores censitários (índice i e j)

$M = \{1, \dots, m\}$ Veículos (índice k)

$T = \{1, \dots, 6\}$ Dias da semana (índice t)

$R = \{1, \dots, 3\}$	Rotas (índice r)
$P = \{1, \dots, l\}$	Programas de coleta (índice p)
$P_j \subseteq P$	Programas de coleta válidos para o setor j
$\tilde{a}_{pt}$	Parâmetro binário que será igual a 1 se o programa de coleta p utilizar o dia t e 0, em caso contrário
$\hat{a}_{ij}$	Parâmetro binário que será igual a 1 se o setor i é adjacente ao setor j e 0, em caso contrário
$\tilde{q}_j$	Demanda total semanal do setor j
$\tilde{q}_{jpt}^1$	Parcela da demanda do setor j a ser coletada no dia t segundo o programa p de coleta
$\tilde{q}_{jpt}^2$	Tempo de coleta da demanda do setor j a ser coletada no dia t segundo o programa p de coleta
Q_k^1	Capacidade de coleta do veículo k
Q_k^2	Jornada máxima do turno do veículo k
FI_k	Custo fixo de se ter o veículo k operante
Tv_{jk1}^t	Tempo de viagem base – setor j – estação de transbordo – base , do veículo k , no dia t , relativo à primeira rota do veículo (observar que o trecho final entre estação de transbordo – base foi incorporada na rota 1)
Tv_{jkr}^t	Tempo de viagem estação de transbordo – setor j – estação de transbordo do veículo k , no dia t , relativo às rotas $r=2$ e $r=3$ que vier a fazer
CV_{jk1}^t	Custo de viagem base – setor j – estação de transbordo – base , do veículo k , no dia t , relativo à primeira rota do veículo (observar que o trecho final entre estação de transbordo – base foi incorporada na rota 1)

CV_{jkr}^t	Custo de viagem estação de transbordo – setor j – estação de transbordo do veículo k , no dia t , relativo às rotas 2 e 3 que vier a fazer
Te^1	Tempo a partir do qual se contabiliza a hora-extra da primeira faixa
Te^2	Tempo a partir do qual se contabiliza a hora-extra da segunda faixa
ϕ^1	Custo adicional salarial da hora-extra da primeira faixa
ϕ^2	Custo adicional salarial da hora-extra da segunda faixa

3.2.2 Variáveis de Decisão

Como variáveis de decisão são definidas as alocações de programas p a setores censitários j (x_{jp}), as alocações de setores censitários j a rotas r de veículos k no dia t (y_{jkr}^t), as designações de nó-semente do setor censitário j sobre a rota r do veículo k no dia t (z_{jkr}^t) e as designações de rota r no dia t a veículos k (w_{kr}^t). Adicionalmente, são computados a quantidade de carga do setor j designada ao veículo k ao percorrer a rota r no dia t (q_{jkr}^{1t}), o tempo de coleta associada à carga do setor j designada ao veículo k ao percorrer a rota r no dia t (Tc_{jkr}^t) e a quantidade de horas-extra da primeira e segunda faixa do veículo k no dia t (Te_k^{1t}) e (Te_k^{2t}), respectivamente. A fim de garantir a continuidade das zonas de coleta, introduziu-se uma variável inteira positiva de fluxo f_{ijk}^t , que contabiliza a conectividade entre os setores i e j para cada rota r do veículo k do período t .

x_{jp}	Variável binária que será igual a 1 se o programa p de coleta for designado para o setor j
y_{jkr}^t	Variável binária que será igual a 1 se o setor j for atribuído à rota r do veículo k no dia t

z_{jkr}^t	Variável binária que será igual a 1 se o setor j for o nó-semente da zona de coleta da rota r do veículo k no dia t
w_{kr}^t	Variável binária que será igual a 1 se o veículo k percorrer a rota r no dia t
q_{jkr}^{1t}	Quantidade de carga do setor j designada ao veículo k ao percorrer a rota r no dia t
Tc_{jkr}^t	Tempo de coleta associada à carga do setor j designada ao veículo k ao percorrer a rota r no dia t
Te_k^{1t}	Quantidade de horas-extra da primeira faixa do veículo k no dia t
Te_k^{2t}	Quantidade de horas-extra da segunda faixa do veículo k no dia t
f_{ijkr}^t	Fluxo entre setores i e j para cada rota r do veículo k e período t

3.2.3 Função objetivo

A equação (Eq. 3.1) é a função objetivo do problema contemplando (1) o custo de se utilizar o veículo k no período t , associado ao percurso base – nó-semente – nó de transbordo – base, (2) o custo variável de se visitar cada nó-semente, composto por um custo associado ao consumo de combustível relacionado à distância percorrida e um custo associado ao consumo de combustível relacionado ao tempo de coleta para cada zona de coleta, podendo ser ponderado por fatores constantes (PP preço do combustível, CD consumo por distância percorrida e CH consumo horário) e (3) incluída uma penalização de se usar horas-extra para cada veículo k no dia t .

$$\begin{aligned}
\min C = & \sum_{k \in M} \sum_{\substack{t \in T; \\ r=1}} FI_k w_{kr}^t + PP \sum_{t \in T} \sum_{k \in M} \sum_{r \in R} \sum_{j \in N} (CD CV_{jkr}^t z_{jkr}^t + CH Tc_{jkr}^t) \\
& + \sum_{k \in M} \sum_{t \in T} (\phi^1 Te_k^{1t} + \phi^2 Te_k^{2t})
\end{aligned} \tag{Eq. 3.1}$$

3.2.4 Restrições

Na sequência são apresentadas as restrições às quais o modelo está sujeito, tais como as equações de definições e relações entre as variáveis do problema.

$$\sum_{p \in P_j} x_{jp} = 1 \quad \forall j \tag{Eq. 3.2}$$

$$\sum_k \sum_r y_{jkr}^t = \sum_{p \in P_j} \tilde{a}_{pt} x_{jp} \quad \forall j, t \tag{Eq. 3.3}$$

$$q_{jkr}^{1t} \geq \left(\sum_{p \in P_j} \tilde{q}_{jpt}^1 x_{jp} \right) - (1 - y_{jkr}^t) Q_k^1 \quad \forall j, k, r, t \tag{Eq. 3.4}$$

$$\sum_j q_{jkr}^{1t} \leq Q_k^1 \quad \forall k, r, t \tag{Eq. 3.5}$$

$$Tc_{jkr}^t \geq \left(\sum_{p \in P_j} \tilde{q}_{jpt}^2 x_{jp} \right) - (1 - y_{jkr}^t) Q_k^2 \quad \forall j, k, r, t \tag{Eq. 3.6}$$

$$\sum_r \sum_j (Tv_{jkr}^t z_{jkr}^t + Tc_{jkr}^t) \leq Q_k^2 + Te_k^{1t} + Te_k^{2t} \quad \forall k, t \tag{Eq. 3.7}$$

$$Te_k^{2t} \leq Te^2 \quad \forall k, t \tag{Eq. 3.8}$$

$$Te_k^{1t} \leq Te^1 \quad \forall k, t \tag{Eq. 3.9}$$

$$\sum_j y_{jkr}^t \leq nw_{kr}^t \quad \forall k, r, t \quad (\text{Eq. 3.10})$$

$$\sum_j z_{jkr}^t \geq w_{kr}^t \quad \forall k, r, t \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$z_{jkr}^t \leq y_{jkr}^t \quad \forall j, k, r, t \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$\sum_j z_{jk2}^t \leq \sum_j z_{jk1}^t \quad \forall k, t \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$\sum_j z_{jk3}^t \leq \sum_j z_{jk2}^t \quad \forall k, t \quad (\text{Eq. 3.14})$$

$$f_{ijkr}^t \leq ny_{jkr}^t \quad \forall i, j, k, r, t \quad (\text{Eq. 3.15})$$

$$f_{ijkr}^t \leq ny_{ikr}^t \quad \forall i, j, k, r, t \quad (\text{Eq. 3.16})$$

$$\sum_i f_{ijkr}^t \hat{a}_{ij} \leq n(1 - z_{jkr}^t) \quad \forall j, k, r, t \quad (\text{Eq. 3.17})$$

$$\sum_j f_{ijkr}^t \hat{a}_{ij} \leq \sum_j y_{jkr}^t \quad \forall i, k, r, t \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$\sum_i f_{ijkr}^t \hat{a}_{ij} - \sum_i f_{jikr}^t \hat{a}_{ji} \geq y_{jkr}^t - (n + 1)z_{jkr}^t \quad \forall j, k, r, t \quad (\text{Eq. 3.19})$$

$$x_{jp}, y_{jkr}^t, z_{jkr}^t, w_{kr}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, r, t, p \quad (\text{Eq. 3.20})$$

$$q_{jkr}^{1t}, q_{jkr}^{3t}, Tc_{jkr}^t, Te_k^{1t}, Te_k^{2t}, f_{ijkr}^t \geq 0 \quad \forall j, k, r, t$$

A restrição (Eq. 3.2) força que um programa p de coleta, contido em um conjunto pré-determinado P_j , seja atribuído ao setor j . A restrição (Eq. 3.3) vincula o programa p de coleta escolhido para o setor j (por meio da variável x_{jp}) à variável y_{jkr}^t , de forma que em cada dia t em que há coleta programada, um veículo k e uma rota r são escolhidos para o setor j . Em função do programa p de coleta e do veículo k escolhidos para o

setor j , a restrição (Eq. 3.4) irá atualizar a quantidade a ser transportada pelo veículo, de forma que a sua capacidade seja respeitada em cada rota r percorrida no dia t , sendo isto verificado na restrição (Eq. 3.5). Computa-se o tempo de coleta pela (Eq. 3.6) e o tempo total de jornada é controlado na restrição (Eq. 3.7), sendo este tempo composto dos tempos de deslocamento entre a base e o nó semente, o nó semente e o ponto de transbordo, o ponto de transbordo e o nó semente (quando houver mais de uma viagem), o ponto de transbordo e a base, e os tempos de coleta propriamente ditos, além de computar as horas-extras de cada veículo k para cada dia t . As restrições (Eq. 3.8) e (Eq. 3.9) contabilizam a hora-extra dos veículos para cada dia t , respectivamente às faixas de adicional de salário. A restrição (Eq. 3.10) controla se o veículo k foi utilizado na rota r do dia t , limitada superiormente à quantidade máxima de nós n . A restrição (Eq. 3.11) força a existência de um nó semente j para o veículo k na rota r e no dia t , caso o mesmo tenha sido utilizado. A restrição (Eq. 3.12) força que o nó semente seja um nó dentre aqueles que compõem a zona de coleta do veículo k na rota r . A restrição (Eq. 3.13) só permite a existência da rota 2 para o veículo k no dia t , se a rota 1 tiver sido realizada. A restrição (Eq. 3.14) faz o mesmo papel, da rota 3 em relação à rota 2.

A fim de se assegurar a continuidade da zona de coleta, introduz-se o conceito da chamada “árvore de adjacência”, em que os nós pertencentes a uma determinada zona de coleta devem estar conectados por meio dos arcos de adjacência e devem de algum modo alcançar o nó-semente correspondente, isto é, deve haver um fluxo positivo entre eles. A (Eq. 3.15) e a (Eq. 3.16) fazem com que o fluxo seja nulo quando o nó j não pertencer à zona de coleta. A (Eq. 3.17) faz com que o nó-semente seja apenas provedor de fluxo, impondo que os demais nós de uma zona de coleta somente recebam fluxo. A (Eq. 3.18) limita o fluxo que sai do nó-semente pela quantidade de nós que a zona de coleta comporta. A (Eq. 3.19) representa o balanço de massa do fluxo em cada nó; se um nó não pertence à zona de coleta, então não deve ser contabilizado fluxo; se o nó pertencer à zona de coleta e não for nó-semente, a diferença entre o fluxo que entra e o fluxo que sai deve ser maior que um; e se o nó for nó-semente, o fluxo já é definido pela (Eq. 3.17). O conjunto de restrição (Eq. 3.20) define o espaço de solução.

3.2.5 Extensão do modelo

A equação (Eq. 3.21) é uma variação da função objetivo, em que se busca balancear a frota ao longo da semana ao penalizar a não utilização de um veículo operante nos demais dias da semana por um fator FF_k . Isto se mostrou necessário a título de reduzir o espaço de solução e assim diminuir a complexidade computacional, uma vez comprovado empiricamente que o modelo matemático excedia a capacidade de processamento.

É introduzida adicionalmente uma variável binária ww_k que contabiliza especificamente a utilização do veículo k , encadeando seu uso entre os diferentes dias da semana (Eq. 3.22).

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{k \in M} \left(FI_k ww_k + FF_k \left(|T| * ww_k - \sum_{\substack{t \in T; \\ r=1}} w_{kr}^t \right) \right) + \\ & + PP \sum_{t \in T} \sum_{k \in M} \sum_{r \in R} \sum_{j \in N} (CD CV_{jkr}^t z_{jkr}^t + CH T c_{jkr}^t) + \\ & + \sum_{k \in M} \sum_{t \in T} (\phi^1 T e_k^{1t} + \phi^2 T e_k^{2t}) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

onde,

FF_k Custo diário de não utilizar o veículo k ; interpreta-se como um custo de oportunidade de se dispor de um veículo, mas deixa-lo ocioso em um dia

ww_k Variável binária que será igual a 1 se o veículo k for utilizado

e

$$\sum_t w_{k1}^t \leq |T| ww_k \quad \forall k \quad (\text{Eq. 3.22})$$

3.3 Dimensão do problema

A partir do modelo matemático se pode observar o grau de complexidade do problema do PCDU, ainda que as premissas adotadas sejam de certo modo simplificadoras. A quantidade de variáveis binárias é da ordem de grandeza de $2|N|^2$, dado que a quantidade de setores censitários ($|N|$) é superior às dimensões individuais dos demais índices e pode ser equiparável à composição $|M||T||R|$, conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Ordem de grandeza das variáveis binárias do problema.

Variável binária	Dimensão da variável	Ordem de grandeza
x_{jp}	$ N P $	$ N $
y_{jkr}^t	$ N M T R $	$ N ^2$
z_{jkr}^t	$ N M T R $	$ N ^2$
w_{kr}^t	$ M T R $	$ N $
ww_k	$ M $	$ M $

A Tabela 3.5 apresenta uma estimativa da quantidade de variáveis binárias necessárias para se resolver o problema por meio do modelo matemático desenvolvido. Nota-se que, para municípios de grande e médio porte, como São Paulo e Curitiba, é interessante do ponto de vista estratégico subdividir a região em áreas de atuação distintas, a fim de reduzir a complexidade do problema, tal como segregar o serviço de coleta em turnos diurno e noturno, aumentando a utilização dos recursos de equipamentos. Ainda assim, municípios pequenos apresentam uma ordem de grandeza considerável em relação à quantidade de variáveis binárias; trata-se, portanto, de um problema de larga escala, como já era de se esperar, cuja resolução deve ser direcionada a meta-heurísticas e programação matemática.

Tabela 3.5: Porte de municípios em relação à quantidade de variáveis binárias no modelo matemático.

Município	# setores censitários	# variáveis binárias
São Paulo	16000	5E+08
Curitiba	2400	1E+07
Campinas	1700	6E+06
Atibaia	350	2E+05

4 MÉTODO DE SOLUÇÃO

O presente capítulo apresenta os métodos que serão aplicados para resolver o *Problema de Coleta Domiciliar Urbana de Resíduos Sólidos* (PCDU).

Na análise da literatura foi verificada a utilização de heurísticas construtivas, métodos de busca e meta-heurísticas para resolver variantes do problema desta pesquisa, incluindo GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), algoritmo genético, busca tabu e busca em vizinhança variável, contendo as devidas adaptações às particularidades do problema estudado. Contudo, é importante destacar que nenhum destes problemas trata o PCDU como um problema de designação de clientes a veículos e a dias de coleta de forma a conciliar concomitantemente a necessidade de continuidade das zonas de coleta (clusterização), a periodicidade do serviço e a possibilidade de múltiplas viagens. Assim, o método proposto se diferencia dos existentes e requer diversas adaptações para o problema em questão.

Foi desenvolvido um algoritmo baseado em GRASP (etapa construtiva e etapa de melhoria por busca tabu) associado a uma estratégia de *multi-starting* com melhoria por busca local. Os algoritmos serão descritos em detalhe, juntamente com os respectivos pseudocódigos, cuja nomenclatura de parâmetros é apresentada na tabela abaixo.

Tabela 4.1: Nomenclatura de parâmetros do modelo heurístico.

Nomenclatura	Descrição
i, j	Setor censitário
$zc, zc1, zc2$	Zona de coleta
t	Período de coleta
$k, k1, k2$	Veículo
$p, p1, p2$	Programa de coleta
nZ_{max}	Quantidade máxima de zonas de coleta
nV_{max}	Quantidade máxima de veículos
N	Conjunto de setores censitários
N'	Subconjunto de setores censitários
$Z(t)$	Conjunto de zonas de coleta do período t
$V(t)$	Conjunto de veículos do período t
$SC(t)$	Conjunto de setores censitários atendidos no período t

Nomenclatura	Descrição
$P(i)$	Conjunto de programas de coleta disponíveis para o setor i
$F(zc)$	Conjunto de setores censitários pertencentes à zona de coleta zc localizados em sua fronteira
$A(zc)$	Conjunto de setores censitários adjacentes à zona de coleta zc e pertencentes a $SC(t)$
$A'(zc)$	Conjunto de setores censitários disponíveis (não alocados a nenhuma zona de coleta zc) e pertencentes a $A(zc)$
μ	Quantidade de <i>threads</i> gerados pela estratégia <i>multi-starting</i>
$p(i)$	Programa de coleta alocado ao setor i
S	Solução atual
S^*	Melhor solução
$f(S)$	Valor da função objetivo da solução atual
$SC'(t)$	Conjunto de setores censitários atendidos no período t , ordenados decrescentemente pela demanda
δ	Indicador de economia para escala de preferência de alocação de viagens
$Z'(t)$	Conjunto de zonas de coleta do período t , ordenado crescentemente em função de δ
$Z''(t)$	Conjunto de zonas de coleta do período t , ordenado decrescentemente em função de δ
$iterinf_max$	Quantidade máxima de iterações do nível inferior
$ZN, ZN(S(t))$	Conjunto da vizinhança em função de $SC(t)$, em nível inferior, com movimentos do tipo 1 (entre zonas de coleta)
$VN, VN(S(t))$	Conjunto da vizinhança em função de $SC(t)$, em nível inferior, com movimentos do tipo 2 (entre veículos)
mov	Movimento
$tabuZ_i(zc1, zc2)$	Matriz da lista tabu de movimentos entre zonas de coleta para cada setor i
$tabuV_zc(k1, k2)$	Matriz da lista tabu de movimentos entre veículos para cada zona de coleta zc
ΘZ	Valor de mandato da busca tabu (<i>tenure</i>) para lista $tabuZ$
ΘV	Valor de mandato da busca tabu (<i>tenure</i>) para lista $tabuV$
ΘP	Valor de mandato da busca tabu (<i>tenure</i>) para lista $tabuP$
$S(t)$	Solução parcial do período t
S'	Solução alterada pelo movimento corrente
$S^*(t)$	Melhor solução parcial do período t
$f'(S(t))$	Valor parcial da função objetivo da solução parcial do período t
$itersup_max$	Quantidade máxima de iterações do nível superior
$\bar{N}$	Conjunto da vizinhança, em nível superior, com movimentos de troca de programa de coleta
$\bar{\bar{N}}$	Conjunto da vizinhança, em nível superior, com movimentos de troca de programa de coleta, limitada por um <i>threshold</i>

Nomenclatura	Descrição
ω	<i>Threshold</i> que limita $\bar{N}$
tp_max	Tempo máximo de processamento

4.1 Algoritmo principal

A resolução do problema desta pesquisa pode ser conduzida decompondo-se o problema em dois níveis, conforme discutido por Beltrami e Bodin (1974). Estes níveis são:

- I. Definição dos dias de coleta para cada setor censitário.
- II. Definição dos roteiros dos veículos, gerando as zonas de coletas para cada dia.

Dada a influência do nível I na solução geral do problema, faz-se necessário flexibilizar a escolha dos dias de coleta de cada setor censitário, de forma a possibilitar uma maior varredura do espaço de solução. Esta flexibilização será garantida por meio de um método repetitivo de solução, conhecido como estratégia de múltiplos inícios (ou múltiplas repetições), ou *multi-starting*. A partir daqui, para a heurística, serão denominados como **nível superior** e **nível inferior**, respectivamente.

Conforme descrito por Marti *et al.* (2013), a estratégia *multi-starting* consiste em aplicar, de forma repetitiva, uma regra construtiva probabilística, em que os elementos a serem incluídos à solução são sorteados a cada iteração, até que uma solução completa seja formada. A solução gerada será comparada com a melhor solução conhecida. Será considerada a solução heurística aquela que gerar o melhor valor da função objetivo (o melhor ótimo local) ao final do processamento.

No caso da heurística desenvolvida nesta pesquisa, o processo construtivo será feito em um ambiente *multi-threading*, indicado na Figura 4.1. Isto significa que serão disparados diversos processos em paralelo, de índices de 1 a μ , sendo que cada *thread* trabalhará com uma configuração de dias de coleta definida de forma probabilística. Para cada *thread*, além da heurística construtiva, será também aplicado sequencialmente um método de busca local (em nível inferior).

Figura 4.1: Obtenção da solução heurística segundo estratégia *multi-starting*.

A Figura 4.2 ilustra os passos da heurística, baseada na estratégia *multi-starting*, implementada em *threads* paralelos. São pré-estabelecidas as programações de coleta disponíveis $P(i)$ para cada setor censitário segundo curva ABC do Diagrama de Pareto, priorizando-se o atendimento com maiores frequências para os setores de maior demanda, conforme discutido na seção 3.1. Para cada *thread* μ sorteia-se de modo probabilisticamente uniforme uma configuração de programação de coleta $p(i)$ para cada setor i , dentre a disponibilidade $P(i)$, a partir da qual é gerada uma solução viável $S(t)$ para cada período t , por meio de algoritmo construtivo. Dentro de cada período t é processada a heurística de busca em nível inferior, em que o programa de coleta dos setores é mantido e a solução parcial $S(t)$ é reestruturada a fim de se buscar melhorias no valor parcial da função objetivo $f'(S(t))$ por meio da avaliação da realocação de setores censitários entre zonas de coleta e da realocação de zonas de coleta entre veículos, atualizando a solução parcial $S(t)$. Para cada *thread* μ , portanto, obtém-se uma solução S , composta por todas as soluções parciais $S(t)$, da qual é avaliado o valor da função objetivo $f(S)$ para se eleger a melhor solução obtida S^* .

AlgoritmoMultiStarting()	
1	Definir os programas de coleta compatíveis para cada setor $i \rightarrow P(i)$
2	Inicializar o ambiente multi-threading
3	Inicializar a solução heurística S^* como vazia
4	Para cada thread μ
5	Definir uma configuração inicial, escolhendo aleatoriamente um programa compatível de coleta para cada setor i ; $p(i) \in P(i)$
6	Para cada período t
7	Inicializar uma solução vazia $S(t)$ que contém o conjunto $SC(t)$ de setores atendidos no período t
8	Atualizar $S(t) \leftarrow$ Heurística Construtiva(t)
9	Atualizar $S(t) \leftarrow$ Heurística de Busca Local em Nível Inferior(t)
10	Próximo período t
11	Atualizar S como a solução composta por soluções parciais $S(t)$
12	Se $f(S) < f(S^*)$, então atualizar $S^* \leftarrow S$
13	Fim do thread
14	Obtém S^* como a solução heurística

Figura 4.2: Algoritmo de inicialização *multi-starting*.

A estratégia de *multi-starting* propõe uma diversificação da geração de soluções viáveis e, associada a uma heurística de intensificação como a busca local, permite uma maior probabilidade de obtenção de soluções melhores. Como extensão deste processo de diversificação, é proposta uma heurística de melhoria por busca local em nível superior, a ser executada após a obtenção da melhor solução heurística da estratégia de *multi-starting*, sendo este algoritmo detalhado na seção 4.3.2.

4.2 Algoritmo construtivo

Em cada *thread*, após ser definida uma programação de coleta, o procedimento construtivo é acionado, cujo algoritmo se baseia na fase inicial do GRASP, em que o emprego de estratégias gulosas permite a geração de solução viável. O algoritmo proposto é subdividido em duas partes, uma para a geração de zonas de coleta e outra para a geração de veículos, compondo conjuntamente a solução.

A construção de uma solução viável é feita para cada dia da semana, sendo o atendimento de cada setor censitário realizado em função da programação de coleta atribuída no estágio anterior. Portanto, em cada dia da semana existirão setores censitários $SC(t)$ que deverão ser atendidos, os quais serão classificados decrescentemente $SC'(t)$ pela demanda para a execução da primeira etapa.

Do conjunto $SC'(t)$, serão priorizados os setores censitários “ilhas”, isto é, setores que não possuem adjacentes naquele dia. Caso existam, estes serão definidos como zonas de coleta, sendo tal identificação útil para etapas posteriores de melhoria. A Figura 4.3 ilustra a segregação em períodos e a geração de zonas de coleta.

Figura 4.3: (a) Exemplo de conjunto de setores censitários; (b) Exemplo de conjunto de setores censitários a serem coletados em um período específico, $SC(4^a \text{ feira})$; (c) Exemplo de zonas de coleta em $Z(4^a \text{ feira})$, com destaque para a caracterização de uma ilha.

O procedimento de geração de zonas de coleta perdura até que todos os setores censitários tenham sido alocados, selecionando aqueles de maior demanda ainda disponíveis, ao redor dos quais se expande a agregação de forma aleatória e gulosa, até se atingir a capacidade do veículo. Desta maneira, a construção das soluções viáveis busca concentrar a carga próximo da capacidade, a fim de reduzir o tamanho da frota com posteriores buscas locais. O pseudo-código é apresentado na Figura 4.4.

A segunda parte do algoritmo construtivo envolve a alocação de zonas de coleta $Z(t)$ a veículos $V(t)$. De modo análogo, ordena-se decrescentemente as zonas de coleta $Z'(t)$, porém, o critério de classificação é outro. Viagens adicionais (ou complementares), isto é, que possuem origem na estação de transbordo, apresentam roteiros diferentes àqueles caso partissem da base (garagem), sendo assim, utiliza-se uma métrica de economia que compara o tempo de deslocamento entre zona de coleta e base (t_{zc}^{base}), e entre zona de coleta e ponto de transbordo ($t_{zc}^{transbordo}$), dando preferência às zonas de coleta mais próximas à base para serem candidatas à viagens primárias (que possuem origem na base), funcionando como uma escala, conforme apresentado na Figura 4.5. Seja $\delta_{zc} = t_{zc}^{base} / t_{zc}^{transbordo}$ a métrica adotada, sendo respectivamente os tempos de viagem entre zona de coleta e base e zona de coleta

e estação de transbordo; busca-se, portanto, zonas candidatas zc em que δ_{zc} é mínimo, pois zonas de coleta com δ_{zc} menores tendem a ser viagens primárias, ao passo que com δ_{zc} maiores tendem a ser viagens complementares. Equivalente a este indicador, é possível também computar a diferença relativa entre estes tempos como $\Delta t_{zc} = t_{zc}^{base} - t_{zc}^{transbordo}$.

Heurística Construtiva (período t)	
	PARTE 1: Geração de zonas de coleta
1	Identificar os setores censitários que devem ser atendidos no período t , definindo o conjunto $SC(t)$
2	Classificar os elementos de $SC(t)$ decrescentemente pela demanda do período t de cada setor, definindo o conjunto $SC'(t)$
3	Checar a existência de setores “ilhas”; caso existam, são geradas zonas de coleta de um único elemento e armazenadas no conjunto $Z(t)$ e os setores alocados tornam-se indisponíveis
4	Para todo setor disponível i em $SC'(t)$
5	Criar nova zona de coleta zc para o setor i , tornando-o indisponível
6	Repetir até finalizar zona de coleta zc
7	Definir conjunto $F(zc)$ de setores pertencentes à zc e localizados na fronteira de zc
8	Definir conjunto $A(zc)$ de setores pertencentes a $SC(t)$ e adjacentes à zc
9	Definir conjunto $A'(zc)$ de setores pertencentes a $A(zc)$ e disponíveis para alocação
10	Se $ A'(zc) > 0$:
11	Repetir até agrupamento ser aceito ou até varrer toda a adjacência
12	Escolher aleatoriamente setor adjacente disponível
13	Caso a capacidade do veículo não seja excedida:
14	Aceitar a inclusão, indisponibilizar e adicionar adjacência à zona de coleta zc
15	Caso exceder, marcar para não ser escolhido nesta rodada
16	Próxima adjacência
17	Caso nenhum setor tenha sido adicionado à zc , finalizar zc ; senão, repetir passo 6
18	Atualizar $Z(t)$, adicionando a zona de coleta zc
19	Próximo setor disponível i em $SC'(t)$

Figura 4.4: Algoritmo Construtivo, geração de zonas de coleta.

Figura 4.5: Métrica de economia para a definição de zonas de coleta como viagens primárias.

Cada zona de coleta primária selecionada gera um novo veículo ao qual são adicionadas, conforme disponibilidade, zonas de coleta como viagem complementar em que δ_{zc} é máximo – zonas com menor preferência para serem viagens primárias –, respeitando as restrições de jornada de trabalho e de quantidade máxima diária de viagens. O procedimento é repetido até que todas as zonas de coleta tenham sido alocadas a um veículo, conforme pseudo-código apresentado na Figura 4.6.

As viagens contidas no roteiro de um veículo são necessariamente compostas por uma única viagem primária acrescida de viagens complementares quando cabíveis, justificando a importância de se identificar as zonas de coleta que seriam preferenciais em serem classificadas como primárias, de modo a se alocar roteiros mais econômicos aos veículos.

Heurística Construtiva (período t)	
	PARTE 2: Alocação em veículos
20	Para toda zona de coleta zc em $Z(t)$
21	Escolher o setor censitário mais próximo da estação de transbordo para ser o nó semente de zc
22	Calcular o indicador de economia δ_{zc}
23	Próxima zona de coleta zc
24	Classificar $Z(t)$ crescentemente pelo indicador δ_{zc} , definindo $Z'(t)$
25	Classificar $Z(t)$ decrescentemente pelo indicador δ_{zc} , definindo $Z''(t)$
26	Para cada zona de coleta $zc1$ disponível em $Z'(t)$
27	Escolher a zona de coleta $zc1$ como viagem primária; torná-la indisponível e atribuí-la a um novo veículo k
28	Para cada zona de coleta $zc2$ disponível em $Z''(t)$
29	Caso não exceda jornada de trabalho e a quantidade máxima diária de viagens:
30	Aceitar, indisponibilizar e adicionar zona de coleta $zc2$ ao veículo k como viagem complementar
31	Próxima zona de coleta disponível $zc2$
32	Atualizar $V(t)$ adicionando o veículo k
33	Próxima zona de coleta disponível $zc1$

Figura 4.6: Algoritmo Construtivo, alocação de veículos.

4.3 Heurística de busca local

A heurística de busca local é aplicada sobre uma solução viável, a fim de buscar soluções vizinhas que tenham um melhor valor da função objetivo, sendo este processo segregado em dois níveis hierárquicos, conforme classificação apresentada na seção 4.1, aplicando-se em ambos o método de busca tabu. No nível inferior, analisa-se para cada período toda a vizinhança da solução parcial corrente por diversas iterações (*iterinf_max*), até ser obtida a melhor das combinações, em que são verificados os seguintes movimentos: (1) troca de setores censitários entre zonas de coleta e (2) trocas de zonas de coleta (e respectivos setores censitários) entre veículos. No nível superior, após a solução heurística obtida da estratégia *multi-starting*, o procedimento de busca local é acionado, sendo analisada, contudo, somente uma parcela da vizinhança da solução, limitada por um *threshold*, em que é verificado como único movimento a troca de programa de coleta entre setor censitário até se atingir o critério de parada (quantidade de iterações *itersup_max* ou tempo de processamento *tp_max*).

Uma solução S é definida pela composição das diversas soluções parciais $S(t)$ de cada dia de coleta, de modo que há a distinção de níveis hierárquicos, pois alterações na programação de coleta afetam a estrutura da solução em diversos dias de coleta, uma vez que a demanda varia em função da programação, afetando diretamente a solução parcial de cada dia da semana e consequentemente inviabilizando a aplicação do algoritmo de melhoria em um único nível. São detalhados a seguir os algoritmos desenvolvidos para ambos nível de melhoria.

4.3.1 Nível inferior

O método de busca tabu consiste em um procedimento de busca extensiva com memória que permite alterações na estrutura da solução a fim de encontrar configurações que culminem em melhoria (diminuição) no valor da função objetivo, proibindo alterações cíclicas ou inversas por uma quantidade limitada de rodadas θ (*tenure*, ou valor de mandato, como tradução livre).

Movimentos da busca tabu

Em nível inferior, isto é, analisando a solução parcial de cada período t e definindo os respectivos conjuntos de setores censitários $SC(t)$, zonas de coleta $Z(t)$ e veículos $V(t)$, adota-se como reestruturação da solução variações como **(tipo 1)** realocação de setor censitário i pertencente à $zc1$ à outra zona de coleta $zc2$ e **(tipo 2)** realocação de zona de coleta zc pertencente ao veículo $k1$ a outro veículo $k2$. Tais realocações são denominadas “movimentos” e compõem o conjunto da vizinhança da solução parcial do período t , $ZN=ZN(SC(t))$ para o tipo 1 e $VN=VN(SC(t))$ para o tipo 2.

Definição da lista tabu

A busca tabu recebe este nome pois se refere a um procedimento com memória que classifica certos movimentos como proibidos ou tabu. Tais proibições evitam que movimentos sejam desfeitos ou repetidos, isto é, evitam buscas cíclicas, indesejáveis para a heurística de melhoria. Sendo assim, os movimentos que se deseja evitar são

marcados em uma chamada lista tabu, cuja dimensão depende do tipo de movimento analisado.

Associado à lista tabu, existe o parâmetro de *tenure* θ (ou valor de mandato), o qual é um contador de rodadas em que o movimento marcado é tido como proibido, de modo que a lista comporta somente valores inteiros não-negativos entre 0 e θ . A magnitude deste valor deve ser proporcional à quantidade de iterações da busca *iterinf_max* e da dimensão da vizinhança explorada, contudo, a calibração dos dois primeiros parâmetros não é trivial e depende de cada problema analisado, além disso, o tamanho da vizinhança é variável.

Desta forma, cada movimento definido como tabu é marcado com o valor θZ ou θV conforme o tipo e, a cada iteração da busca em que a melhor solução vizinha é encontrada, a lista de movimentos é decrementada em uma unidade. Sendo de interesse que a solução recém encontrada seja revertida, então, o movimento que a gerou é também marcado na lista tabu.

São definidas duas listas tabu distintas, sendo uma para cada tipo de movimento (tipo 1 e tipo 2). Para o tipo 1, é definida para cada setor censitário i pertencente a $SC(t)$ uma matriz quadrada $tabuZ_i()$ de dimensão nZ_{max} , quantidade máxima de zonas de coleta esperada, em que o valor $tabuZ_i(zc1, zc2)$ é a quantidade de rodadas restantes para que o movimento do setor censitário i da zona de coleta $zc1$ para a zona de coleta $zc2$ possa ser considerado na iteração da busca local analisada. Analogamente, para o tipo 2, é definida para cada zona de coleta zc pertencente a $Z(t)$ uma matriz quadrada $tabuV_{zc}()$ de dimensão nV_{max} , quantidade máxima de veículos esperada, em que o valor $tabuV_{zc}(k1, k2)$ é a quantidade de rodadas restantes para que o movimento da zona de coleta zc do veículo $k1$ para o veículo $k2$ possa ser considerado na iteração da busca local analisada.

Iterações da busca tabu

O nível inferior da busca local é repetido por *iterinf_max* iterações ou até se atingir um tempo de processamento *tp_max*, obtendo-se a melhor solução parcial $S(t)$ para cada período t (ver Figura 4.7).

Figura 4.7: Esquema de busca tabu em heurística de melhoria por busca local.

A cada iteração, é analisada toda a extensão da vizinhança ZN e VN (ordenados aleatoriamente para não enviesar a busca, ver Figura 4.9) que não esteja na lista tabu e que respeite as restrições do problema, atualizando a solução parcial corrente com a melhor solução vizinha do conjunto e atualizando a lista tabu com o movimento respectivo (ver Figura 4.8).

Heurística de Busca no Nível Inferior (período t)	
1	É conhecida a solução parcial corrente $S(t)$ //Inicialização de lista tabu
2	Para todo setor censitário i pertencente a $SC(t)$
3	Inicializar lista tabu de movimentos (tipo 1) entre zonas $tabuZ_i(nZmax, nZmax)$
4	Próximo setor censitário i
5	Para toda zona de coleta zc pertencente a $Z(t)$
6	Inicializar lista tabu de movimentos (tipo 2) entre veículos $tabuV_zc(nVmax, nVmax)$
7	Próxima zona de coleta zc //Inicialização de movimentos
8	$ZN, VN \leftarrow \mathbf{Vizinhança Inferior}(t)$ //Heurística de Busca Local
9	Iterar até atingir critério de parada //iterinf_max ou tp_max, o que acontecer primeiro
10	Reordenar ZN aleatoriamente //ETAPA 1: Troca de setores censitários entre zonas de coleta, tipo 1 //Processamento em multi-threading de dimensão $ ZN $
11	Para cada thread mov (S' é a solução $S(t)$ alterada pelo movimento mov)
12	Extrair de cada movimento: setor censitário i , zona de coleta de origem $zc1$ e zona de coleta de destino $zc2$
13	Checar se movimento não está em $tabuZ$, senão, passo 20

14	Checar se movimento é viável em Viabilidade Movimento (mov) , senão passo 20
15	Calcular o valor parcial da função objetivo com a execução do movimento corrente, $f'(S')$
16	Caso $f'(S') < f'(S(t))$:
17	Atualizar a solução parcial corrente, $S(t) \leftarrow$ Atualiza Solução (mov)
18	Atribuir valor de mandato θZ à lista tabu correspondente, $tabuZ_i(zc1, zc2)$ e $tabuZ_i(zc2, zc1)$
19	Decrementar em uma unidade todas as listas $tabuZ$, mantendo o valor mínimo nulo
20	Próximo thread mov
21	Reordenar VN aleatoriamente
	<i>//ETAPA 2: Troca de zonas de coleta entre veículos, tipo 2</i>
	<i>//Processamento em multi-threading de dimensão VN</i>
22	Para cada thread mov (S' é a solução $S(t)$ alterada pelo movimento mov)
23	Extrair de cada movimento: zona de coleta zc , veículo de origem $k1$ e veículo de destino $k2$
24	Checar se movimento não está em $tabuV$, senão, passo 31
25	Checar se movimento é viável em Viabilidade Movimento (mov) , senão passo 31
26	Calcular o valor parcial da função objetivo com a execução do movimento corrente, $f'(S')$
27	Caso $f'(S') < f'(S(t))$:
28	Atualizar a solução parcial corrente, $S(t) \leftarrow$ Atualiza Solução (mov)
29	Atribuir valor de mandato θV à lista tabu correspondente, $tabuV_{zc}(k1, k2)$ e $tabuV_{zc}(k2, k1)$
30	Decrementar em uma unidade todas as listas $tabuV$, mantendo o valor mínimo nulo
31	Próximo thread
32	Checar critério de parada, senão passo 9
33	Obtém solução ótima local $S^*(t) \leftarrow S(t)$

Figura 4.8: Algoritmo de melhoria por busca local, nível inferior.

Vizinhança Inferior (período t)	
	<i>//TIPO 1: Movimentos entre zonas de coleta</i>
1	Inicializar ZN de dimensão $ SC(t) Z(t) Z(t) - SC(t) Z(t) $
2	Para cada movimento mov em ZN
3	Para todo setor censitário i pertencente a $SC(t)$
4	Para toda zona de coleta $zc1$ pertencente a $Z(t)$
5	Para toda zona de coleta $zc2$ pertencente a $Z(t)$
6	Se $zc1 \neq zc2$:
7	$ZN(mov) = \text{setor censitário } i \text{ de zona de coleta } zc1 \text{ para } zc2$
8	Próxima zona de coleta $zc2$
9	Próxima zona de coleta $zc1$
10	Próximo setor censitário i
11	Próximo movimento mov
	<i>//TIPO 2: Movimentos entre veículos</i>
12	Inicializar VN de dimensão $ Z(t) V(t) V(t) - Z(t) V(t) $
13	Para cada movimento mov em VN
14	Para toda zona de coleta zc pertencente a $Z(t)$
15	Para todo veículo $k1$ pertencente a $V(t)$
16	Para todo veículo $k2$ pertencente a $V(t)$
17	Se $k1 \neq k2$:
18	$VN(mov) = \text{zona de coleta } zc \text{ de veículo } k1 \text{ para } k2$
19	Próximo veículo $k2$
	Próximo veículo $k1$
20	Próxima zona de coleta zc
	Próximo movimento mov

Figura 4.9: Algoritmo de construção de vizinhança em nível inferior.

Para comporem o conjunto da vizinhança (ZN ou VN) a ser explorado o valor da função objetivo, só devem ser considerados, portanto, aqueles que satisfizerem as restrições do PCDU por meio das seguintes condições (ver Figura 4.10):

- tipo 1: (i) o setor censitário i deve pertencer a $F(zc1)$, isto é, ser setor de fronteira e (ii) deve ser adjacente à zona de coleta $zc2$, (iii) sendo que o movimento deve manter ambas zonas de coleta $zc1$ e $zc2$ contínuas e dentro das capacidades do veículo (carga e jornada de trabalho);
- tipo 2: (i) o movimento deve manter o veículo $k2$ dentro de suas capacidades (jornada de trabalho e quantidade máxima de viagens);

As condições dos movimentos do tipo 1 são verificadas por um algoritmo baseado no caminho crítico de Dijkstra (continuidade de zona) e por uma relaxação de restrição. A continuidade de uma zona de coleta é verificada analisando-se a conectividade entre os setores censitários que esta contém e o respectivo nó-semente, buscando,

de modo similar ao apresentado no modelo matemático, encontrar um fluxo existente ou caminho crítico, por toda a extensão do conjunto. As capacidades do veículo, de carga e de jornada de trabalho, são verificadas ao se analisar a variação de carga e de tempo de coleta com a inclusão ou troca de setores censitários entre zonas de coleta, sendo desconsiderados, por relaxação, eventual alteração no tempo de viagem, ainda que, a rigor, outro nó-semente possa ter sido selecionado.

As condições dos movimentos do tipo 2 são mais simples de se verificar, sendo pouco sofisticada a checagem da capacidade de jornada de trabalho e trivial a checagem da quantidade máxima de viagens. O tempo de viagem de um veículo depende da determinação de qual zona de coleta pertencente deverá ser classificada como viagem primária, bastando elencar aquela cujo indicador de economia δ_{zc} for menor, ou seja, a restrição de jornada de trabalho pode ser verificada bastando recalculando o tempo de viagem resultante dos veículos envolvidos no movimento.

boolean Viabilidade Movimento (movimento mov)	
	<i>//TIPO 1: Movimentos entre zonas de coleta</i>
1	Se <i>mov</i> é do tipo 1:
2	Extrair setor censitário <i>i</i> , zonas de coleta <i>zc1</i> e <i>zc2</i>
3	Checar se setor censitário <i>i</i> pertence à zona de coleta <i>zc1</i> ; caso contrário, retorna INVIÁVEL
4	Checar se a zona de coleta <i>zc2</i> não é vazia; caso contrário, retorna INVIÁVEL
5	Checar se setor censitário <i>i</i> pertence a $F(zc1)$ como setor de fronteira; caso contrário, retorna INVIÁVEL
6	Checar se setor censitário <i>i</i> é adjacente à zona de coleta <i>zc2</i> ; caso contrário, retorna INVIÁVEL
	Checar se a inclusão do setor censitário <i>i</i> não excede as restrições de capacidade do veículo (carga e jornada de trabalho); caso contrário, retorna INVIÁVEL
7	Checar se a remoção do setor censitário <i>i</i> mantém a continuidade de <i>zc1</i> ; caso contrário, retorna INVIÁVEL
8	Passando por esta triagem, retorna VIÁVEL
	<i>//TIPO 2: Movimentos entre veículos</i>
9	Se <i>mov</i> é do tipo 2:
10	Extrair zona de coleta <i>zc</i> , veículos <i>k1</i> e <i>k2</i>
11	Checar se zona de coleta <i>zc</i> pertence ao veículo <i>k1</i> ; caso contrário, retorna INVIÁVEL
12	Checar se o veículo <i>k2</i> não é vazio; caso contrário, retorna INVIÁVEL

13	Checar se a inclusão da zona de coleta zc não excede as restrições de capacidade do veículo (jornada de trabalho e quantidade de viagens); caso contrário, retorna INVIÁVEL
14	Passando por esta triagem, retorna VIÁVEL

Figura 4.10: Algoritmo de checagem de viabilidade de movimento em nível inferior.

As soluções parciais de cada período t são atualizadas conforme Figura 4.11, sendo que para movimentos do tipo 1 devem ser reajustados diretamente as zonas de coleta, sendo necessário reestruturar as propriedades, tais como nó-semente, tempos e distâncias, setores de fronteira, ao passo que para movimentos do tipo 2, devem ser reajustadas as propriedades dos veículos, sendo necessário redefinir a viagem primária. Obviamente, para ambos os casos, também devem ser reestabelecidas as correlações de índices entre setor censitário, zona de coleta e veículo.

Atualiza Solução (movimento mov)	
	<i>//TIPO 1: Movimentos entre zonas de coleta</i>
1	Se mov é do tipo 1:
2	Extrair setor censitário i , zonas de coleta $zc1$ e $zc2$, veículos $k1$ e $k2$
3	Adiciona setor censitário i à zona de coleta $zc2$
4	Atualiza propriedades da zona de coleta $zc2$
5	Remove setor censitário i da zona de coleta $zc1$
6	Atualiza propriedades da zona de coleta $zc1$
7	Atualiza propriedades do veículo $k1$
8	Se $k1 \neq k2$, Atualiza propriedades do veículo $k2$
9	Atualiza propriedades do setor censitário i
	<i>//TIPO 2: Movimentos entre veículos</i>
	Se mov é do tipo 2:
	Extrair zona de coleta zc , veículos $k1$ e $k2$
	Adiciona zona de coleta zc ao veículo $k2$
	Atualiza propriedades do veículo $k2$
	Remove zona de coleta zc do veículo $k1$
	Atualiza propriedades do veículo $k1$
	Atualiza propriedades da zona de coleta zc

Figura 4.11: Algoritmo de atualização de solução em função da execução de movimento em nível inferior.

Adicionalmente, pode-se adotar regras tais quais nunca alocar setores censitários a zonas de coleta vazias e nunca alocar zonas de coleta a veículos vazios, de modo a conduzir a soluções mais enxutas, auxiliando a minimização do valor da função objetivo. Outros movimentos podem ser elucubrados a fim de se explorar uma maior

variabilidade, bastando definir um conjunto de vizinhança adequado; sendo assim, é obtida a vizinhança da solução parcial $S(t)$ a ser buscada melhoria.

A dificuldade computacional do método reside na complexidade de se construir a vizinhança $ZN=ZN(SC(t))$ a cada iteração, uma vez que a condição de continuidade de zona de coleta demanda maior tempo de processamento. Além disso, a cada vizinhança analisada podem ser redefinidos os nós-sementes das zonas de coleta envolvidas ou redefinidas as viagens primárias dos veículos envolvidos. Quando o conjunto da vizinhança ZN for muito extenso, adota-se método similar de limitar por um *threshold* a profundidade de busca, tal como aplicado no algoritmo de busca local do nível superior apresentado na seção 4.3.2.

Distinção do método aplicado

Em problemas usuais de roteirização, os movimentos analisados são realocações de nós a outras rotas ou reordenação interna de uma rota (ver Figura 4.12(a2) e Figura 4.12(a3)). Todavia, para o presente problema tais movimentos tiveram que ser reinterpretados, pois o atendimento de uma zona de coleta é realizada somente sobre o nó-semente, que contém as informações agregadas dos setores censitários, não havendo a roteirização interna – reservada para eventual planejamento operacional – , de modo que, para analisar a vizinhança de uma solução, são adotados como movimentos possíveis, a realocação (1) de setores censitários a zonas de coleta e (2) de zonas de coleta a veículos (ver Figura 4.12(b2) e Figura 4.12(b3), respectivamente).

Figura 4.12: Exemplificação de movimentos (a) roteirização nó a nó; (b) roteirização com nó-semente.

Ressalta-se que as restrições do problema devem prevalecer, isto é, movimentos do **tipo 1** (Figura 4.12(b2), nó-semente da zona de coleta deve ser redefinido após realocação a outra zona) requerem adjacência de zonas de coleta e manutenção de continuidade após alteração, além de ser respeitada a capacidade do veículo, e movimentos do **tipo 2** (Figura 4.12(b3), viagem primária de um veículo se torna viagem complementar em outro), apesar de não requerem adjacência de zonas, devem ser respeitadas as demais restrições de jornada de trabalho e quantidade máxima diária de viagens.

4.3.2 Nível superior

De maneira análoga ao que foi apresentado no nível inferior, a busca local em nível superior analisa a vizinhança $\bar{N}$, composta por movimentos que envolvem a troca da programação de coleta p_i dos setores censitários (**tipo 0**). Neste nível hierárquico, a combinatoriedade da variação da vizinhança a ser explorada é da ordem de $O(|P|^n)$,

isto é, a cada setor censitário i podem ser atribuídos até $|P_i|$ programas de coleta. Ademais, alterações na estrutura da programação de coleta afetam diretamente as soluções parciais dos diferentes dias da semana, de modo que o problema em nível inferior se encontra encapsulado ao processo de melhoria do nível superior.

Heurísticas de busca que envolvem movimentação entre dias de coleta são mais complexas, pois a solução geral é afetada, não podendo mais ser tratada como soluções parciais independentes para cada período. Por este motivo, garantir a convergência global é mais complicado e custoso computacionalmente. Alonso *et al.* (2008) e Azi *et al.* (2010) discutem movimentos em níveis múltiplos. Porém, o problema analisado apresenta duas particularidades tais quais a demanda diária variável em função da programação de coleta e a necessidade de compactação das zonas de coleta de forma contínua, tornando quaisquer dos métodos apresentados incompatíveis.

Como alternativa de mitigar a busca extensiva de toda a vizinhança da solução a ser explorada, propõe-se analisar um extrato amostral $\bar{N}$ limitado por um *threshold* ω a fim de estudar eventual melhoria na solução heurística. O *threshold* de magnitude ω , quando de tamanho adequado, permite a aplicação de busca tabu ao se explorar uma vizinhança menor.

Figura 4.13: Obtenção da solução heurística com busca local de melhoria em nível superior.

Movimentos da busca tabu

O conjunto $\bar{N}$ da vizinhança a ser explorada é composto por movimentos escolhidos de forma probabilística uniforme, escolhendo primeiramente um setor censitário i

pertencente a N' em seguida de um programa de coleta p_i diferente do atual dentre a disponibilidade P_i .

O conjunto N' é exatamente igual ao conjunto N de todos os setores censitários do problema quando a heurística de melhoria em nível superior é tratada de forma mais simples. Quando tratada de forma mais direcionada, o conjunto N' se torna um subconjunto de N , estreitando a busca por melhoria, filtrando os setores censitários os quais se julga com maior potencial de melhoria ao se alterar a programação de coleta.

Por exemplo, setores censitários rotulados como classe A da curva ABC de produção semanal não precisam ser incluídos na busca por melhoria no nível superior, uma vez que sua frequência de coleta é diária, fixada em 6 vezes por semana. Alterações na programação de setores da classe C provavelmente trariam mais ganhos marginais pela heurística do que em setores da classe B, dado que há maior quantidade de combinações possíveis de programas de coleta disponíveis.

Deste modo, restringe-se o tamanho do conjunto de setores censitários N' de referência para a construção do conjunto $\bar{N}$ da vizinhança a ser explorada, estreitando-se a busca por melhoria no nível superior.

Definição da lista tabu

Análogo ao nível inferior, adota-se um valor de mandato θP , o qual é associado à lista tabu $tabuP$ definida para cada setor censitário i pertencente a N' como uma matriz quadrada $tabuP_i()$ de dimensão $|P|$, quantidade total de programas de coleta. Ou seja, o valor de mandato θP é alocado à lista $tabuP_i(p1, p2)$ e $tabuP_i(p2, p1)$ quando o movimento de trocar o programa de coleta de um setor censitário i de $p1$ para $p2$ é aceito.

Iterações da busca tabu

A busca tabu em nível superior é aplicada sobre uma solução viável, mais especificamente, por exemplo, após a obtenção da solução heurística proveniente da estratégia *multi-starting*. O procedimento de melhoria, conforme Figura 4.14, é

aplicado por $itersup_max$ iterações ou até que se atinja um tempo de processamento tp_max , de modo que a cada iteração é realizada a busca extensiva pela vizinhança definida em $\bar{N}$. A solução final S^* obtida é assumida como a melhor encontrada pela heurística.

Heurística de Busca Local em Nível Superior()	
1	A última solução obtida é considerada a melhor, S^* <i>//Definição do conjunto N'</i>
2	$N' = \{ i: \text{setor censitário } i \text{ pertence à classe C da curva ABC do Diagrama de Pareto} \}$ <i>//Inicialização de lista tabu</i>
3	Para todo setor censitário i pertencente a N'
4	Inicializar lista tabu de movimentos entre programas de coleta $tabuP_i(P , P)$
5	Próximo setor censitário i <i>//Inicialização de movimentos</i>
6	$\bar{N} \leftarrow \mathbf{Vizinhança Superior()}$ <i>//Heurística de Busca Local</i>
7	Iterar até atingir critério de parada <i>//itersup_max ou tp_max, o que acontecer primeiro</i> <i>//Troca de programas de coleta entre setores censitários</i>
8	Inicializar contador
9	Reordenar aleatoriamente $\bar{N}$
10	Para cada mov (S é a solução S^* alterada pelo movimento mov)
11	Extrair de cada movimento: setor censitário i , programa de coleta $p1$ e programa de coleta $p2$
12	Checar se movimento não está em $tabuP$, senão, passo 22
13	Checar se movimento é viável em Viabilidade Movimento (mov) , senão passo 22
14	contador++
15	Atualizar a solução corrente, $S \leftarrow \mathbf{Atualiza Solução (mov)}$
16	Caso $f(S) < f(S^*)$:
17	Atualizar a melhor solução, $S^* \leftarrow S$
18	Atribuir valor de mandato θP à lista tabu correspondente, $tabuP_i(p1,p2)$ e $tabuP_i(p2,p1)$
19	Decrementar em uma unidade todas as listas $tabuP$, mantendo o valor mínimo nulo
20	Senão, restaurar alterações, $S \leftarrow S^*$
21	Caso contador seja igual a ω , pular para passo 23
22	Próximo movimento mov
23	Checar critério de parada, senão passo 7
24	Obtém a melhor solução heurística S^*

Figura 4.14: Algoritmo de melhoria por busca local, nível superior.

O conjunto $\bar{N}$ é obtido conforme pseudo-código apresentado na Figura 4.15, cujos elementos (movimentos) são dispostos em ordem aleatória para não enviesar a busca, sendo o *threshold* ω controlado por um contador sempre que o movimento analisado for viável, conforme Figura 4.16. Evita-se a geração de zonas de coleta do tipo “ilha”, rechaçando movimentos que aloquem setores censitários a períodos em que não haveria outros setores adjacentes.

Vizinhança Superior ()	
	//TIPO 0: Movimentos entre setores censitários
1	Inicializar $\bar{N}$ de dimensão $ N' \cdot P \cdot P - N' \cdot P $
2	Para cada movimento <i>mov</i> em $\bar{N}$
3	Para todo setor censitário <i>i</i> pertencente a N'
4	Para toda programa de coleta <i>p1</i> pertencente a P
5	Para toda programa de coleta <i>p2</i> pertencente a P
6	Se $p1 \neq p2$:
7	$\bar{N}(\text{mov}) = \text{setor censitário } i \text{ de programa de coleta } p1 \text{ para } p2$
8	Próximo programa de coleta <i>p2</i>
9	Próximo programa de coleta <i>p1</i>
10	Próximo setor censitário <i>i</i>
11	Próximo movimento <i>mov</i>

Figura 4.15: Algoritmo de construção de vizinhança em nível inferior.

boolean Viabilidade Movimento (movimento mov)	
	//TIPO 0: Movimentos entre setores censitários
1	Se <i>mov</i> é do tipo 0:
2	Extrair setor censitário <i>i</i> , programas de coleta <i>p1</i> e <i>p2</i>
3	Checar se programa de coleta <i>p1</i> está alocado ao setor censitário <i>i</i> ; caso contrário, retorna INVIÁVEL
4	Checar se programa de coleta <i>p2</i> pertence a $P(i)$; caso contrário, retorna INVIÁVEL
5	Checar se para cada período <i>t</i> em <i>p2</i> em que há coleta, o setor censitário <i>i</i> possui setor adjacente pertencente a $SC(t)$; caso contrário, retorna INVIÁVEL
6	Passando por esta triagem, retorna VIÁVEL

Figura 4.16: Algoritmo de checagem de viabilidade de movimento em nível superior.

A atualização da solução para o nível superior é mais custosa computacionalmente em relação ao nível inferior, pois a heurística de busca em nível inferior se encontra encapsulada e deve ser acionada para os períodos em que a solução corrente é afetada pelo movimento analisado (ver Figura 4.17 e Figura 4.18).

Atualiza Solução (movimento mov)	
	<i>//TIPO 0: Movimentos entre setores censitários</i>
1	Se <i>mov</i> é do tipo 0:
2	Obter o conjunto T' de períodos t que foram afetados pelo movimento <i>mov</i> $T' \leftarrow$ Atualiza Períodos (mov)
3	Para cada período t em T' <i>//processamento paralelo</i>
4	Se t está contido em $p2$ e não contido em $p1$, então:
5	Adicionar setor censitário i ao conjunto $SC(t)$
6	Alocar setor censitário i a alguma zona de coleta vazia em $Z(t)$
7	Se t está contido em $p1$ e não contido em $p2$, então
8	Remover setor censitário i de sua zona de coleta correspondente
9	Remover setor censitário i do conjunto $SC(t)$
10	Atualizar a demanda do setor censitário i para o período t
11	Atualizar $S(t) \leftarrow$ Heurística de Busca Local em Nível Inferior(t)
12	Próximo período t

Figura 4.17: Algoritmo de atualização de solução em função da execução de movimento em nível superior.

período t [] Atualiza Períodos (movimento mov)	
	<i>//TIPO 0: Movimentos entre setores censitários</i>
1	Se <i>mov</i> é do tipo 0:
2	Extrair de <i>mov</i> os programas de coleta $p1$ e $p2$
3	Para todo período t
4	Se há atendimento em $p1$ ou $p2$, incluir t em T'
5	Próximo período t

Figura 4.18: Algoritmo de obtenção de períodos que devem ser atualizados pela execução de movimento em nível superior.

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo, são conduzidos testes computacionais para a resolução do *Problema de Coleta Domiciliar Urbana de Resíduos Sólidos* (PCDU) conforme proposto pelo modelo matemático e pelo modelo heurístico, sendo apresentados e discutidos na sequência os resultados obtidos.

O modelo matemático, por tratar de forma combinatória a árvore de busca, foi testada com instâncias do problema em escala reduzida, sendo utilizado o *software* comercial GAMS como interface do CPLEX para as diversas rodadas analisadas.

O modelo heurístico foi desenvolvido em linguagem Java com processamento paralelo, a fim de aplicar os algoritmos *multi-threading* apresentados para ganho em tempo computacional. A título de comparação com os resultados obtidos do modelo matemático, foram testadas instâncias de escala reduzida, sendo posteriormente escolhida uma instância para aprofundamento de análise. Na sequência, estendeu-se a análise para um problema de escala real.

Os itens subsequentes discutem e apresentam as instâncias analisadas para o problema estudado em escala reduzida e em escala real.

5.1 Problema em escala reduzida

A fim de se realizar testes computacionais sobre o modelo matemático, deve-se analisar um problema em escala reduzida, assegurando as características inerentes a um problema real. Limitou-se o atendimento a 6 dias de coleta com 22 programas de coleta possíveis, adotando uma curva sazonal semanal média, conforme apresentado na Tabela 3.1.

O modelo matemático a ser testado, portanto, se resume a tratar da minimização de custo C' abaixo, sem as horas-extras com turno limitado a 8 horas, porém com o balanceamento de frota ao longo da semana, conforme a seção 3.2.5. Os custos relacionados aos veículos foram considerados iguais para uma frota homogênea, sendo FI da ordem de 20.000\$ e FF da ordem de 3.000\$, e o custo de combustível foi ponderado pelos fatores de preço e consumo de combustível, conforme o

parâmetro de distância CV_{jkr}^t percorrida para atender o nó-semente e a variável de tempo de coleta do nó-semente respectivo.

$$\min C' = \sum_{k \in M} \left(FI_k w w_k + FF_k \left(|T| * w w_k - \sum_{\substack{t \in T; \\ r=1}} w_{kr}^t \right) \right) + PP \sum_{t \in T} \sum_{k \in M} \sum_{r \in R} \sum_{j \in N} CD CV_{jkr}^t z_{jkr}^t + CH T c_{jkr}^t$$

5.1.1 Instâncias analisadas

Foram selecionados 20 setores censitários para se analisar ambos modelos matemático e heurístico em escala reduzida, cuja disposição e relação de adjacência são mostrados na Figura 5.1, juntamente com a localização de garagem e de estação de transbordo, e cuja produção semanal soma cerca de 100.000 kg.

Figura 5.1: Localização dos nós e relações de adjacências.

Sobre estes setores, foram analisadas 9 instâncias distintas para comparação entre modelos, variando-se 3 parâmetros: capacidade do veículo (Q), quantidade máxima

de viagens no turno (NV_{max}) e um fator de afastamento (ϕ) entre zonas de coleta e garagem e estação de transbordo, conforme Tabela 5.1. Para fins estatísticos, cada instância foi executada 15 vezes.

Tabela 5.1: Variação de parâmetros para as instâncias analisadas: (1) capacidade do veículo, em kg; (2) quantidade máxima diária de viagens por veículo; (3) fator de afastamento entre zonas de coleta e garagem e estação de transbordo.

	Q	NV_{max}	ϕ
Instância A	3.500	3	1,0
Instância B	3.500	3	2,5
Instância C	3.500	3	5,0
Instância D	3.500	5	1,0
Instância E	3.500	5	2,5
Instância F	9.000	3	1,0
Instância G	9.000	3	5,0
Instância H	9.000	5	2,5
Instância I	9.000	5	5,0

Adotou-se dois níveis de capacidade, 3.500 kg e 9.000 kg, a fim de analisar diferentes níveis de operação; a quantidade máxima diária de viagens por veículo está relacionada com a capacidade física dos coletores, sendo uma maneira implícita de considerá-la como restrição; e o fator de afastamento entre zonas de coleta e garagem e estação de transbordo testa a sensibilidade da restrição de jornada de trabalho, limitando a utilização do veículo devido ao tempo gasto em deslocamentos.

Para o modelo heurístico foram também conduzidos testes computacionais para a análise de sensibilidade de parâmetros calibráveis para a geração de solução, como quantidade de *threads* da estratégia *multi-starting* (μ), tempo máximo de processamento (tp_{max}), quantidade máxima de iterações em nível superior ($itersup_{max}$) e inferior ($iterinf_{max}$), valor de mandato das listas tabu de movimentos do tipo 0 (ΘP), do tipo 1 (ΘZ) e do tipo 2 (ΘV), e limite de vizinhança explorada em nível superior (ω), cujas combinações são apresentadas conforme Tabela 5.2. Para estes testes adicionais, elegeu-se uma das instâncias citadas acima, mediante critério de seleção baseado como o maior desvio padrão em relação à média do valor da função objetivo de suas respectivas rodadas. A instância “Var0” é equivalente à configuração utilizada para rodar as instâncias apresentadas na tabela anterior, sendo colocada como *baseline* para a análise de sensibilidade.

Tabela 5.2: Variação de parâmetros para a análise de sensibilidade.

	μ	tp_max	$itersup_max$	ω	ΘP	$iterinf_max$	ΘZ	ΘV
Var0	3	60	10	10	15	20	7	5
Var1	30	60	10	10	15	20	7	5
Var2	10	120	10	10	15	50	15	10
Var3	10	120	30	10	25	20	7	5
Var4	10	120	10	30	15	20	7	5
Var5	10	120	30	30	25	20	7	5

Em Var1 é analisada uma maior diversificação a fim de se buscar inicialmente soluções heurísticas de melhor qualidade para a posterior busca local em nível superior. Var2 e Var3 propõem intensificação na busca local em nível inferior e em nível superior, respectivamente, sendo que em Var4 é analisada a ampliação da vizinhança onde é realizada a busca em nível superior. Var5 é uma proposta de configuração calibrada para buscar soluções com melhor qualidade.

5.1.2 Resultados

Os resultados dos testes computacionais das instâncias analisadas são sumarizadas na Tabela 5.3, sendo apresentados, para o modelo heurístico, o valor médio da função objetivo (dentre as 15 rodadas para fins estatísticos), desvio padrão da média, frota semanal necessária e o *gap* em relação ao limitante inferior; para as rodadas no GAMS não foram necessárias diversas rodadas, uma vez que o tempo de processamento foi muito superior.

Tabela 5.3: Resumo da resolução do problema para diversas instâncias rodadas no modelo computacional.

	modelo heurístico (Java)				modelo matemático (GAMS)		
	f(S*) [k\$] ²⁾	desvio [%]	frota	gap [%]	f(S*) [k\$]	frota	gap [%]
Instância A	82,32	1,8%	4	42%	61,38	3	22%
Instância B¹⁾	87,71	3,7%	4		-	-	-
Instância C	152,23	1,7%	7	51%	147,92	7	50%
Instância D	55,17	3,9%	2	49%	40,94	2	31%
Instância E	90,23	1,7%	4	68%	65,73	3	56%
Instância F	25,08	0,8%	1	14%	42,05	2	49%
Instância G	56,48	3,9%	2	57%	69,37	3	65%
Instância H¹⁾	26,10	2,2%	1		-	-	-
Instância I¹⁾	57,38	5,9%	2	42%	-	-	-

1) GAMS não atingiu solução inteira dentro do tempo de processamento, mesmo com o dobro do limite de tempo.

2) média das rodadas de cada instância.

As rodadas no GAMS foram limitadas a um tempo de processamento máximo de 3 horas, e nota-se a complexidade na resolução do problema pela magnitude do *gap* da solução inteira em relação ao limitante inferior gerado pelo GAMS (entre 22% e 65%) e também por as instâncias B, H e I não obterem nenhuma solução inteira dentro do horizonte de tempo analisado, ainda que este tempo limite fosse duplicado.

O tempo médio de processamento do modelo heurístico desenvolvido foi inferior a 10 minutos, ante as 3 horas de processamento do modelo matemático rodado no GAMS, obtendo soluções de *gap* optimal de mesma ordem. Em linhas gerais, pode-se notar que com um menor tempo de processamento, o modelo heurístico atinge bons resultados se comparado ao tempo de processamento que seria necessário para ser resolvido para o modelo matemático, obtendo *gap* entre 14% e 68%.

Para a análise de sensibilidade dos parâmetros de calibração do modelo heurístico, selecionou-se a instância I como base para as diversas variações, uma vez que o valor da função objetivo, dentre as diversas rodadas analisadas, apresentou maior desvio padrão em relação à média, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Resumo da resolução do problema para as diversas variações dos parâmetros de calibração do modelo computacional.

	Variação	f(S*) [k\$]	processamento [hh:mm:ss]
Var0	parâmetros originais de referência	57,38	00:07:59
Var1	diversificação	57,06	00:10:17
Var2	intensificação da busca em nível inferior	58,85	00:15:34
Var3	intensificação da busca em nível superior	57,32	00:18:35
Var4	ampliação da vizinhança em nível superior	54,93	00:20:28
Var5	composição final	53,96	01:03:50

É possível notar que aumentar o *threshold* ω é a mais efetiva das variações (Var4), e que combinado com diversificação (Var1), se obtém um ganho ainda maior (Var5), contudo, qualquer das variações mais efetivas aumentam exponencialmente o tempo de processamento. Em Var5, para se ter um ganho marginal de 6% no valor da função objetivo, aumenta-se o tempo de processamento em quase 8 vezes. É preciso garantir, portanto, um algoritmo construtivo eficiente para que se possa partir de uma solução inicial de melhor qualidade para então ser refinada pelos algoritmos de busca local.

Para fins de ilustração comparativa e entendimento das soluções geradas, os resultados da instância F de ambos modelos matemático e heurístico são apresentados a seguir. A Figura 5.2 apresenta a disposição dos nós associados às zonas de coleta para cada dia da semana, em que, para o caso da instância F, foi obtida frota de um único veículo para atendimento da demanda semanal segundo o modelo heurístico.

Figura 5.2: Solução do método heurístico da instância F, com frota de um único veículo.

A Figura 5.3 apresenta a solução de ambos modelos sob a perspectiva de cada setor censitário, desconsiderando a estrutura geométrica de zonas de coleta mostrada nos mapas anteriores.

Figura 5.3: Atendimento dos nós, por veículo e período, para a instância F, cujas soluções foram obtidas respectivamente pelo modelo matemático e modelo heurístico.

Nota-se, portanto, que a estruturação adequada do atendimento dos nós em zonas de coleta e em veículos para cada dia da semana tem grande impacto no custo operacional do serviço de coleta e transporte (de 2 veículos para 1 veículo), ainda que da perspectiva dos clientes (nós) possam não parecer tão distintos (similaridade² de cosseno em torno de 85%).

As soluções de cada modelo diferem entre si pelo nível de agregação em zonas de coleta, sendo que, para o período de uma semana, o modelo matemático gerou 15

² A similaridade é medida pelo cosseno do ângulo formado entre as matrizes binárias ($a_{jt} = 1$, se o nó j é atendido por algum veículo no período t) da solução obtida de cada modelo, $\cos(\theta) = A \cdot B / \|A\| \|B\|$.

zonas de coleta, tal como o modelo heurístico, sendo que o desvio padrão do atendimento dos setores censitários ao longo da semana é menor no modelo heurístico (20% ante 40%), conforme observado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Distribuição do atendimento de setores censitários por veículo e dia da semana.

		atendimento de setores censitários							
	veículo	S	T	Q	Q	S	S	total	dpad
modelo	1	11	9	4	7	9	6	46	33%
matemático	2	5	2	11	5	7	8	38	49%
	total	16	11	15	12	16	14	84	41%
modelo	1	10	12	15	13	17	13	80	18%
heurístico	total	10	12	15	13	17	13	80	18%

Maiores detalhes das soluções desta instância podem ser visualizados no Anexo B: Resultados do modelo matemático rodado no GAMS, Instância F e no Anexo C: Resultados do modelo heurístico em escala reduzida, Instância F.

5.2 Problema em escala real

Após realizar testes em instâncias pequenas com o problema em escala reduzida, parte-se para o estudo de problema em escala real, uma vez que a heurística se mostrou consistente e condizente com o resultado esperado, podendo analisar o impacto em instâncias mais significativas e que demandam maior esforço computacional.

5.2.1 Estudo de caso

Aplica-se o modelo computacional heurístico sobre um município de médio porte, da ordem de 2.300 setores censitários, cuja dimensão pode ser reduzida pela metade (ordem de 1.200 setores censitários), ao se considerar distinção entre turno diurno e noturno, podendo estes serem tratados independentemente, limitando a jornada de trabalho a 12 horas, ou meio-período (4 horas de *buffer* acima da jornada padrão de 8 horas). Dados históricos foram utilizados para calibrar os diversos parâmetros de entrada, restando apenas refinar as quantidades de iterações do modelo

computacional. A Figura 5.4 apresenta a distribuição e localização dos nós e suas respectivas adjacências.

Figura 5.4: Localização dos nós e relações de adjacências, estudo de caso (turno diurno).

Foram testadas duas instâncias distintas, sendo a primeira sem hora-extra e a segunda considerando uma jornada de trabalho de até 12 horas, subdivida em três partes, (1) regular de 8 horas, (2) primeira faixa excedente de 2 horas e (3) segunda faixa excedente de mais 2 horas, sendo sobre as duas últimas aplicado um fator adicional salarial horário de equipe de 50% e 100%, respectivamente e conforme CLT. Tais custos extras são incorporados ao cálculo da função objetivo e considerados nas restrições, impactando na construção de zonas de coleta e veículos.

Adicionalmente, para ambas instâncias adotou-se como 12.000 kg a capacidade de carga do veículo, além de considerar os 6 dias de coleta e programações de coleta definidas anteriormente, tal como uma quantidade máxima de viagens diária de 3 viagens por veículo como critério verossímil de restrição de capacidade física dos coletores.

A configuração dos parâmetros da heurística, conforme enumeração da seção 5.1.1 (parâmetros 4 a 8), foi adotada como 5, 20, 10, 10 e 4. A quantidade da população gerada aleatoriamente foi reduzida para que a memória não excedesse a capacidade

de processamento do servidor, uma vez que a quantidade de nós analisada é significativa e impacta sobre a performance do modelo, requerendo, portanto, uma quantidade de *threads* em nível superior preferencialmente menor.

5.2.2 Resultados

As instâncias em escala real foram rodadas extensivamente em servidor de alta capacidade gerenciado pelo sistema HTCondor, dispondo de 2 processadores quadricore Intel(R) Xeon(R) CPU X5472 @ 3.00GHz, 32GB RAM e 200GB HD, sendo consumida a ordem de 30GB de memória RAM e processadas em torno de 80 horas. A Figura 5.5 e a Figura 5.6 ilustram a distribuição das zonas de coleta para cada dia da semana, sem hora-extra e com hora-extra, respectivamente.

Figura 5.5: Solução heurística, sem hora-extra.

Figura 5.6: Solução heurística, com hora-extra.

A resolução do problema em escala real se mostrou certamente mais complexa que a do problema em escala reduzida testado anteriormente, exigindo muito mais esforço computacional (tempo de processamento de cerca de 200 vezes maior e memória em disco cerca de 6 vezes maior). Por este motivo também, não foi possível explorar de forma mais extensiva as diversas combinações da vizinhança das soluções, podendo, inclusive, a solução heurística obtida se encontrar distante do que se consideraria ótimo. Em nível tático, contudo, já se obtém uma boa solução viável da qual partir para futuros planejamentos, seja em nível estratégico ou operacional.

Nota-se que o relaxamento do problema através da possibilidade de se estender a jornada de trabalho mediante custo de hora adicional permite redução de custo devido à melhor utilização dos recursos (ver Tabela 5.6), com redução de 40% do custo total e de cerca de 45% da frota, ante um aumento da jornada de trabalho média de 7,29 horas para 9,88 horas (desvios respectivos de 1,1% e 2,7%), além de a ocupação média por veículo subir de 50% para 75%.

Tabela 5.6: Sumário executivo do problema em escala real.

		sem hora-extra	com hora-extra
Função objetivo	[k\$]	3337,9	2370,9
Demanda semanal atendida	[t]	4140,6	4140,6
Frota semanal	[veic.]	119	82
Extensão semanal percorrida	[km]	57811,72	51017,27
Demanda diária atendida	[kg]	(690108;20,9%)	(690108;20,8%)
Demanda atendida por veículo	[kg]	(6199;16,1%)	(8910;17,3%)
Jornada de trabalho por veículo	[h]	(7,29;1,1%)	(9,88;2,7%)

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudou-se o *Problema da Coleta Domiciliar Urbana de Resíduos Sólidos* (PCDU) sob a perspectiva do operador do serviço, em nível tático, programando o atendimento periódico semanal de uma determinada região, associando setores censitários a zonas de coleta e zonas de coleta a veículos, dimensionando a frota como resultado.

O PCDU, como se mostrou, é um problema cuja complexidade exige que métodos heurísticos sejam aplicados, não podendo ser resolvido o modelo matemático, a não ser por instâncias de pequena escala e, ainda assim, há grande dificuldade de se atingir a solução ótima. Para fins aplicáveis interessa somente a resolução de problemas em escala real, uma vez que em menor escala, a estrutura organizacional é mais simples, sendo possível resolver o problema de forma analítica ou por experiência do operador.

A presente pesquisa se propôs a gerar solução heurística viável e em nível tático, que pudesse ser um ponto de partida para uma posterior análise em nível operacional, em que uma roteirização em arco capacitado sobre uma malha viária mais detalhada para cada zona de coleta definida pudesse ser conduzida.

Foi possível obter como resultado, portanto, o planejamento tático do serviço de coleta domiciliar urbana por meio da definição de zonas de coleta para cada dia da semana, as quais são atendidas por veículos específicos que podem realizar múltiplas viagens com renovação de capacidade em estação de transbordo antes de finalizar seu turno na base de origem, de modo a atender toda a demanda semanal visando o menor custo operacional, refletido principalmente no tamanho da frota.

Peculiaridades do PCDU apresentadas e que diferem do usualmente abordado em outras pesquisas são a imposição de compactação das rotas (zonas de coleta contínuas e necessidade de adjacência dos setores censitários que as compõem) e a dependência da demanda diária em função da programação de coleta, o que amplifica o grau de complexidade do problema, sendo somente parcialmente compatíveis métodos heurísticos encontrados na literatura.

É possível que um maior tempo de execução (maior número de iterações na configuração dos parâmetros calibráveis) conduza a uma melhor solução, porém o

método desenvolvido carece de algoritmo de convergência global para se ter o controle de otimalidade. Métodos com memória, como algoritmo genético, por exemplo, poderiam acelerar e intensificar a replicação de soluções melhores a cada iteração no nível superior da busca de melhoria local, podendo estes serem aprofundados em pesquisas futuras. Além disso, notou-se a necessidade de um algoritmo construtivo mais eficiente, que pudesse gerar soluções viáveis iniciais de melhor qualidade, a fim de realizar buscas por melhoria sobre soluções mais robustas e compactas.

Extensões do modelo heurístico poderiam considerar a possibilidade de o veículo retornar à base com uma carga abaixo de um *threshold* que poderia ser acumulada para o turno seguinte; também considerar melhorias na geração de vizinhança de solução, explorando alternativas mais diversas que poderiam conduzir a soluções melhores; eventualmente atrelar adjacência dos setores censitários com nível de acessibilidade entre eles; desenvolver método construtivo mais eficiente e considerar uma robustez maior nas restrições trabalhistas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFROZ, R.; HANAKI, K.; TUDDIN, R. **The Role of Socio-Economic Factors on Household Waste Generation: A Study in a Waste Management Program in Dhaka City, Bangladesh.** Research Journal of Applied Sciences, v. 5, n. 3, p. 183-190, 2010.

ALONSO, F.; ALVAREZ, M. J.; BEASLEY, J. E. **A Tabu Search Algorithm for the Periodic Vehicle Routing Problem with Multiple Vehicle Trips and Accessibility Restrictions.** Journal of the Operational Research Society, v. 59, p. 963-976, 2008.

ANGELELLI, E.; SPERANZA, M. G. **The Periodic Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities.** European Journal of Operational Research, v. 137, p. 233-247, 2002.

AZI, N.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. **An Adaptive Large Neighborhood Search for a Vehicle Routing Problem with Multiple Trips.** Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Enterprise, la Logistique et le Transport. [S.l.]. 2010.

BACH, H.; MILD, A.; NATTER, M.; WEBER, A. **Combining Socio-Demographic and Logistic Factors to Explain the Generation and Collection of Waste Paper.** Resources, Conservation and Recycling, v. 41, p. 65-73, 2004.

BAPTISTA, S.; OLIVEIRA, R. C.; ZÚQUETE, E. **A Period Vehicle Routing Case Study.** European Journal of Operational Research, v. 139, p. 220-229, 2002.

BEIGL, P.; LEBERSORGER, S.; SALHOFER, S. **Modelling Municipal Solid Waste Generation: A Review.** Waste Management, v. 28, n. 1, p. 200-214, 2008.

BELTRAMI, E.; BODIN, L. **Networks and Vehicle Routing for Municipal Waste Collection.** Networks, v. 4, n. 1, p. 65-94, 1974.

BENJAMIN, A. M.; BEASLEY, J. E. **Metaheuristics for the Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows, Driver Rest Period and Multiple Disposal Facilities.** Computers and Operations Research, v. 37, p. 2270-2280, 2010.

BRASIL. **Decreto n. 7.217, de 21 de junho de 2010.** Regulamenta a Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências.

CHEN, H. W.; CHANG, N.-B. **Prediction Analysis of Solid Waste Generation Based on Grey Fuzzy Dynamic Modeling.** Working paper, Department of Environmental Engineering, National Cheng-Kung University, Taiwan, 1999.

CORDEAU, J.-F.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. **A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems.** Networks, v. 30, p. 105-119, 1997.

DRUMMOND, L. M. A.; OCHI, L. S.; VIANNA, D. S. **An Asynchronous Parallel Metaheuristic for the Vehicle Routing Problem.** Future Generation Computer Systems, v. 17, p. 379-386, 2001.

FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. **A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing.** Networks, v. 11, p. 109-124, 1981.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual de orientações técnicas para elaboração de propostas para o programa de resíduos sólidos.** [2013?], 34p.

GHIANI, G.; LAGANÀ, D.; MANNI, E.; MUSMANNO, R.; VIGO, D. **Operations Research in Solid Waste Management: A Survey of Strategic and Tactical Issues.** Computers and Operations Research, v. 44, p. 22-32, 2013.

HEMMELMAYR, V. C.; DOERNER, K. F.; HARTL, R. F. **A Variable Neighborhood Search Heuristic for Periodic Routing Problems.** European Journal of Operational Research, v. 195, p. 791-802, 2009.

HOCKETT, D.; LOBER, D. J.; PILGRIM, K. **Determinant of Per Capita Municipal Solid Waste Generation in the Southeastern United States.** Journal of Environmental Management, v. 45, p. 205-217, 1995.

HOFF, A.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; HASLE, G.; LOKKETANGEN, A. **Industrial Aspects and Literature Survey: Fleet Composition and Routing**. Computers and Operations Research, v. 37, p. 2041-2061, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico**. 2010.

JIN, J.; CRAINIC, T. C.; LOKKETANGEN, A. **A Parallel Multi-Neighborhood Cooperative Tabu Search for Capacitated Vehicle Routing Problems**. European Journal of Operational Research, v. 222, p. 441-451, 2012.

KIM, B.-I.; KIM, S.; SAHOO, S. **Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows**. Computers and Operations Research, v. 33, p. 3624-3642, 2006.

KULCAR, T. **Optimizing Solid Wast Collection in Brussels**. European Journal of Operational Research, Brussels, v. 90, p. 71-77, 1996.

KYTÖJOKI, J.; NUORTIO, T.; BRÄYSY, O.; GENDREAU, M. **An Efficient Variable Neighbourhood Search Heuristic for Very Large Scale Vehicle Routing Problems**. Computers and Operations Research, v. 34, p. 2743-2757, 2007.

KYTÖJOKI, J. **New Implementation Techniques for Search Algorithms**. Working Paper, Universidade de Jyväskylä, Finlândia. 2004.

LAWLER, E. L.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G.; SHMOYS, D. B. **The Traveling Salesman Problem : A Guided Tour of Combinatorial Optimization**. John Wiley & Sons, 1985.

LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G. **Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems**. Networks, v. 11, n. 2, p.221-227, 1981.

MALE, J. W.; LIEBMAN, J. C. **Districting and Routing for Solid Waste Collection**. Journal of the Environmental Engineering Division, v. 104, n. 1, p. 1-14, 1978.

MARTÍ, R.; RESENDE, M. G. C.; RIBEIRO, C. C. **Multi-Start Methods for Combinatorial Optimization**. European Journal of Operational Research, v. 226, p. 1-8, 2013.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. **Variable Neighbourhood Search**. Computers and Operations Research, v. 24, n. 11, p. 1097-1100, 1997.

MOURGAYA, M.; VANDERBECK, F. **Column Generation Based Heuristic for Tactical Planning in Multi-Period Vehicle Routing**. European Journal of Operational Research, v. 183, p. 1028-1041, 2007.

NUORTIO, T.; NUSKA, H.; HILTUNEN, T.; KOLEHMAINEN, M. **Using Operational Data and Neural Networks to Predict Waste Formation and Collection Travel Times**. Working paper, Environmental Informatics, University of Kuopio, Finland, 2004.

NUORTIO, T.; KYTÖJOKI, J.; NISKA, H.; BRÄYSY, O. **Improved Route Planning and Scheduling of Waste Collection and Transport**. Expert Systems with Applications, v. 30, p. 223-232, 2006.

PETCH, R. J.; SALHI, S. **A Multi-Phase Constructive Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Multiple Trips**. Discrete Applied Mathematics, v. 133, p. 69-92, 2004.

RONEN, D. **Allocation of Trips to Trucks Operating from a Single Terminal**. Computers and Operations Research, v. 19, n. 5, p. 445-451, 1991.

RUSSELL, R. A.; IGO, W. **An Assignment Routing Problem**. Networks, v. 9, n. 1, p. 1-17, 1979.

SAHOO, S.; KIM, S.; KIM, B.-I.; KRAAS, B.; POPOV JR., A. **Routing Optimization for Waste Management**. Interfaces, v. 35, n. 1, p. 24-36, 2005.

SALHI, S.; PETCH, R. J. **A GA Based Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Multiple Trips**. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, v. 6, p. 591-613, 2007.

SOLOMON, M. M. **Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints**. Operations Research, v. 35, p. 254-265, 1987.

TAILLARD, E. D.; BADEAU, P.; GENDREAU, M.; GUERTIN, F.; POTVIN, J. Y. **A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows**. Transportation Science, v. 31, p. 170-186, 1997.

TAN, C. C. R.; BEASLEY, J. E. **A Heuristic Algorithm for the Period Vehicle Routing Problem**. International Journal of Management Science, London, UK, v. 12, n. 5, p. 497-504, 1984.

TOOBAIE, S.; HAGHANI, A. **Minimal Arc Partitioning Problem: Formulation and Application in Snow Routing with Service Route Continuity.** Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., v. 1882, p. 167-175, 2004.

VIDAL, T.; CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; PRINS, C. **An Unified Solution Framework for Multi-Attribute Vehicle Routing Problems.** Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Enterprise, la Logistique et le Transport. [S.I.]. 2012.

ANEXO A: MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO PARA O GAMS

Abaixo é apresentado o modelo matemático transcrito para ser executado no GAMS; como exemplificação, a Instância A.

Tabela A.1: Modelo matemático implementado no GAMS, exemplificado pela Instância A.

```

$TITLE Prog1
*Instância A

SETS
  j setor      /j1*j20/
  k veiculos   /k1*k8/
  t dia        /t1*t6/
  r rota       /r1*r3/
  p programa   /p1*p22/
;
alias(j,i);
*Custo        Veiculo
Scalar FF /3000/;
Scalar FI /20000/;
*Preco Combustivel
Scalar PP /2/;
Scalar CD /3.9/;
Scalar CH /0.39/;
*Capacidade do veículo
Scalar QQ /3500/;
*Jornada de trabalho
Scalar TT /8/;
Scalar DD /1/;
Parameter a1(p,t)      dias de coleta por programa;
$include "_a1.prn"
Parameter a2(j,i)      matriz de adjacencia;
$include "_a2.prn"
Parameter a3(j,p)      define se o programa eh compativel com o setor;
$include "_a3.prn"
Parameter qq1(j,p,t)    parcela de demanda segundo o programa;
$include "_qq1.prn"
Parameter qq2(j,p,t)    tempo de coleta segundo o programa;
$include "_qq2.prn"
Parameter tv(j,r)       tempo de viagem;
$include "_tv.prn"
Parameter cv(j,r)       custo variavel;
$include "_cv.prn"

Variables
  CT          custo total
  x(j,p)      escolha do programa de coleta por setor
  y(j,k,r,t)  atribui ao setor veiculo e rota a cada dia

```

$z(j,k,r,t)$ define a semente do veiculo e rota a cada dia
 $w(k,r,t)$ controle sobre as rotas percorridas no dia
 $ww(k)$ controla utilizacao do veiculo
 $q1(j,k,r,t)$ carga transportada do setor no veiculo rota e dia
 $Tc(j,k,r,t)$ tempo de coleta do setor no veiculo rota e dia
 $f(i,j,k,r,t)$ variavel de fluxo para controlar yy
;

BINARY VARIABLE x, y, z, w, ww;

POSITIVE VARIABLE q1, Tc, f;

Equations

FuncaoObjetivo
AtribuirProgramaColeta(j)
EvitarErro(j)
EscolheVeiculoRota(j,t)
AtribuiCarga(j,k,r,t)
CapacidadeVeiculoRota(k,r,t)
AtribuiTempoColeta(j,k,r,t)
TempoMaximoColeta(k,t)
UsouVeiculo(k,r,t)
RegulaVeiculo(k)
ForcaExistirNoSemente(k,r,t)
NaoRepeteNoSemente(j,t)
NaoRepeteNoSemente2(k,r,t)
NoSementePertenceZonaColeta(j,k,r,t)
SequenciaRotas(k,t)
SequenciaRotas2(k,t)
RelacaoFluxo1(i,j,k,r,t)
RelacaoFluxo2(i,j,k,r,t)
RelacaoFluxo3(j,k,r,t)
RelacaoFluxo4(j,k,r,t)
RelacaoFluxo5(j,k,r,t)
;

*Sem penalidade de hora-extra

FuncaoObjetivo..

$$\begin{aligned}
CT = E = & FF * \text{sum}(k, ww(k) * \text{card}(t) - \text{sum}(t, w(k, 'r1', t))) + FI * \text{sum}(k, ww(k)) + \\
& PP * (CD * \text{sum}(j, \text{sum}(k, \text{sum}(r, \text{sum}(t, DD * cv(j, r) * z(j, k, r, t))))) \\
& + CH * \text{sum}(t, \text{sum}(k, \text{sum}(r, \text{sum}(j, Tc(j, k, r, t))))));
\end{aligned}$$

AtribuirProgramaColeta(j)..

$$\text{sum}(p, a3(j, p) * x(j, p)) = E = 1;$$

EvitarErro(j)..

*Esta restrição é para evitar que outros $x(j, p)$ assumam valor 1, sem poder

$$\text{sum}(p, x(j, p)) = E = 1;$$

EscolheVeiculoRota(j,t)..

$$\text{sum}(k, \text{sum}(r, y(j, k, r, t))) = E = \text{sum}(p, a1(p, t) * x(j, p));$$


```

AtribuiCarga(j,k,r,t)..
q1(j,k,r,t) =G= sum(p, qq1(j,p,t)*x(j,p)) - (1-y(j,k,r,t))*QQ;

CapacidadeVeiculoRota(k,r,t)..
sum(j, q1(j,k,r,t)) =L= QQ;

AtribuiTempoColeta(j,k,r,t)..
Tc(j,k,r,t) =G= sum(p, qq2(j,p,t)*x(j,p)) - (1-y(j,k,r,t))*TT;

TempoMaximoColeta(k,t)..
sum(r, sum(j, Tc(j,k,r,t) + DD*tv(j,r)*z(j,k,r,t))) =L= TT;

UsouVeiculo(k,r,t)..
sum(j, y(j,k,r,t)) =L= card(j)*w(k,r,t);
RegulaVeiculo(k)..
sum(t,w(k,'r1',t)) =L= card(t)*ww(k);

ForcaExistirNoSemente(k,r,t)..
sum(j, z(j,k,r,t)) =G= w(k,r,t);

NaoRepeteNoSemente(j,t)..
sum(k, sum(r, z(j,k,r,t))) =L= 1;
NaoRepeteNoSemente2(k,r,t)..
sum(j, z(j,k,r,t)) =L= 1;

NoSementePertenceZonaColeta(j,k,r,t)..
z(j,k,r,t) =L= y(j,k,r,t);

SequenciaRotas(k,t)..
sum(j, y(j,k,'r2',t)) =L= sum(j, y(j,k,'r1',t));

SequenciaRotas2(k,t)..
sum(j, y(j,k,'r3',t)) =L= sum(j, y(j,k,'r2',t));

RelacaoFluxo1(i,j,k,r,t)..
f(i,j,k,r,t) =L= card(j)*y(i,k,r,t);

RelacaoFluxo2(i,j,k,r,t)..
f(i,j,k,r,t) =L= card(j)*y(j,k,r,t);

RelacaoFluxo3(j,k,r,t)..
sum(i, f(i,j,k,r,t)*a2(i,j)) =L= (1-z(j,k,r,t))*card(j);

RelacaoFluxo4(j,k,r,t)..
sum(i, f(i,j,k,r,t)*a2(i,j)) - sum(i, f(j,i,k,r,t)*a2(j,i)) =G= y(j,k,r,t) - (card(j)+1)*z(j,k,r,t);

RelacaoFluxo5(j,k,r,t)..
sum(j, f(i,j,k,r,t)*a2(i,j)) =L= sum(j, y(j,k,r,t));

OPTION MIP = CPLEX;
OPTION RESLIM = 43200;

```

```

OPTION ITERLIM = 100000000;
MODEL Prog1 /ALL/;
Prog1.OPTFILE = 1 ;
Prog1.OPTCR = 0;
SOLVE Prog1 USING MIP MINIMIZING CT;

FILE SAIDA ;
PUT SAIDA ;

PUT 'Funcao Objetivo' /;
PUT CT.L/;
PUT 'Veiculos utilizados' /;
loop(t,
    PUT ord(t);
    PUT @10, sum(k, w.l(k,'r1',t));
);
PUT 'producao semanal'/;
PUT sum(j,sum(k,sum(r,sum(t,q1.L(j,k,r,t)))));
PUT /;

put 'Programa_Coleta' /;
put 'j';
put @10, 'p';
put @20, 'freq';
loop(j,
    loop(p,
        if (x.l(j,p) ne 0,
            put ord(j);
            put @10, ord(p);
            put @20, sum(t, a1(p,t));
        ););
put /;

put 'No_Semente'/;
loop(t,
    loop(k,
        loop(r,
            loop(j,
                if (z.L(j,k,r,t) ne 0,
                    put k.TL;
                    put @10, t.TL;
                    put @20, r.TL;
                    put @30, j.TL;
                ););););
put /;

put 'Associacao_Veiculo_Rota';
put @40, 'PSetor';
put @50, 'TColeta';
loop(j,
    loop(k,

```

```

loop(r,
  loop(t,
    if (y.L(j,k,r,t) ne 0,
      put    j.TL;
      put @10, k.TL;
      put @20, r.TL;
      put @30, t.TL;
      put @40, q1.L(j,k,r,t);
      put @50, Tc.l(j,k,r,t)/;
    ););););
put /;

put 'Uso_Rota';
put @30, 'Carga';
put @40, 'Jornada';
loop(t,
  loop(k,
    loop(r,
      if (w.L(k,r,t) ne 0,
        put    k.TL;
        put @ 10, r.TL;
        put @20, t.TL;
        put @30, sum(j,q1.L(j,k,r,t));
        put @40, (sum(j,Tc.L(j,k,r,t)+tv(j,r)*z.L(j,k,r,t)))/;
      ););););
put /;

```

ANEXO B: RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO RODADO NO GAMS, INSTÂNCIA F

Neste anexo é apresentada a soluções obtida da instância F rodada no GAMS no formato de arquivo gerado pelo *software*.

Tabela B.2: Arquivo "SAIDA.put" do modelo matemático resolvido no GAMS, instância F.

Funcao Objetivo			
42046.97			
Veiculos utilizados			
1	2.00		
2	2.00		
3	2.00		
4	2.00		
5	2.00		
6	2.00		
producao semanal			
102593.31			
Programa_Coleta			
j	p	freq	
1	7.	3.00	
2	22.	6.00	
3	9.	1.00	
4	22.	6.00	
5	22.	6.00	
6	22.	6.00	
7	22.	6.00	
8	22.	6.00	
9	10.	1.00	
10	22.	6.00	
11	7.	3.00	
12	10.	1.00	
13	7.	3.00	
14	22.	6.00	
15	7.	3.00	
16	10.	1.00	
17	7.	3.00	
18	22.	6.00	
19	22.	6.00	
20	20.	5.00	
No_Semente			
k4	t1	r1	j6
k4	t1	r2	j8
k5	t1	r1	j14
k4	t2	r1	j6

k5	t2	r1	j7
k4	t3	r1	j6
k5	t3	r1	j7
k5	t3	r2	j14
k4	t4	r1	j7
k5	t4	r1	j6
k4	t5	r1	j6
k4	t5	r2	j14
k5	t5	r1	j7
k4	t6	r1	j6
k5	t6	r1	j7

Associacao_Veiculo_Rota				PSetor	TColeta
j1	k4	r1	t1	2055.	13.89
j1	k4	r1	t3	1827.	13.89
j1	k4	r1	t5	1827.	13.89
j2	k4	r1	t1	1426.	13.89
j2	k4	r1	t2	992.	13.89
j2	k4	r1	t3	992.	13.89
j2	k4	r1	t5	992.	13.89
j2	k4	r1	t6	806.	13.89
j2	k5	r1	t4	992.	13.89
j3	k5	r1	t4	10.	5.00
j4	k4	r1	t1	1008.	12.00
j4	k4	r1	t2	701.	5.00
j4	k4	r1	t3	701.	5.00
j4	k4	r1	t5	701.	5.00
j4	k4	r1	t6	569.	5.00
j4	k5	r1	t4	701.	5.00
j5	k4	r1	t2	1006.	12.26
j5	k4	r1	t4	1006.	12.26
j5	k4	r1	t6	817.	12.26
j5	k4	r2	t1	1446.	12.26
j5	k5	r1	t3	1006.	12.26
j5	k5	r1	t5	1006.	12.26
j6	k4	r1	t1	1251.	13.92
j6	k4	r1	t2	870.	13.92
j6	k4	r1	t3	870.	13.92
j6	k4	r1	t5	870.	13.92
j6	k4	r1	t6	707.	13.92
j6	k5	r1	t4	870.	13.92
j7	k4	r1	t1	1610.	13.72
j7	k4	r1	t4	1120.	13.72
j7	k5	r1	t2	1120.	13.72
j7	k5	r1	t3	1120.	13.72
j7	k5	r1	t5	1120.	13.72
j7	k5	r1	t6	910.	13.72
j8	k4	r1	t2	1248.	12.62
j8	k4	r1	t4	1248.	12.62
j8	k4	r2	t1	1795.	12.62
j8	k5	r1	t3	1248.	12.62

j8	k5	r1	t5	1248.	12.62
j8	k5	r1	t6	1014.	12.62
j9	k5	r1	t6	10.	5.00
j10	k4	r1	t2	1120.	12.26
j10	k4	r1	t4	1120.	12.26
j10	k4	r2	t1	1610.	12.26
j10	k5	r1	t3	1120.	12.26
j10	k5	r1	t5	1120.	12.26
j10	k5	r1	t6	910.	12.26
j11	k4	r2	t1	2024.	12.82
j11	k4	r2	t5	1799.	12.82
j11	k5	r1	t3	1799.	12.82
j12	k4	r1	t6	2287.	16.11
j13	k5	r1	t1	1752.	12.92
j13	k5	r1	t5	1557.	12.92
j13	k5	r2	t3	1557.	12.92
j14	k4	r1	t4	1329.	12.00
j14	k4	r2	t5	1329.	12.00
j14	k5	r1	t1	1911.	12.00
j14	k5	r1	t2	1329.	12.00
j14	k5	r1	t6	1080.	12.00
j14	k5	r2	t3	1329.	12.00
j15	k4	r2	t5	1914.	16.17
j15	k5	r1	t1	2154.	16.17
j15	k5	r2	t3	1914.	16.17
j16	k5	r1	t6	3289.	16.12
j17	k4	r2	t1	1952.	15.78
j17	k5	r1	t5	1735.	15.78
j17	k5	r2	t3	1735.	15.78
j18	k4	r1	t2	1054.	16.08
j18	k4	r1	t4	1054.	16.08
j18	k4	r2	t5	1054.	16.08
j18	k5	r1	t1	1516.	16.08
j18	k5	r1	t6	856.	16.08
j18	k5	r2	t3	1054.	16.08
j19	k4	r1	t2	1071.	16.95
j19	k4	r1	t4	1071.	16.95
j19	k4	r2	t5	1071.	16.95
j19	k5	r1	t1	1539.	16.95
j19	k5	r1	t3	1071.	16.95
j19	k5	r1	t6	870.	16.95
j20	k4	r1	t1	842.	16.65
j20	k4	r1	t2	586.	16.65
j20	k4	r1	t6	476.	16.65
j20	k5	r1	t4	1172.	16.65
j20	k5	r1	t5	586.	16.65
Uso_Rota				Carga	Jornada
k4	r1	t1		8194.	103.33
k4	r2	t1		8829.	103.12
k5	r1	t1		8874.	102.08

k4	r1	t2	8651.	145.89
k5	r1	t2	2450.	51.22
k4	r1	t3	4391.	72.96
k5	r1	t3	7366.	118.13
k5	r2	t3	7593.	89.87
k4	r1	t4	7951.	121.39
k5	r1	t4	3746.	80.72
k4	r1	t5	4391.	72.96
k4	r2	t5	7170.	90.94
k5	r1	t5	8375.	133.71
k4	r1	t6	5664.	104.09
k5	r1	t6	8942.	130.25

ANEXO C: RESULTADOS DO MODELO HEURÍSTICO EM ESCALA REDUZIDA, INSTÂNCIA F

Neste anexo são apresentados os resultados provenientes da análise da instância F, a título de ilustração, rodada no modelo heurístico para o PCDU em escala reduzida.

A seguir é descrito o conteúdo das tabelas e figuras dispostas:

- Sumário executivo (tabela) – contém informações agregadas a respeito da solução, como valor da função objetivo, frota requerida, valores médios de demanda atendida e de jornada de trabalho, tal como a extensão total percorrida;
- Distribuição do atendimento semanal (tabela) – para cada dia da semana é apresentada a quantidade necessária de veículos para realizar o atendimento, juntamente com a demanda a ser atendida e a quantidade de zonas de coleta geradas e setores censitários atendidos;
- Utilização de veículo para cada dia da semana (tabela) – para cada dia da semana se destaca a utilização de cada veículo, apresentando o número de viagens, a demanda atendida e a jornada de trabalho consumida;
- Solução heurística (figura) – mapas georreferenciados ilustrando a agregação dos setores censitários em zonas de coleta e nós-semente, alocados para cada viagem, veículo e dia da semana;
- Atendimento dos nós, por veículo e período (figura) – representa o atendimento de cada nó (linha do diagrama) para cada dia da semana, destacando-se os diferentes veículos.

Tabela C.3: Sumário executivo da instância F.

Função objetivo	[\$]	24772
Demanda semanal atendida	[kg]	102593
Frota semanal	[veic.]	1
Extensão semanal percorrida	[km]	330,18
Demanda diária atendida	[kg]	(17099;19,3%)
Demanda atendida por veículo	[kg]	(15390;18,3%)
Jornada de trabalho por veículo	[h]	(5,12;13,6%)

Tabela C.4: Distribuição do atendimento semanal para a instância F.

dia da semana	veículos utilizados	zonas de coleta	setores atendidos	demanda atendida (kg)
seg	1	3	10	22835
ter	1	2	12	14912
qua	1	3	15	17210
qui	1	3	13	15985
sex	1	2	17	16958
sáb	1	2	13	14693

Tabela C.5: Utilização de veículo para cada dia da semana, instância F.

dia da semana	veículo	viagens	demanda atendida (kg)	jornada do turno (h)
seg	1	3	22835	4,66
ter	1	2	14912	4,36
qua	1	3	17210	6,37
qui	1	3	15985	5,20
sex	1	2	16958	5,59
sáb	1	2	14693	4,53

Figura C.1: Solução heurística da instância F.

Figura C.2: Atendimento dos nós, por veículo e período, para a instância F.