



IMPLEMENTAÇÃO DA COLETA SELETIVA DE ESTABELECIMENTOS  
COMERCIAIS POR MEIO DE UM APLICATIVO DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS:  
UM ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO

Luíza Santana Franca

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro

Março de 2017

IMPLEMENTAÇÃO DA COLETA SELETIVA DE ESTABELECIMENTOS  
COMERCIAIS POR MEIO DE UM APLICATIVO DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS:  
UM ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO

Luíza Santana Franca

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

---

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Carlos David Nassi, Dr. Ing.

---

Prof<sup>a</sup>. Gisele de Lorena Diniz Chaves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2017

Franca, Luíza Santana

Implementação da Coleta Seletiva de Estabelecimentos Comerciais por meio de um Aplicativo de Roteamento de Veículos: Um Estudo de Caso no Rio De Janeiro/ Luíza Santana Franca. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIII, 78 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 76 - 81.

1. Coleta Seletiva. 2. Roteamento de veículos. 3. Coletas de resíduos sólidos urbanos. I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Ao finalizar esta dissertação vários momentos me vieram à tona para lembrar como foram intensos esses anos de mestrado que me levaram a concluir neste momento com este trabalho. Antes de tudo agradeço imensamente por toda a parceria de trabalho que fiz com meu orientador, Prof. Glaydston, que me apoiou e me deu todo o suporte que eu precisava para elaborar este trabalho, desde seu começo que foi completamente do zero; além de confiar e me motivar sempre nos momentos em que mais precisei. Mas uma das características mais importantes dele é ser aquele que irá te dar o pontapé inicial para o trabalho, que vai te instigar a ponto de você querer seguir em frente com aquela ideia que acredita e vai te dar toda liberdade para você fazer da maneira que achar melhor. Essa, para mim, é a principal característica de um orientador, que não está somente ali para dar um suporte e sim para dar todos os aparatos de forma a impulsionar o pesquisador para que ele busque seus caminhos e que descubra a si próprio nesta jornada. Por isso, o Prof. Glaydston é para mim hoje o meu melhor exemplo de profissional que eu quero ser um dia. Muito obrigada por toda amizade, consideração e incentivo!

Seguindo, só tenho que agradecer à minha família, que é a base de tudo que sou hoje e de todos os princípios que regem a minha vida. Muito obrigada a meu pai e minha mãe por sempre me incentivarem e me apoiarem nas minhas decisões, e por estarem sempre a meu lado. E à minha irmã, por ser a pessoa mais preciosa na minha vida! Agradeço por toda a amizade que temos e por estarmos sempre juntas para o que der e vier.

Muito especialmente agradeço ao João, a quem tanto amo e sou tanto feliz por estar junto! Muito obrigada por tudo o que você representa para mim, por todo carinho, amor e cumplicidade que temos. Agradeço todo o apoio que você me dá e todos os conselhos em cada momento da minha vida, inclusive na conclusão deste trabalho! Muito obrigada pela paciência, pelas sugestões e pelas motivações! E principalmente por juntar os mil pedaços de mim sendo parte ainda do que me faz forte.

Reservo um agradecimento especial às maravilhosas, Lelê e Michelle, que sempre estiveram comigo desde crianças. Não poderia ser uma pessoa mais feliz ao ter vocês em minha vida! São tantos anos de amizade, nos quais passamos tantas coisas juntas...e esse é mais um momento para comemorarmos juntas!

Com um destaque particular, reservo agradecimentos às minhas amigas e companheiras Bia, Lygia e Inaê, por me acompanharem nesses anos de mestrado.

Foram tantas alegrias, frustrações e reviravoltas que não seriam possíveis de passar se eu não tivesse o apoio de vocês! E mais do que isso, a amizade que construímos é tão improvável e, ao mesmo tempo, tão certa que nos faz sermos cada vez mais completas e realizadas.

Cabe aqui o meu muito obrigado também à empresa ORTEC, e em particular ao Bart, pela permissão em utilizar o aplicativo de roteamento de veículos ORTEC *Routing and Dispatch*, que contribuiu muito para que os cenários planejados pudessem ser simulados em um ambiente bem próximo do real, além da parceria que estamos iniciando entre a Universidade e a Empresa. E meus imensos agradecimentos ao Renato, por dar todo o suporte que precisei para utilizar o aplicativo e por estar sempre disposto a me ajudar no que precisei. Depois de idas e vindas, de mais desespero que tranquilidade, conseguimos concluir os resultados!

Por fim, agradeço à Clean Ambiental, pela oportunidade de trabalhar no mercado de resíduos sólidos, que é uma área tão desafiadora e que me apaixonei tanto. Muito obrigada por todas as experiências práticas que pude vivenciar e por todos os dados disponibilizados para que esta pesquisa fosse possível.



Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

IMPLEMENTAÇÃO DA COLETA SELETIVA DE ESTABELECIMENTOS  
COMERCIAIS POR MEIO DE UM APLICATIVO DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS:  
UM ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO

Luíza Santana Franca

Março/2017

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

Segundo UNEP e ISWA (2015), os resíduos sólidos urbanos (RSU) possuem um crescimento de 7 a 10 bilhões de toneladas por ano no mundo, sendo que no Brasil, segundo SNIS (2016), 52,0% do total de resíduos coletados foram destinados a aterros sanitários e 3.326 municípios ainda utilizam formas inadequadas de disposição final (ABLRELPE, 2015). Tendo em vista a importância do desenvolvimento do setor, o presente trabalho visa avaliar economicamente a prática da coleta seletiva de resíduos recicláveis, de forma que estes possam ser reaproveitados e ter um destino final alternativo ao aterro sanitário. A análise deste trabalho foi feita por meio do uso do aplicativo de roteamento de veículos ORTEC *Routing and Dispatch* (ORD), de forma a simular a operação de uma empresa que realiza a coleta de RSU proveniente de estabelecimentos comerciais no Rio de Janeiro. A proposta foi planejada em 16 cenários de abrangência da coleta seletiva, que aumentou de forma gradativa de acordo com a conscientização da população. Os resultados das simulações mostram que, apesar do aumento de 41,44% da quilometragem total percorrida por todas as rotas ao se comparar o Cenário 16 (coleta seletiva de todos os resíduos recicláveis gerados, considerando a meta de 30% de rejeito pela PNRS) com o Cenário 1 (cenário base atual), é possível observar uma redução de 11,39% da quilometragem com a otimização das rotas de coleta seletiva pelo aplicativo. Desta forma, é possível obter uma redução de 27,72% do custo total, em relação ao cenário base avaliado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IMPLEMENTATION OF THE SELECTIVE COLLECTION OF COMMERCIAL WASTE  
THROUGH A VEHICLE ROUTING APPLICATION: A CASE STUDY IN RIO DE  
JANEIRO

Luíza Santana Franca

March/2017

Advisor: Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

According to UNEP and ISWA (2015), the world urban solid waste can grow by 7 to 10 billion tons per year and in Brazil, 52.0% of the total collected destined to landfills in 2014 (SNIS, 2016) and 3.326 municipalities do not have an environmental friendly destination (ABRELPE, 2015). Considering the importance of the waste sector development, the present work aims to economically evaluate the practice of the selective collection of recyclable waste, so that this can be reused and has an alternative final destination. The analysis of this work was done through the use of the software ORTEC Routing and Dispatch (ORD), in order to simulate the operation of the case study in a private company responsible for urban solid waste collection from commercial establishments, which operates in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro. The selective collection was planned in 16 scenarios where the recyclable waste separation was gradually increased, considering the population awareness. The results of the simulations show that despite the 41,44% increase in the total mileage covered by the routes when Scenario 16 (all the recyclable waste were collected which could be usable) were compared to Scenario 1 (current base scenario), it is possible to obtain a reduction of 11,39% of the total mileage covered by the selective routes. In this way, a reduction of 27,72% of the total cost was observed, when the new planning was compared to the base scenario.



# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	3
1.2. ESTRUTURA.....	4
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO e CONCEITUAÇÃO .....</b>	<b>5</b>
2.1. CADEIA LOGÍSTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	5
2.2. PANORAMA DO BRASIL .....	10
2.3. PANORAMA DO RIO DE JANEIRO .....	13
2.4. PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS .....	16
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	21
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
3.1. IDENTIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE REVISÃO .....	25
3.2. ESPECIFICAÇÃO DO OBJETIVO DA REVISÃO .....	25
3.3. DESENVOLVIMENTO DO PROTOCOLO DE REVISÃO.....	25
3.4. IDENTIFICAÇÃO, SELEÇÃO E INCLUSÃO DOS TRABALHOS PESQUISADOS .....	27
3.5. EXTRAÇÃO DOS DADOS E SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	30
3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
<b>4 APLICATIVO PARA A DEFINIÇÃO DE ROTAS (ORTEC Routing and Dispatch - ORD).....</b>	<b>45</b>
4.1. PROGRAMAÇÃO DINÂMICA.....	46
4.2. INSERÇÃO MAIS BARATA .....	47
4.3. BUSCA LOCAL PARA O REFINAMENTO DA SOLUÇÃO .....	48
4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
<b>5 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>51</b>
5.1. OPERAÇÃO DA EMPRESA EM ESTUDO .....	51
5.2. GRAVIMETRIA DOS RESÍDUOS COLETADOS .....	52
5.3. CENÁRIOS PLANEJADOS .....	56
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
<b>6 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
6.1. RESULTADOS DO CENÁRIO 1.....	63
6.2. RESULTADOS DOS CENÁRIOS 2 A 16.....	64

6.3.	COMPARAÇÃO DE TODOS OS CENÁRIOS COM O CENÁRIO BASE .....	72
6.4.	COMPARAÇÃO DETALHADA ENTRE OS CENÁRIOS 1 E 16 .....	74
6.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	75
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes da cadeia logística de RSU .....	7
Figura 2.2. Tipos de destino final utilizados no Brasil, por município.....	11
Figura 2.3. Evolução do índice de ocorrência do serviço de coleta seletiva .....	12
Figura 2.4. Ocorrência do serviço de coleta seletiva e populações correspondentes, segundo região geográfica .....	13
Figura 2.5. Resíduos potencialmente recicláveis registrados pela coleta seletiva municipal .....	14
Figura 2.6. Localização das estações de transferência e aterros sanitários.....	15
Figura 3.1. Procedimento da revisão bibliográfica sistemática .....	24
Figura 3.2. Etapa de Identificação dos trabalhos .....	26
Figura 3.3. Etapas de Seleção e Inclusão dos trabalhos.....	26
Figura 3.4. Quantidade de trabalhos pelas etapas da revisão bibliográfica sistemática .....	28
Figura 3.5. Participação das palavras-chave na etapa de Inclusão.....	28
Figura 3.6. Ano de publicação dos trabalhos incluídos .....	29
Figura 3.7. Região de estudo dos trabalhos incluídos.....	29
Figura 3.8. Periódicos de publicação dos trabalhos incluídos .....	30
Figura 3.9. Aplicativos utilizados pelos trabalhos incluídos na revisão .....	31
Figura 5.1. Fluxograma da coleta de resíduos extraordinários.....	52
Figura 5.2. Abrangência da coleta seletiva para cada cenário de simulação .....	57
Figura 5.3. Localização da base e destinos finais para a simulação dos cenários .....	59
Figura 6.1. Rotas do turno da manhã do Cenário 1 .....	63
Figura 6.2. Rotas do turno da tarde do Cenário 1 .....	64
Figura 6.3. Rotas do turno da noite do Cenário 1.....	64
Figura 6.4. Comparação entre os cenários em relação à quantidade de rotas criadas ... .....	69
Figura 6.5. Comparação entre os cenários em relação à quilometragem das rotas.....	69
Figura 6.6. Comparação entre os cenários com 100% de separação de recicláveis.....	70
Figura 6.7. Comparação entre redução do custo e da quilometragem das rotas convencionais e de coleta seletiva, para os cenários de 100% de coleta seletiva.....	72
Figura 6.8. Custo por cliente (R\$/cliente) atendido nos cenários considerados.....	73
Figura 6.9. Comparação do custo por cliente de cada cenário em relação ao Cenário 1 .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão.....	34
Tabela 5.1. Coeficientes da composição gravimétrica por tipo de estabelecimento ....	53
Tabela 5.2. Tipos de unidade de acondicionamento de resíduos e seus volumes .....	55
Tabela 5.3. Tempo de coleta e peso de cada unidade de acondicionamento de resíduos.....	60
Tabela 5.4. Características dos veículos da frota.....	59
Tabela 5.5. Custos operacionais.....	60
Tabela 5.6. Custo dos destinos finais .....	62
Tabela 6.1. Resultados para a coleta seletiva na Zona Sul.....	65
Tabela 6.2. Resultados para a coleta seletiva no Centro e Tijuca.....	66
Tabela 6.3. Resultados para a coleta seletiva na região da Zona Norte e Ilha.....	65
Tabela 6.4. Resultados para a coleta seletiva nas regiões da Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado .....	66
Tabela 6.5. Resultados para a coleta seletiva na região da Zona Oeste.....	68
Tabela 6.6. Comparação do custo e abrangência entre os cenários de 100% de coleta seletiva.....	69
Tabela 6.7. Comparação do custo e quilometragem das rotas convencionais e de coleta seletiva.....	69
Tabela 6.8. Resultados dos Cenários 1 e 16 .....	71

## **LISTA DE SIGLAS**

CVRS - *ComTec Vehicle Routing Service*

ETR – estação de transferência

GGE – gases de efeito estufa

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISWA - *International Solid Waste Association*

ORD - *ORTEC Routing and Dispatch*

PE - polietileno

PEV - pontos de entrega voluntária de resíduos

PET - polietileno tereftalato

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PRV - problema de roteamento de veículos

PRVC - problema de roteamento de veículos capacitado

PRVJT - problema de roteamento de veículos com janelas de tempo

RSU – resíduos sólidos urbanos

PVC - policloreto de polivinila

UNEP - *United Nations Environment Programme*

UNFCCC - Convenção-Quadro de Mudança Global do Clima

# 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos é um dos serviços essenciais para a sociedade, além de ser, sobretudo, um direito humano, merecendo considerável atenção. Ele engloba desde a fase da geração de resíduos até sua coleta, transporte para o receptor e enfim seu tratamento final, que modificará suas características essenciais de forma a transformá-lo em rejeito, ou seja, “depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”, segundo definição da LEI Nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010).

Segundo o Relatório Global de Gerenciamento de Resíduos, produzido pela ISWA (*International Solid Waste Association*) em conjunto com a UNEP (*United Nations Environment Programme*), a geração de resíduos sólidos cresce anualmente em torno de 2 bilhões de toneladas por ano. Especificamente o grupo de resíduos sólidos urbanos (RSU), que engloba os resíduos comerciais, industriais e de construção civil, pode ter um crescimento de 7 a 10 bilhões de toneladas por ano (UNEP e ISWA, 2015). Neste relatório também observa-se a participação dos diferentes setores na geração de resíduos sólidos de países desenvolvidos. O setor de grande expressão é o de construção civil, com 36% do total de resíduos gerados por ano, seguido pelo setor residencial, com 24%, e o industrial, com 21%. Os setores comercial, de saneamento e de energia contam com a participação de 11%, 5% e 3%, respectivamente, do total de resíduos gerados no ano.

Em contraposição a este aumento na geração de resíduos, estima-se que 3 bilhões de pessoas ao redor do mundo ainda não têm acesso à disposição ambientalmente adequada. Esse quadro pode ser visualizado em países em desenvolvimento que destinam apenas 35% dos resíduos a um tratamento adequado, contrastando com 95 a 100% de destinação ambientalmente adequada em países desenvolvidos (UNEP e ISWA, 2015).

A gestão inadequada dos resíduos sólidos acarreta em grandes impactos ao meio ambiente, principalmente no que diz respeito ao seu tratamento final. A disposição direta dos resíduos sob o solo leva à percolação do chorume da superfície até o lençol freático, ocasionando não só à poluição da água local como à poluição de outras regiões que são atendidas por esse lençol. Além disso, essa prática atrai intensamente

vetores de doenças como insetos, roedores e urubus, sendo estes últimos um motivo de impacto na dinâmica aérea da região. Por fim e não menos importante, a decomposição dos resíduos sólidos gera o gás metano, que é considerado o principal gás de efeito estufa.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) estima que a participação da geração de gases de efeito estufa pelo gerenciamento de resíduos sólidos é cerca de 3% de todas as emissões de poluentes atmosféricos contabilizadas em 2010. Essas emissões são provenientes principalmente da decomposição dos resíduos em aterros sanitários (UNEP e ISWA, 2015).

Cidades de países em desenvolvimento se deparam com os desafios da Agenda 21, como a adaptação e mitigação das mudanças climáticas, além da necessidade de estender o acesso ao saneamento básico a toda população. No caso da coleta e disposição de RSU, por exemplo, recursos financeiros disponibilizados por projetos enquadrados no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo da Convenção-Quadro de Mudança Global do Clima (UNFCCC) contribuíram para viabilizar a construção de aterros sanitários e energéticos com captura e queima do biogás (gás metano), permitindo um avanço na disposição ambientalmente adequada desses resíduos e a redução de gases do efeito estufa (GEE) (PREFEITURA MUNICIPAL, 2015).

Assim, os países, de uma forma geral, vêm desenvolvendo técnicas de tratamento dos resíduos sólidos de forma que as emissões de metano possam ser canalizadas e recebam o tratamento adequado para que seu potencial de intensificação do efeito estufa possa ser reduzido ou eliminado. Como exemplo, a Alemanha conseguiu reduzir 24% das emissões de gases de efeito estufa entre 1990 e 2006 a partir do controle e tratamento adequado do gás metano (UNEP e ISWA, 2015).

Outra forma de combater a geração dos gases de efeito estufa neste setor é a alteração do formato dos produtos para eles utilizarem uma quantidade menor de embalagens, que serão futuramente descartadas, além da intensificação da reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos posteriormente ao seu descarte. Estima-se que entre 15 e 20% da mitigação do efeito estufa podem ser atingidos ao se colocar em prática essas atividades (UNEP e ISWA, 2015).

Especificamente no Brasil, em 2010 entrou em vigor a Lei nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre seus princípios,

objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Segundo o artigo 6º, seus princípios preconizam, entre outros, a visão sistêmica na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública; o desenvolvimento sustentável; e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. E como objetivos definidos no artigo 7º, estão, seguindo esta ordem de prioridade:

- não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; e
- incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

Dados estes objetivos específicos da legislação nacional, um dos pontos mais importantes para o sucesso da sua prática é a conscientização da população acerca desta problemática. Desta forma, para se planejar a coleta seletiva dos resíduos sólidos de uma dada região, e todo o gerenciamento de resíduos de uma forma geral, é essencial que o planejamento englobe processos de treinamento e educação ambiental para que a toda a sociedade esteja preparada para receber este serviço e possa sustentá-lo da melhor forma possível.

Assim, o presente trabalho visa analisar, sobre o ponto de vista econômico, a prática da coleta seletiva de resíduos recicláveis, de forma que estes possam ser reaproveitados e ter um destino final alternativo ao aterro sanitário. A análise deste trabalho foi feita por meio do uso do aplicativo de roteamento de veículos ORTEC *Routing and Dispatch* (ORD), que visa apoiar esta tomada de decisão, sendo aplicado em um estudo de caso de uma empresa que realiza a coleta de resíduos sólidos provenientes de estabelecimentos comerciais no município do Rio de Janeiro, Brasil. Foi proposto um planejamento da coleta seletiva para que ela fosse implantada de forma gradativa de acordo com a conscientização da população abrangida pelo estudo de caso.

### **1.1. OBJETIVOS**

O objetivo principal desta dissertação é analisar, sob o ponto de vista econômico, a operação de coleta seletiva de resíduos recicláveis por meio da sua simulação em um



aplicativo de roteamento de veículos, considerando os horários de atendimento dos pontos a serem coletados e a quantidade de resíduos gerada em cada um destes pontos.

Os objetivos específicos são:

- Elaborar um planejamento da coleta seletiva de forma a atender todos os pontos de coleta avaliados no estudo de caso;
- Identificar as variáveis necessárias para a simulação da operação no aplicativo de roteamento de veículos ORD e preparar os dados de entrada para o mesmo;
- Realizar simulações no aplicativo de forma a representar os cenários de planejamento propostos;
- Comparar os resultados de cada cenário de planejamento, a fim de avaliar a viabilidade econômica de implantação desta operação; e
- Comparar também os resultados obtidos com os encontrados na literatura internacional, a partir de outros aplicativos de roteamento utilizados.

## **1.2. ESTRUTURA**

A partir da seção introdutória, este trabalho segue com o Capítulo 2 que apresenta um contexto da cadeia logística dos resíduos sólidos e suas características, além de apresentar um panorama do Brasil e especificamente do Rio de Janeiro, que é objeto do estudo de caso desta dissertação. Também neste capítulo são apresentados conceitos sobre o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo.

O Capítulo 3 apresenta todo o procedimento para a revisão bibliográfica sistemática, escolhida para este trabalho, assim como seus resultados. A seguir, o Capítulo 4 apresenta as características do aplicativo de roteamento de veículos escolhido para realizar as simulações do planejamento da coleta seletiva proposta.

O estudo de caso é apresentado no Capítulo 5, seguido do Capítulo 6 que faz a apresentação e análise dos resultados obtidos com as simulações no aplicativo a partir dos dados de entrada do estudo de caso.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões finais da dissertação e faz sugestões para trabalhos futuros.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO E CONCEITUAÇÃO

Este Capítulo tem como objetivo apresentar a contextualização e problematização da área de estudo deste trabalho, indicando suas principais características.

### 2.1. CADEIA LOGÍSTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Primeiramente é apresentada a definição de resíduos sólidos e o tipo de resíduo que é considerado neste trabalho, segundo sua classificação estabelecida pela Lei Federal 12.305/2010, que define os resíduos sólidos como sendo o “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010).

Segundo a LEI nº 12.305/2010, os resíduos sólidos são classificados quanto à sua origem da seguinte forma:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos (RSU): os englobados nas alíneas “a” e “b”, podendo ser aplicada, dentre outras, a subdivisão:
  - ix - o resíduo que possa ser tipificado como domiciliar produzido em estabelecimentos comerciais, de serviços ou unidades industriais ou instituições/entidades públicas ou privadas ou unidades de trato de saúde humana ou animal ou mesmo em imóveis não residenciais, cuja natureza ou composição sejam similares àquelas do lixo domiciliar e cuja produção esteja limitada ao volume diário, por contribuinte, de 120 litros ou 60 quilogramas; e
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os resíduos de limpeza urbana, os resíduos de serviços públicos de saneamento básico, os resíduos de serviço de saúde, os resíduos de construção civil e os resíduos de serviços de transporte.

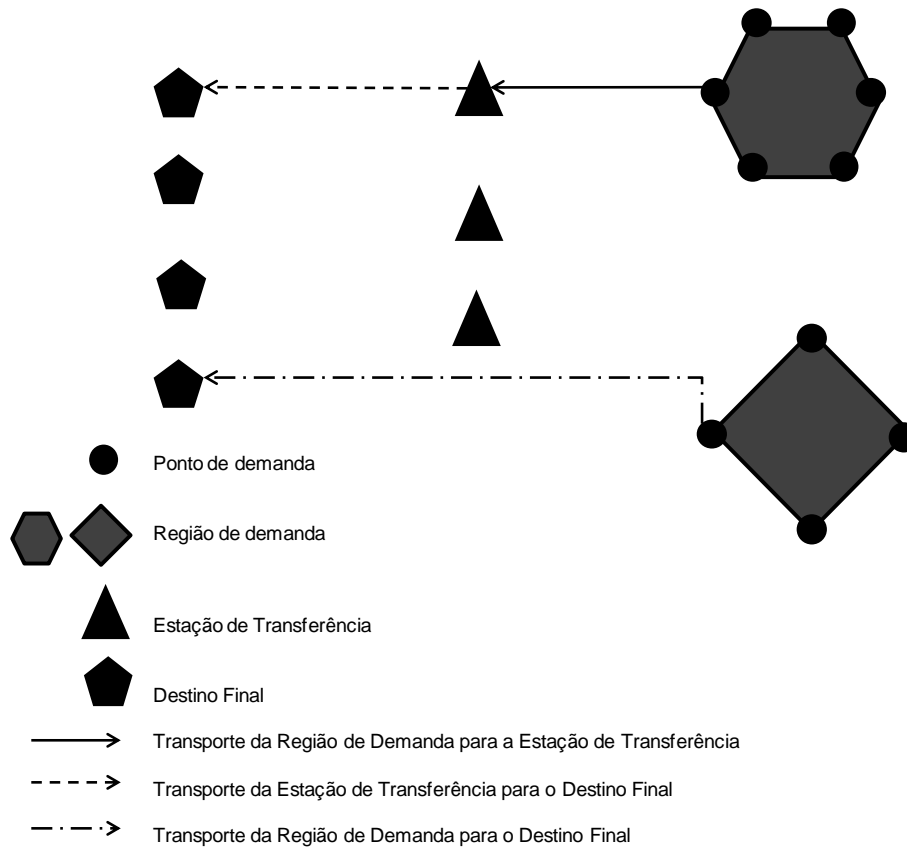
De acordo com o Ministério das Cidades, agências públicas são responsáveis pela administração e gerenciamento dos resíduos sólidos municipais (SNIS, 2016). De acordo com o SNIS (2016), 94,1% do total de municípios do país apresentam órgãos públicos como gestores do manejo de resíduos sólidos urbanos, seguidas pelas empresas públicas, com um índice de 3,2%, pelas autarquias, com 2,0% e, por último, pelas sociedades de economia mista com administração pública, cujo resultado não chega a atingir 1,0%. O SNIS (2016) conclui também que, à medida que cresce o porte populacional do município, diminui a incidência da administração pública direta como órgão gestor do manejo de resíduos sólidos nos municípios brasileiros. Por conseguinte, sobe a incidência de outros tipos de organização, sobretudo as autarquias e, em menor escala, as empresas públicas e as sociedades de economia mista. Porém, é comum observar que essas entidades públicas não possuem toda a infraestrutura necessária para realizar as atividades que o gerenciamento de resíduos contempla. Desta forma, o setor público concede um credenciamento às empresas privadas para que estas possam realizar o serviço de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos, além de operar as estações de transferência e destinos finais dos resíduos. O SNIS (2016) atesta que, de forma geral, a receita arrecadada com os serviços de manejo de resíduos sólidos nos municípios mostra-se insuficiente para manter todas as atividades necessárias.

Especificamente no caso do município do Rio de Janeiro, a Lei municipal N° 3273/2001 prega que todos os estabelecimentos comerciais que, por um lado possuem as mesmas características apresentadas no subitem “c-ix” e que, por outro, produzem uma quantidade de resíduos maior que 120 l ou 60 kg por dia, deve contratar uma empresa privada para realizar a coleta dos mesmos. Estes resíduos recebem o nome de “extraordinário” e são o foco deste trabalho.

Como já mencionado, outro importante conceito é o gerenciamento de resíduos sólidos que, segundo a Lei nº 12.305/2010, é definido como 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”. Tanto o plano municipal de gestão integrada quanto o plano de gerenciamento de resíduos sólidos são instrumentos na PNRS.

As etapas que compõem o gerenciamento de RSU são elementos da cadeia logística existente no país. Desta forma, a cadeia se divide em regiões de demanda, que são as

áreas de geração dos resíduos; as estações de transferência, que são pontos intermediários na cadeia; e os destinos finais, que são os receptores finais dos resíduos, que farão seu tratamento e transformação final. Tais componentes estão ilustrados na Figura 2.1, sendo que as quantidades de cada componente variam para cada local de estudo.



**Figura 2.1.** Componentes da cadeia logística de RSU

A operação de coleta de resíduos compreende toda a região de demanda que os destina diretamente aos receptores finais ou então aos receptores intermediários da cadeia, que são as estações de transferência. Estas, segundo o IBAM (2001), surgem com o objetivo de combater:

- o atraso nos roteiros de coleta, o que leva ao aumento da exposição dos resíduos nas ruas;
- o aumento do tempo improdutivo dos trabalhadores à espera do retorno do veículo que foi descarregar os resíduos no aterro;
- o aumento do custo de transporte;
- a redução da produtividade dos caminhões de coleta; e

- o alto custo para a implantação de aterros em áreas urbanas, além da não aceitação da população.

Desta forma, as estações de transferência são unidades instaladas próximas ao centro de massa da geração de resíduos para que os caminhões de coleta, depois de cheios, façam a descarga e retornem rapidamente para complementar o roteiro de coleta. Normalmente as estações de transferência são implantadas quando a distância entre o centro de massa da coleta e o aterro sanitário é superior a 25 km. Então, o transporte para o aterro sanitário dos resíduos descarregados nas estações de transferência é feito por veículos de maior porte e de menor custo unitário de transporte (IBAM, 2001)

Por outro lado, na cadeia de logística dos resíduos recicláveis, os resíduos são previamente segregados conforme sua constituição ou composição para sua coleta nas regiões de demanda (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012). Neste caso, os pontos intermediários são estações de triagem e separação dos materiais coletados. Nelas ocorre a separação dos recicláveis por tipo de material (vidro, plástico, papelão, metal, entre outros) e o beneficiamento dos mesmos para que eles possam ser encaminhados para as usinas de reciclagem (FERRI; CHAVES; RIBEIRO, 2015). Já a fração orgânica dos resíduos deve ser separada da fração reciclável na sua geração, pois ela terá uma coleta diferenciada, pois será encaminhada diretamente para o seu tratamento por um processo de compostagem ou para o aterro sanitário.

A coleta seletiva dos resíduos recicláveis no Brasil pode ser realizada por órgãos públicos locais, por empresas privadas, por cooperativas de catadores e ainda por comerciantes que fazem o intermédio da sua venda para as empresas recicladoras. As empresas trabalham visando o lucro com a revenda destes materiais, ao contrário das cooperativas, que recebem doações. A coleta seletiva pode ser realizada porta-a-porta, por caminhões específicos para este tipo de operação, ou por pontos de entrega voluntária de resíduos (PEV), em que o próprio gerador encaminha os resíduos recicláveis para um ponto específico onde será triado (FERRI; CHAVES; RIBEIRO, 2015). Assim, o PEV é um ponto intermediário na cadeia, aonde ocorrerá a triagem dos resíduos, ou então o modelo de coleta porta-a-porta encaminhará os resíduos, após serem coletados, também para um ponto intermediário de coleta.

Em relação aos aspectos da cadeia dos resíduos recicláveis, alguns fatores influenciam o seu crescimento em países em desenvolvimento, como as políticas públicas, ações de financiamento do governo, a caracterização e segregação dos resíduos, educação ambiental e conscientização da população e toda a administração

do gerenciamento dos resíduos, para que ocorra de forma estruturada e organizada. Além disso, o acesso restrito a novas tecnologias de tratamento dos resíduos além do alto custo da cadeia como um todo também são fatores que dificultam o crescimento do setor no país (FERRI; CHAVES; RIBEIRO, 2015).

Por fim, em relação aos destinos finais possíveis para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos, o mais utilizado no Brasil é o aterro sanitário. Um aterro sanitário conta necessariamente com os seguintes processos (IBAM, 2001):

- impermeabilização de fundo (obrigatória) e superior (opcional);
- sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (chorume);
- sistema de coleta e queima (ou beneficiamento) do biogás (gás metano);
- sistema de drenagem e afastamento das águas pluviais; e
- sistemas de monitoramento ambiental, topográfico e geotécnico.

Existem também os chamados aterros controlados que são antigas áreas de lixões, locais onde os resíduos eram depositados diretamente no solo e sem nenhum controle dos impactos ambientais, mas que foi recuperado. A única diferença básica para os sanitários é que os controlados não contam com a coleta e tratamento do chorume, assim como a drenagem e queima do biogás.

Caso haja a separação dos resíduos recicláveis dos orgânicos, é necessário tratar os dois tipos de resíduo separadamente. Os orgânicos podem receber o tratamento de compostagem, que é a decomposição biológica de materiais, de origem animal e vegetal, pela ação de microrganismos. Para que ele ocorra não é necessária a adição de qualquer componente físico ou químico à massa de resíduos. A compostagem pode ser aeróbia ou anaeróbia, em função da presença ou não de oxigênio no processo. Vale ressaltar que existe também uma fração de rejeitos que deve ser considerada na composição gravimétrica dos resíduos. Esta fração é de embalagens e outros tipos de materiais que não puderam ser reaproveitados pela reciclagem e, por isso, não são segregados da fração orgânica.

No processo anaeróbio, a decomposição é realizada por microrganismos que podem viver em ambientes sem a presença de oxigênio; ocorre em baixa temperatura, com exalação de fortes odores, e leva mais tempo até que a matéria orgânica se estabilize. Na compostagem aeróbia, a decomposição é realizada por microrganismos que só vivem na presença de oxigênio. A temperatura pode chegar a até 70°C, os odores emanados não são agressivos e a decomposição é mais veloz. Neste processo os

resíduos orgânicos têm como produto final o composto orgânico, um material rico em húmus e nutrientes minerais, que pode ser utilizado na agricultura como condicionador de solos, tendo algum potencial fertilizante (IBAM, 2001).

E para os resíduos recicláveis o processo de tratamento é a reciclagem, que consiste na transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do SISNAMA e, se couber, do SNVS e do SUASA (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012). Esses resíduos são previamente separados do resíduo orgânico pelo gerador, mas todos os tipos de materiais são acondicionados em conjunto. Então, no processo de triagem, cada tipo de material é separado um do outro a partir da sua disposição em esteiras. Eles podem ser separados manualmente, por catadores, ou por equipamentos eletromecânicos, conseguindo-se em geral uma eficiência de apenas 3 a 6% em peso, dependendo do tamanho e do grau de sofisticação tecnológica da usina (IBAM, 2001). Posteriormente a essa triagem, os materiais são agrupados ou prensados em fardos para serem enviados às usinas de reciclagem, que realmente farão a transformação físico-química do material.

Portanto, o presente trabalho considera a cadeia logística dos resíduos extraordinários, provenientes de estabelecimentos comerciais, para os cenários com e sem a coleta seletiva dos resíduos recicláveis. Foi utilizada, como estudo de caso, a operação de coleta destes resíduos no município do Rio de Janeiro. Sendo assim, as duas próximas seções apresentam panoramas do Brasil e do Rio de Janeiro, a fim de caracterizar esta região de estudo.

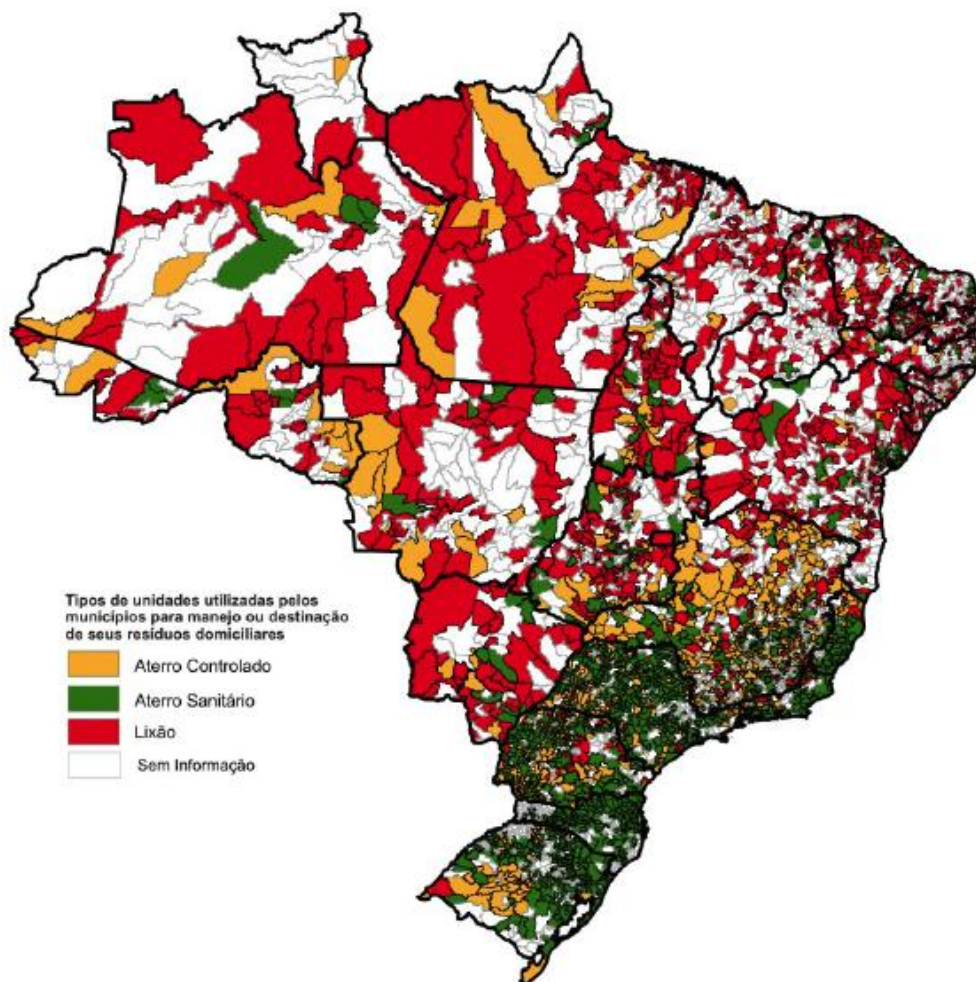
## **2.2. PANORAMA DO BRASIL**

Segundo a ABRELPE (2015), a geração total de resíduos sólidos urbanos no Brasil, em 2015 foi de aproximadamente 72,5 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 1,7% em relação ao ano anterior. Este índice é superior à taxa de crescimento populacional do país no período, que foi de 0,9%. Houve um aumento de 1,8% no total de RSU coletado em 2014 relativamente a 2015. A comparação deste índice com o crescimento da geração de RSU mostra uma discreta evolução na cobertura dos serviços de coleta de RSU.

Em relação à disposição de RSU, o SNIS (2016) indica que 52,0% do total de resíduos coletados foram destinados, em 2014, a aterros sanitários. Os aterros controlados são

a segunda forma de disposição mais utilizada, com 13,1%, seguidos pelos lixões, com a expressiva participação de 12,4%. As unidades de triagem e compostagem receberam, respectivamente, 2,5% e 0,4% do total de resíduos coletados no país. O relatório ainda aponta que 19,6% não informaram o tipo de disposição utilizada. Porém, ABRELPE (2015) atenta para 3.326 municípios que ainda fazem uso de unidades inadequadas de destino final, como lixões e aterros controlados.

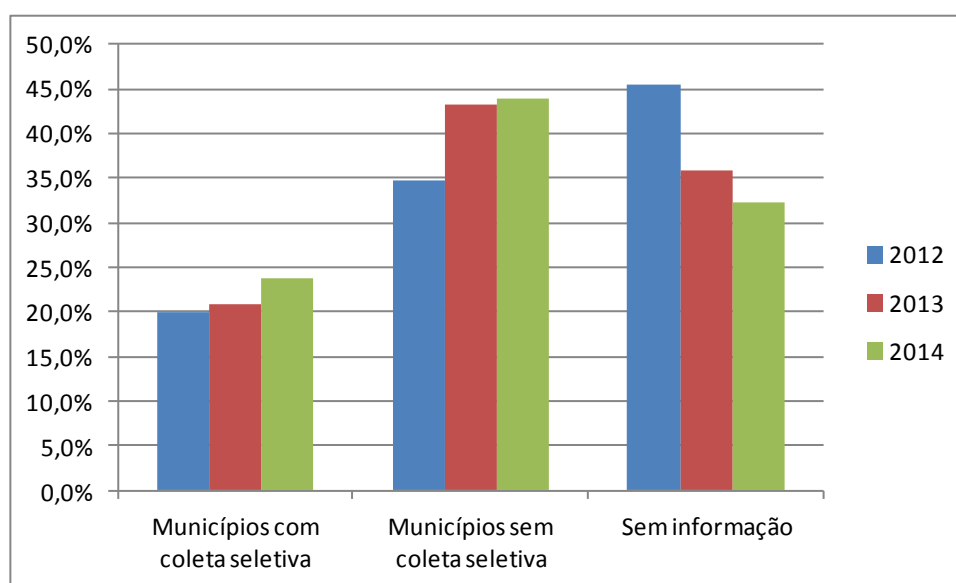
A Figura 2.2 representa espacialmente os tipos de destinos finais utilizados por cada município do país. A partir desta figura é possível observar que as regiões norte, nordeste e centro-oeste apresentam ainda uma incidência grande de lixões como forma de destino final dos resíduos coletados, enquanto que nas regiões sul e sudeste prevalece o uso de aterro sanitários.



**Figura 2.2.** Tipos de destino final utilizados no Brasil, por município  
Referência: SNIS (2016).



O SNIS (2016) apurou também que a coleta seletiva dos resíduos recicláveis é praticada em 1.322 dos 3.765 municípios considerados na pesquisa, o que representa 35,1% deste universo. O resultado quanto à existência de coleta seletiva nos municípios, independente da forma (porta-a-porta, em PEVs ou outra modalidade) ou da abrangência em cada município, é representado na Figura 2.3. Curiosamente pode-se observar que, mesmo com o aumento da quantidade de municípios com coleta seletiva, houve o aumento de municípios sem coleta seletiva, dado que a quantidade de municípios sem informação foi menor nesses anos.

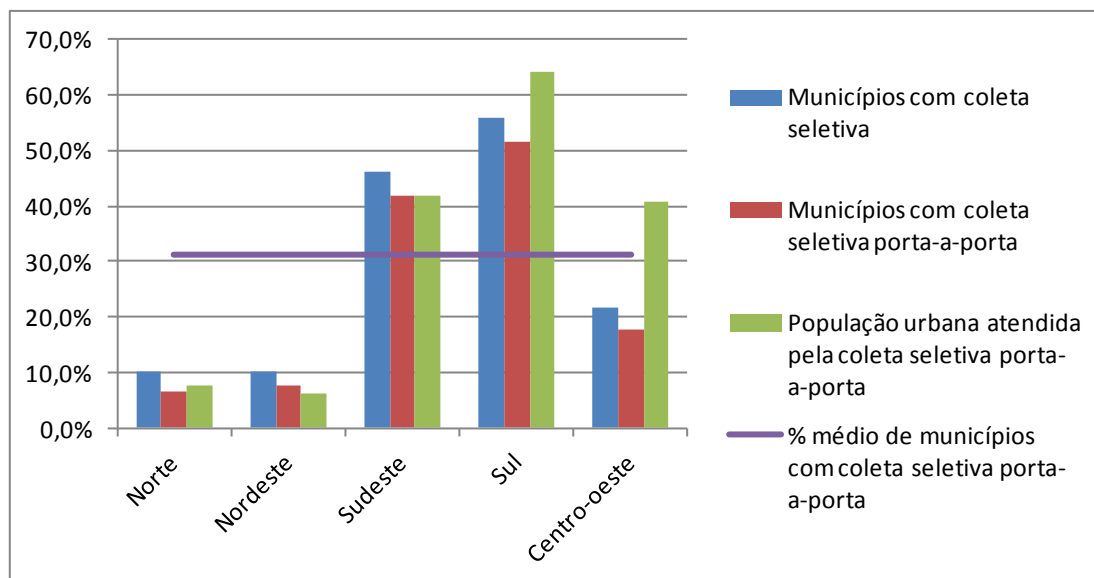


**Figura 2.3.** Evolução do índice de ocorrência do serviço de coleta seletiva  
Referência: Com base em SNIS (2016).

Agregando valor aos índices de quantidade de municípios com coleta seletiva porta-a-porta, verifica-se que 1.178 municípios disponibilizam o serviço a uma população urbana de 52 milhões de habitantes, o que representa 35,3% do total pesquisado (3.765 municípios) ou 30% da população urbana do país (SNIS, 2016). A Figura 2.4 apresenta os tipos de coleta seletiva observados por cada região do Brasil.

Por fim, o SNIS (2016) apresenta ainda a quantidade de resíduos recicláveis coletada segundo cada ator responsável, sendo que 43,5% da quantidade total de resíduos no país foi coletada por catadores com apoio da prefeitura, 37,8% por empresas contratadas pela prefeitura e 18,7% diretamente pela prefeitura. De toda essa quantidade coletada, a Região Sul é a região em que mais foi possível recuperar os resíduos recicláveis, ou seja, tratá-los (15,8 kg/hab/ano em 2014). A Região Centro-

Oeste apresenta a segunda maior recuperação, com 7,7 kg/hab/ano, seguida do Sudeste, com 4,4 kg/hab/ano e do Norte, com 4,1 kg/hab/ano.



**Figura 2.4.** Ocorrência do serviço de coleta seletiva e populações correspondentes, segundo região geográfica  
Referência: SNIS (2016).

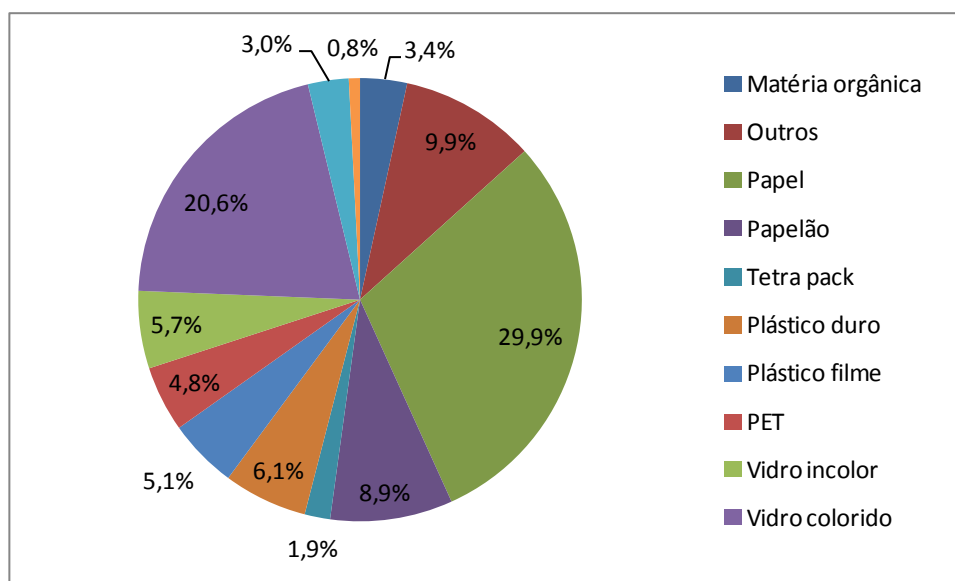
### 2.3. PANORAMA DO RIO DE JANEIRO

Segundo a PREFEITURA MUNICIPAL (2012), no município do Rio de Janeiro verifica-se que 4.777 toneladas de resíduos domiciliares são coletados por dia, correspondendo a 49,4% do total de resíduos coletados. Seguindo do domiciliar, a PREFEITURA MUNICIPAL (2012) também constata que o segundo maior tipo de resíduo coletado pelo município é o público, com 3.139 t/dia (32,5%) . Os resíduos oriundos de grandes geradores, que são considerados os resíduos extraordinários emitidos pelos estabelecimentos comerciais, apresentam uma participação de 1.155 t/dia, ou seja, 11,9% do total coletado. Por fim, os outros 6,2% dos resíduos coletados pela Prefeitura Municipal são oriundos do serviço de remoção gratuita, emergência e os resíduos de serviço de saúde, além de outros não identificados (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012).

Já o Diagnóstico Preliminar de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012) indica que em torno de 133,20 t/dia são coletados por empresas privadas em shoppings, 195,00 t/dia são coletados no setor hoteleiro e 200,00 t/dia são coletados em supermercados. Desta forma, o município totaliza uma

quantidade de 9.666 t/dia de resíduos coletados, provenientes de estabelecimentos comerciais (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012).

Em relação à composição gravimétrica dos resíduos gerados pelo município do Rio de Janeiro, o resíduo orgânico possui uma grande participação (52,7% do total de resíduos sólidos urbanos gerados). Já os resíduos recicláveis possuem uma participação de 40,9%. Da totalidade de materiais recicláveis presente no lixo domiciliar, o plástico nas suas diferentes formas (PVC, PET, PE, dentre outras) e o papel papelão respondem por mais de 80% desses materiais, como mostra a Figura 2.5.

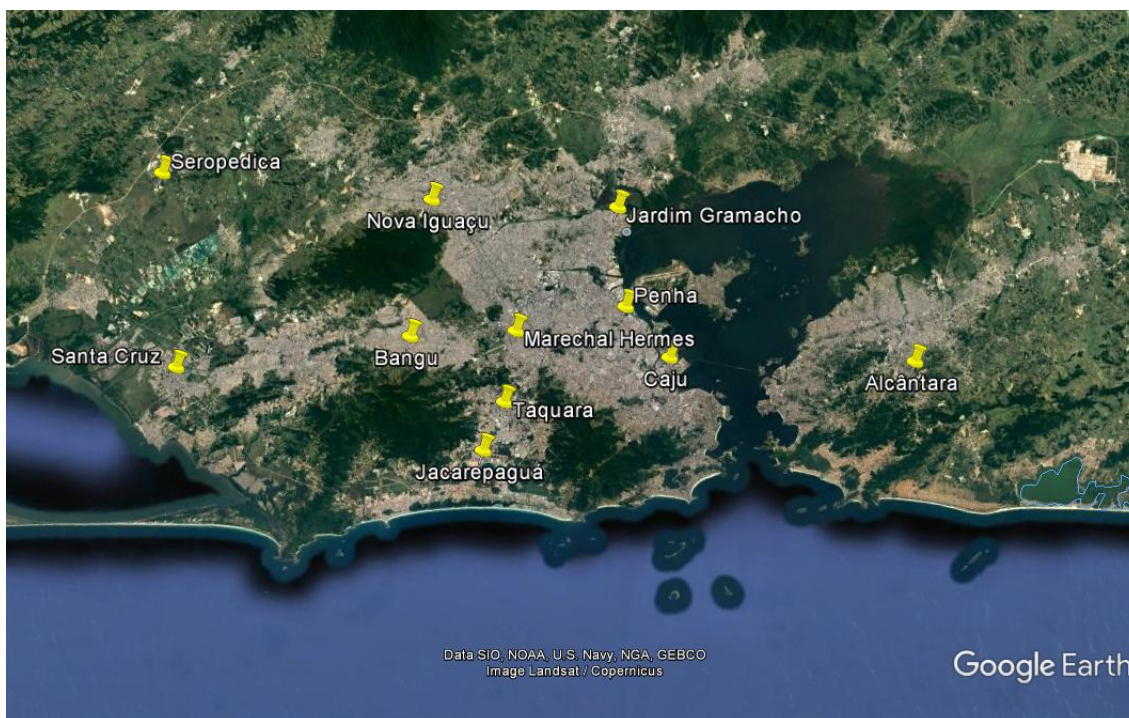


**Figura 2.5.** Resíduos potencialmente recicláveis registrados pela coleta seletiva municipal

Referência: PREFEITURA MUNICIPAL (2015)

O total de resíduos coletados sem separação é destinado adequadamente pelo Poder Público Municipal às estações de transferência localizadas em Santa Cruz (com a movimentação de 1.094 t/dia), Bangu (1.832 t/dia movimentadas), Penha (1.458 t/dia movimentadas), Caju (movimentação de 3.281 t/dia), além de Marechal Hermes, Taquara e Jacarepaguá com 729 t/dia movimentadas em cada um. O aterro sanitário municipal está localizado em Seropédica, com 220 hectares e recebe 9.843 toneladas por dia (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012). Existem também estações de transferência e aterro municipais operados por empresas privadas e que estão localizadas em torno de toda a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, como é o caso da estação de transferência em Jardim Gramacho e o aterro sanitário em Nova Iguaçu e Alcântara. A

Figura 2.6 apresenta a localização de todas essas estações de transferência e aterros mencionados.



**Figura 2.6.** Localização das estações de transferência e aterros sanitários  
Fonte: adaptado do Google Earth

Por outro lado, o Programa de Coleta Seletiva Solidária da Prefeitura, criado pelo Decreto Municipal nº 30.624/2009, destina atualmente materiais recicláveis, separados nas unidades da administração municipal, às cooperativas e associações de catadores, com perspectivas de crescimento das mesmas (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012).

Os grandes atacadistas, que compram os resíduos recicláveis de pequenas empresas, cooperativas e associações de catadores, são os responsáveis pela destinação, direta ou após beneficiamento, às usinas de reciclagem, cuja grande maioria está estabelecida fora do município e, em muitos casos, fora do estado do Rio de Janeiro. A PREFEITURA MUNICIPAL (2015) identificou que o equivalente a 1.000 t/dia de material foi enviado para reciclagem em 2014. Foram identificadas 47 empresas receptoras de materiais recicláveis, devidamente regularizadas junto ao Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica. Das 47, existem no município 31 empresas cadastradas que processam 2.596 t/mês, além de processarem 16.341 l/mês de óleo residual de fritura e 96 t/mês de madeira (PREFEITURA MUNICIPAL, 2015).

Por fim, a Prefeitura Municipal realiza o processo de compostagem do resíduo orgânico na Usina do Caju, gerando o composto orgânico FERTILURB. Este produto vem sendo empregado nas ações de reflorestamento na cidade, dentro do Programa de Reflorestamento e Preservação de Encostas do Município. Grandes geradores do ramo de hortifrutigranjeiros destinam os resíduos orgânicos diretamente à Usina do Caju (PREFEITURA MUNICIPAL, 2012).

A seção a seguir apresenta conceitos relacionados à operação de coleta de resíduos que, por sua vez, é representada pelo clássico problema de roteamento de veículos (PRV). As coletas podem ser realizadas em arcos (por exemplo, segmentos viários de um município) ou em vértices (por exemplo, restaurantes). O roteamento baseado em arcos é bastante comum em operações de coleta e envolve, basicamente, o deslocamento de caminhões ao longo das via para realizar a coleta dos resíduos (LONGO, 2004). Já o roteamento baseado em vértices considera que os clientes, ou seja, os pontos de demanda, estejam distribuídos em locais específicos da rede viária, que é o caso do presente estudo.

#### **2.4. PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS**

Segundo NOVAES (2007), um problema real de roteamento de veículos (PRV) é definido por três fatores fundamentais: decisões, objetivos e restrições. As decisões dizem respeito à alocação de um grupo de clientes, que devem ser visitados por um conjunto de veículos e seus respectivos motoristas, envolvendo também a programação e o sequenciamento das visitas. Como objetivos principais, o processo de roteamento visa propiciar um bom nível de serviço aos clientes, mas ao mesmo tempo mantendo os custos operacionais e de capital tão baixos quanto possível. Por outro lado, deve obedecer a certas restrições como as capacidades dos veículos, os limites de tempo impostos pela jornada de trabalho dos motoristas e ajudantes e as restrições de tráfego, no que se refere às velocidades máximas, horários de carga/descarga, tamanho máximo dos veículos nas vias públicas, entre outros.

Desta forma, o PRV consiste em definir roteiros de veículos que minimizem o custo total de atendimento, cada um dos quais iniciando e terminando no depósito ou base dos veículos, assegurando que cada ponto seja visitado exatamente uma vez e que a demanda em qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende (CUNHA, 2000). O objetivo é minimizar o custo total, definido pela soma dos custos de cada rota gerada (VIEIRA, 2013).

Um dos primeiros trabalhos sobre o PRV foi denominado PRV Capacitado (PRVC), em que os clientes possuem demandas determinísticas, ou seja, conhecidas previamente, e que devem ser atendidas integralmente por apenas um veículo. Todos os veículos são semelhantes e partem de um único depósito. Somente a restrição de capacidade é imposta ao problema, ou seja, a soma das demandas de todos os clientes pertencentes a uma rota não deve superar a capacidade do veículo a ela designado. Este problema não é capaz de representar todas as situações cotidianas enfrentadas na prática. Assim, faz-se necessário introduzir algumas restrições associadas aos clientes, aos veículos ou aos depósitos, como por exemplo (VIEIRA, 2013):

- diferentes tipos de produtos;
- apenas um determinado subconjunto dos veículos pode ser utilizado para um dado conjunto de clientes, em função de limitações de acesso ou do tipo de mercadoria transportada;
- o serviço de carregamento ou descarregamento das mercadorias deve ser executado em um tempo predefinido; e
- a entrega dos produtos deve ser feita em um período determinado, de maneira a respeitar os horários de funcionamento de seus estabelecimentos, as limitações de tráfego e os prazos de entrega exigidos.

Os veículos, por sua vez:

- podem ser de diferentes tipos ou possuírem capacidades diferentes;
- podem ser subdivididos em compartimentos, permitindo o transporte de diferentes produtos em diversas quantidades; e
- podem suportar um tempo máximo de operação, antes de serem submetidos à revisão.

Com o avanço dos estudos sobre o PRV, surgiu o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (PRVJT), que é uma especialização do PRVC. O PRVJT associa a cada cliente um período de tempo no qual um veículo deve atendê-lo. A esse intervalo dá-se o nome de janela de tempo. Como o problema de coleta de resíduos apresentado nesta dissertação apresenta as características básicas do PRVJT, optou-se por apresentar a formulação matemática do PRVJT, a fim de consolidar o seu entendimento.

Como no PRVC, o PRVJT é representado por um grafo  $G = (V, A)$ , em que  $A$  é o conjunto de arcos e  $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$  é o conjunto de vértices. O vértice 0 indica o

depósito, enquanto os demais vértices representam os clientes, sendo assim, seja  $P = \{1, 2, \dots, n\}$  o conjunto de todos os clientes. Cada cliente  $i \in P$  possui:

- demanda  $m_i$ ;
- tempo de serviço  $s_i$ ; e
- janela de tempo  $[e_i, l_i]$  sendo  $e_i$  o instante de início da janela de tempo e  $l_i$  o instante de término da janela de tempo.

O depósito também possui uma janela de tempo  $[e_0, l_0]$  que determina o momento a partir do qual os veículos podem começar a trafegar ( $e_0$ ) e o horário limite para o retorno de todos eles ( $l$ ). Por último, seja  $K$  o conjunto de todos os veículos sendo que cada um possui capacidade  $C$ .

O objetivo do problema é a minimização do custo total de transporte que, usualmente, é representado pela distância total percorrida, sendo assim, seja  $c_{ij}$  a distância entre os vértices  $i \in V$  e  $j \in V$ .

Em termos de variáveis de decisão, seja  $X_{ijk} \in \{0, 1\}$  uma variável binária que se  $X_{ijk} = 1$ , o veículo  $k \in K$  deve se deslocar do vértice  $i \in V$  para o vértice  $j \in V$ , caso contrário,  $X_{ijk} = 0$ . Por outro lado, a variável  $B_i \geq 0$  indica o início do atendimento ao cliente  $i \in P$ . Com as definições apresentadas, o modelo matemático do PRVJT é apresentado a seguir (VIEIRA, 2013):

**Minimizar:**

$$\sum_{i \in V} \sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} \sum_{k \in K} c_{ij} X_{ijk} \quad (2.1)$$

**Sujeito a:**

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in P} X_{0jk} \leq |K| \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in P} X_{0jk} = \sum_{j \in P} X_{j0k} \leq 1, \quad k \in K \quad (2.3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} X_{ijk} = 1, \quad i \in P \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ijk} - \sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} X_{jik} = 0, \quad k \in K, i \in P \quad (2.5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in S} \sum_{\substack{j \in S \\ j \neq i}} X_{ijk} \leq |S| - v(S), \quad \forall S \subseteq P, |S| \geq 2 \quad (2.6)$$

$$\sum_{i \in P} m_i \sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} X_{ijk} \leq C, \quad k \in K \quad (2.7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} X_{ijk} (B_i + s_i + t_{ij}) \leq B_j, \quad j \in P \quad (2.8)$$

$$e_i \leq B_i \leq l_i, \quad i \in V \quad (2.9)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i \in V, j \in V \setminus j \neq i, \quad k \in K \quad (2.10)$$

A função objetivo (2.1) busca minimizar a distância percorrida. A Restrição (2.2) garante que no máximo  $|K|$  veículos deixarão o depósito, enquanto que as Restrições (2.3) asseguram que cada rota tenha início e fim no depósito. As Restrições (2.4) e (2.5) garantem que cada cliente seja visitado uma única vez e que, após ser atendido, o veículo deve deixá-lo. As Restrições (2.6) evitam que seja criado um subciclo que não inclua o depósito, sendo que  $v(S)$  representa o número mínimo de veículos necessário para atender o conjunto de clientes  $S \subseteq P$ . Por exigir que o número de veículos usados para atender os clientes do conjunto  $S$  não seja inferior a  $v(S)$ , que é o mínimo necessário, as Restrições (2.6) asseguram, indiretamente, que a capacidade dos veículos não seja violada. Entretanto, para dar maior clareza à formulação do problema, as Restrições (2.7) explicitam a restrição da capacidade dos veículos.

Já as Restrições (2.8) relacionam o instante de início do atendimento de dois clientes visitados consecutivamente por um mesmo veículo. Ela evita que o intervalo entre os instantes de início do atendimento desses clientes seja inferior à soma do tempo gasto no atendimento do primeiro cliente com o tempo necessário para a viagem entre os dois clientes. A folga de tempo apresentada nesta restrição corresponde ao tempo de espera do veículo que atende o cliente  $j \in P$ , ou seja, o tempo decorrido entre o instante de chegada do veículo ao endereço do cliente e o início do atendimento de fato. Por sua vez, as Restrições (2.9) impedem que o início do atendimento de um cliente ocorra fora da sua janela de tempo. Por fim, as Restrições (2.10) garantem o domínio das variáveis de decisão.



O PRVJT é conhecido por ser da classe *NP-Hard*, ou seja, possui complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução exata cresce exponencialmente com o tamanho do problema (dado pelo número de pontos a serem atendidos). Em termos práticos, isto significa que não é possível encontrar a solução ótima de problemas reais, pertencentes à classe *NP-Hard* (CUNHA, 2000; LAPORTE, 2009).

Conseqüentemente, os métodos de solução da maioria dos aplicativos comerciais encontrados no mercado para roteamento de veículos são heurísticos ou meta-heurísticos, isto é, não asseguram a obtenção da solução ótima do ponto de vista matemático. Essa complexidade matemática dos problemas de roteamento, assim como a sua relevância no contexto logístico atual, explicam o constante interesse em busca de novas estratégias de solução. Muitas vezes as heurísticas se apoiam em uma abordagem intuitiva, na qual a estrutura particular do problema possa ser considerada e explorada de forma inteligente, para a obtenção de uma solução adequada (CUNHA, 1997; LAPORTE, 2009). Daí, em muitos casos, há a necessidade de buscar soluções personalizadas para cada problema (CUNHA, 2000).

As heurísticas podem ser divididas em algoritmos de construção e de refinamento. As heurísticas de construção são aquelas que geram uma solução viável (que respeita as restrições) passo a passo. A geração da solução viável pode ser feita tanto de forma sequencial, ou seja, construindo uma rota por vez, como em paralelo, construindo várias rotas simultaneamente. As heurísticas de refinamento nada mais são que técnicas de busca local, tendo como objetivo melhorar uma dada solução por meio da exploração de sua vizinhança (LAPORTE, 2009). Assim como as heurísticas, as meta-heurísticas têm como objetivo explorar apenas parte do espaço solução. Elas englobam as estratégias e técnicas mais recentes e avançadas, não tradicionais, que são baseadas em sistemas especialistas, métodos de busca e, principalmente, procedimentos iterativos com alguma inteligência no processo de busca, para explorar de maneira mais inteligente as regiões mais promissoras do espaço de soluções.

Nos últimos anos, novos algoritmos vêm sendo desenvolvidos para solucionar o problema de roteamento de veículos de uma forma geral. Segundo CORDEAU *et al.* (2008), as melhores metodologias de solução utilizam métodos exatos como o *branch-and-cut* e o *branch-and-cut-and-price*. Seu sucesso está atrelado ao uso de inequações válidas e ao desenvolvimento de procedimentos de separação eficientes.

Os algoritmos mais populares para esse tipo de problema se baseiam no modelo de geração de colunas (CORDEAU *et al.*, 2008)

Novas heurísticas e meta heurísticas também vêm surgindo com uma série de novas técnicas como o *tabu search*, *simulated annealing*, *variable neighbourhood search* e *large neighbourhood search*. Seu desenvolvimento depende do projeto de mecanismos de busca inteligentes (CORDEAU *et al.*, 2008).

## **2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foi apresentada a contextualização do setor de resíduos sólidos no Brasil e especificamente no Rio de Janeiro, que é o local de estudo deste trabalho. Também foram apresentados os conceitos abordados nesta dissertação e suas características, como a cadeia logística do RSU e o PRVJT, que é o problema que representa satisfatoriamente a operação de coleta de resíduos, objeto de estudo desta dissertação. Este tipo de problema vem sendo muito estudado atualmente, tanto no caso de coleta de mercadorias quanto para entrega, e cada vez mais novos algoritmos vêm sendo desenvolvidos. Como este trabalho visa utilizar o PRVJT como uma ferramenta para analisar, sob o ponto de vista econômico, a operação de coleta seletiva dos resíduos recicláveis, a próxima seção apresenta a revisão bibliográfica sistemática para o uso de aplicativos disponíveis que empregam o PRVJT.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo NOVAES (2007), existe no mercado um número razoável de aplicativos computacionais de roteamento, que ajudam as empresas a planejar e programar os serviços de distribuição física. Eles utilizam tecnologias que vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas como a conexão direta com a Internet. Também diversos aplicativos de roteamento utilizam sistemas de comunicação de dados sem fio (*wireless data communication*) e meta-heurísticas para obtenção das rotas. Segundo Hall (2006), a palavra-chave nos sistemas de roteamento de veículos é a integração como, por exemplo, os módulos para previsão das entregas, para planejamento da utilização das docas nos depósitos, para programação das equipes de carga/descarga etc. integrados com o aplicativo de roteamento e de alocação de veículos e tripulação.

Outra tendência é integrar o planejamento do serviço para mais de 24 horas e a execução das atividades de transporte dos clientes com as do operador, de modo a diminuir a ociosidade, reduzir custos e aumentar o nível de serviço (NOVAES, 2007).

CUNHA (2000) apresenta sinteticamente um conjunto de elementos para caracterização geral dos problemas de roteamento, que podem ser utilizados para a especificação dos atributos e requisitos de um aplicativo a ser adquirido ou de um modelo de roteamento a ser desenvolvido, que são:

- uma ou múltiplas bases;
- diferentes tipos de veículos;
- coletas e entregas;
- janelas de tempo;
- tempos de carga e descarga;
- velocidades variáveis;
- contratação de terceiros;
- limite de peso e volume;
- múltiplos compartimentos por veículo;
- duração máxima do roteiro;
- contabilização de horas extras;
- horários de início e término de viagem;
- roteiros com pernoite e troca de motoristas;
- locais de parada fixos;
- restrições de tamanho de veículo e equipamentos para um cliente;

- zonas de entrega e possibilidade de fracionamento de carga;
- barreiras físicas e restrições de circulação de veículos; e
- mais de um roteiro por veículo.

Em particular, no mercado brasileiro os aplicativos de roteamento disponíveis no mercado são Trucks, Truckstops, RoadShow e o RouteSmart, sendo todos esses desenvolvidos por empresas estrangeiras, além de alguns desenvolvidos localmente, como, por exemplo, o RotaCerta (CUNHA, 2000). Além destes, o aplicativo ORTEC também está sendo muito utilizado por empresas em todo o mundo para a otimização de processos como um todo, e inclusive para o PRV (ORTEC, 2017). A empresa avaliada no estudo de caso desta dissertação utiliza o aplicativo ORTEC em sua operação diária.

Muitos dos pacotes disponíveis no mercado brasileiro são bastante sofisticados em termos de recursos e que permitem considerar diversos tipos de restrições, e foram testados e validados em diferentes tipos de problemas. Por outro lado, sua implantação tem exigido, às vezes, investimentos e recursos significativos, além de tempo para a preparação de bases de dados e para treinamento para utilização, até que estejam em condições operacionais para a sua efetiva utilização no dia-a-dia das empresas (CUNHA, 2000).

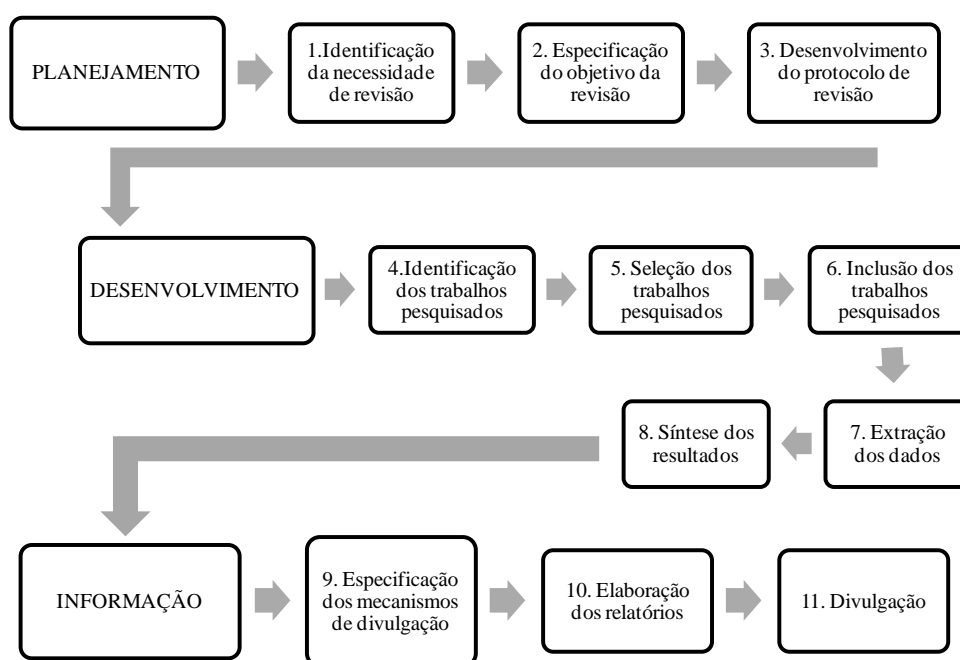
A partir dessas considerações, o presente trabalho fez um levantamento dos tipos de aplicativos utilizados para a coleta de resíduos sólidos por meio de uma revisão bibliográfica sistemática. Para Bereton (2007), uma revisão sistemática permite ao pesquisador uma avaliação rigorosa e confiável das pesquisas realizadas dentro de um tema específico. Ela procura identificar, avaliar e interpretar todos os trabalhos relevantes que possam satisfazer o objetivo do estudo, de forma a responder seus questionamentos relacionados a alguma área de pesquisa (Kitchenham, 2007).

Busca-se alcançar maior qualidade nas buscas e resultados da revisão bibliográfica, ou seja, compreender o “estado da arte” do assunto pesquisado. Para isso é necessário adotar um procedimento, ou seja, um conjunto de passos, técnicas e ferramentas específicas.

As razões que motivam a elaboração de uma revisão bibliográfica sistemática são (Kitchenham, 2007):

- Reunir as características, benefícios, limitações e novas informações de uma dada área de pesquisa existente;
- Reunir informações a respeito de uma área pouco exploradas na literatura; e
- Fornecer uma contextualização para novas pesquisas científicas.

Desta forma, a metodologia empregada nesta dissertação se baseia no guia para revisão bibliográfica sistemática apresentada pelo *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Aplicativo Engineering* (Kitchenham, 2007), que sugere as etapas a serem cumpridas pelo protocolo de pesquisa indicadas na Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Procedimento da revisão bibliográfica sistemática

Fonte: Adaptado de Kitchenham, 2007

Os processos de Identificação da necessidade de revisão, Especificação do objetivo da revisão e Desenvolvimento do protocolo de revisão, apresentados nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente, fazem parte da primeira etapa da revisão bibliográfica sistemática, que é o Planejamento da revisão. Já a segunda etapa, Desenvolvimento da revisão, considera os processos reunidos no protocolo Identificação, Seleção e Inclusão dos trabalhos, além dos processos de Extração dos dados e Síntese dos resultados. Essas etapas são apresentadas nas Seções 3.4 e 3.5, respectivamente. Por fim, a terceira e última etapa, Informação, visa a Especificação dos mecanismos de divulgação dos resultados, a Elaboração de relatórios e a Divulgação. Este Capítulo

e o presente trabalho, como um todo, é a própria esta última etapa da revisão bibliográfica sistemática.

### **3.1. IDENTIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE REVISÃO**

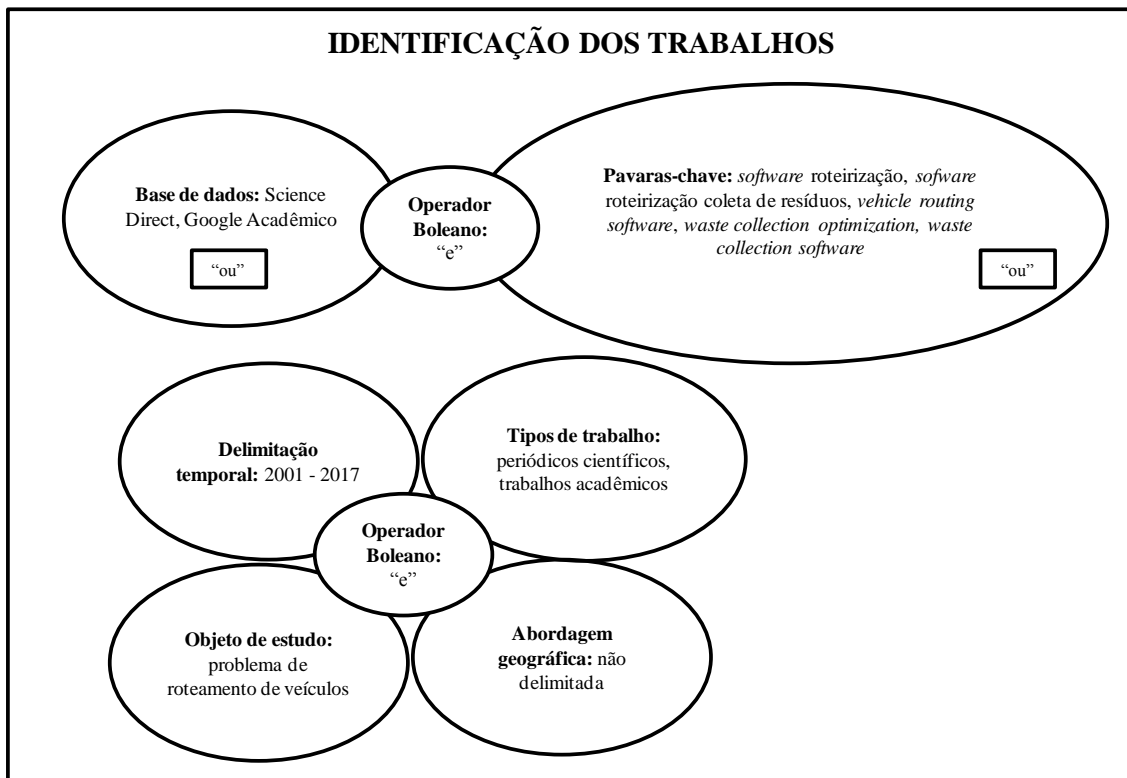
Esta dissertação propõe a implantação da operação de coleta seletiva de resíduos recicláveis e avalia este planejamento a partir das simulações dos cenários criados em um aplicativo de roteamento de veículos. Sendo assim, a revisão bibliográfica é de extrema importância no sentido de avaliar se a temática desta dissertação é discutida na literatura internacional e, em caso afirmativo, como ela é discutida.

### **3.2. ESPECIFICAÇÃO DO OBJETIVO DA REVISÃO**

O objetivo desta revisão bibliográfica sistemática é identificar o tipo de aplicação em cada um dos trabalhos reunidos e avaliar os resultados obtidos com o uso de aplicativos computacionais para a resolução do PRVJT, e especificamente seu emprego no gerenciamento de resíduos sólidos. Estes resultados serão comparados com os encontrados por meio do aplicativo escolhido por este trabalho, de forma a avaliar seu desempenho.

### **3.3. DESENVOLVIMENTO DO PROTOCOLO DE REVISÃO**

Os trabalhos mais relevantes encontrados na literatura brasileira e internacional, acerca da temática gerenciamento de resíduos sólidos, foram reunidos de acordo com o protocolo da revisão bibliográfica sistemática, indicado nas Figuras 3.2 e 3.3.



**Figura 3.2.** Etapa de Identificação dos trabalhos



**Figura 3.3.** Etapas de Seleção e Inclusão dos trabalhos

De acordo com a Figura 3.2, os estudos foram identificados na revisão bibliográfica sistemática a partir da busca em duas bases de dados escolhidas, dada sua abrangência e o volume de publicações, a *Science Direct* e o Google Acadêmico. A

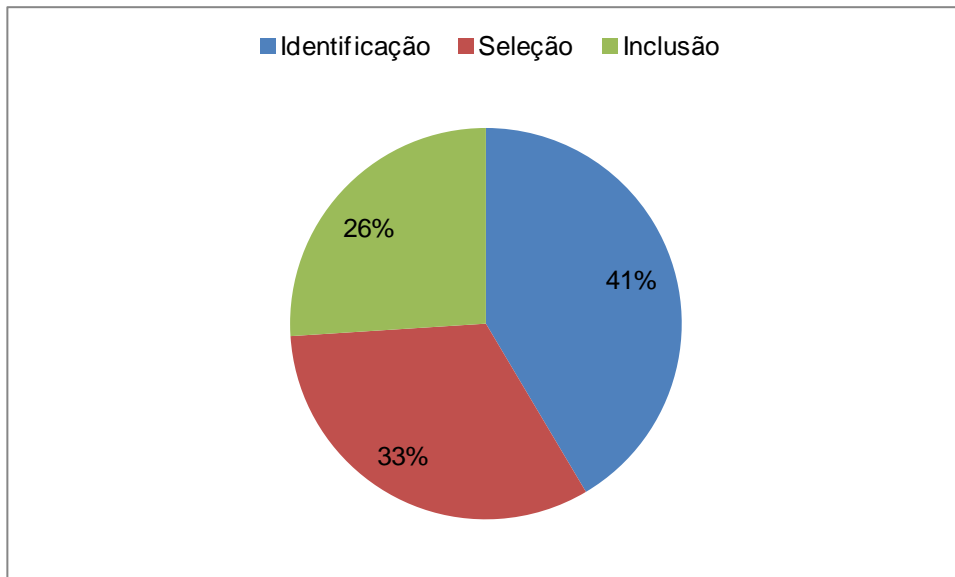
partir das palavras-chave *aplicativo roteirização, aplicativo roteirização coleta de resíduos, vehicle routing aplicativo, waste collection aplicativo, waste collection optimization, e collection route*. Nesta primeira etapa, foram reunidos apenas os estudos mais recentes, considerando os últimos 15 anos e somente aqueles que tiverem o foco no problema de roteamento de veículos para a coleta de resíduos sólidos. Foram considerados periódicos científicos e trabalhos acadêmicos, sem nenhuma delimitação geográfica. Por fim, a Figura 3.3 indica que os trabalhos selecionados são aqueles que abordam a temática do PRV e os trabalhos realmente incluídos na revisão são aqueles que apresentam uma aplicação ou uma revisão a cerca da operação de coleta de resíduos.

A Seção 3.4 apresenta os resultados das etapas da revisão bibliográfica sistemática além das características dos trabalhos incluídos. Os resultados e as conclusões obtidas pela revisão são apresentados na Seção 3.5.

### **3.4. IDENTIFICAÇÃO, SELEÇÃO E INCLUSÃO DOS TRABALHOS PESQUISADOS**

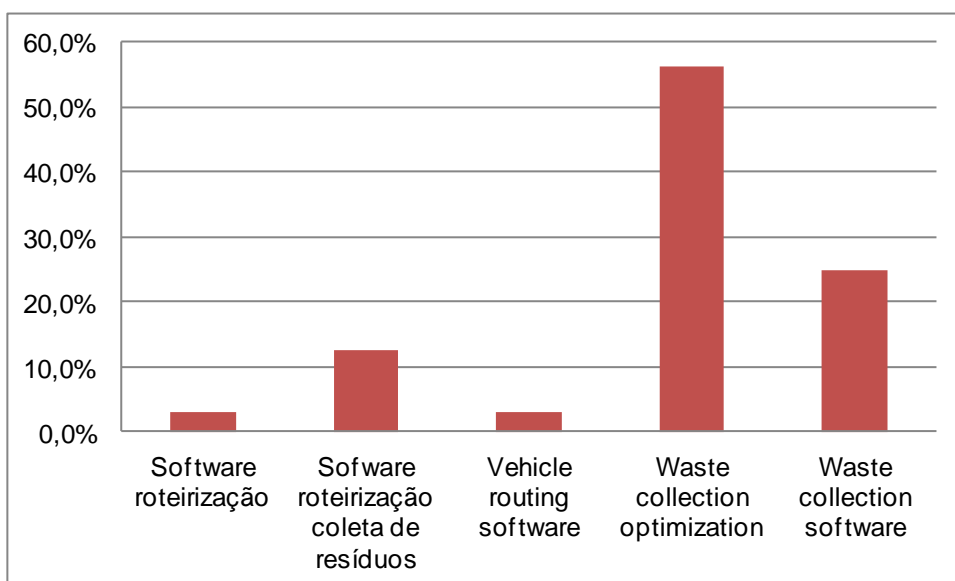
Esta revisão bibliográfica sistemática permitiu reunir 61 trabalhos pesquisados nas bases, apresentadas na Seção 3.3, sendo que 51 foram reunidos na etapa de Identificação, 40 na etapa de Seleção e 32 na etapa de Inclusão. Destes trabalhos, cerca de 20% foram reunidos a partir do Google Acadêmico e 80% pela *Science Direct*. A Figura 3.4 ilustra melhor a quantidade de trabalhos reunidos em cada uma dessas etapas.





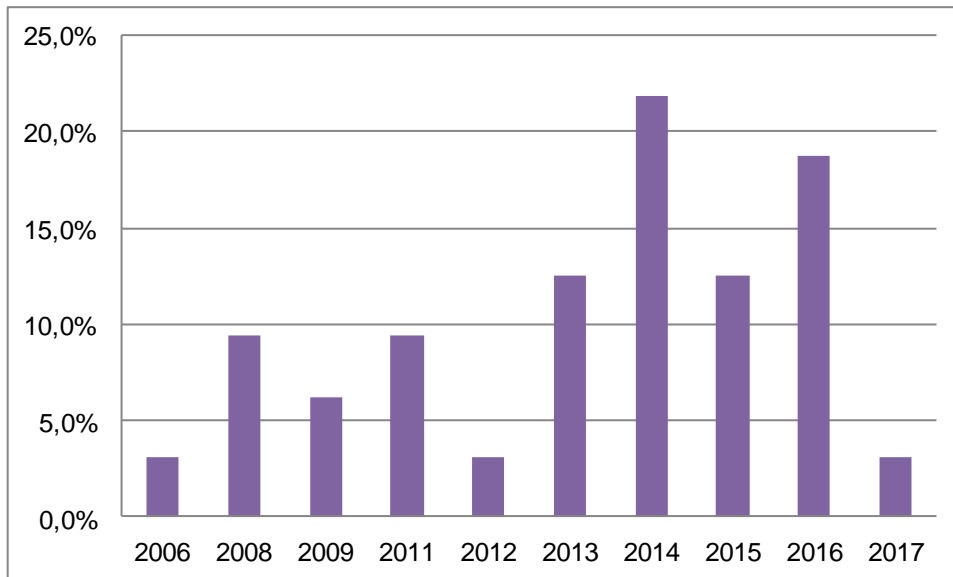
**Figura 3.4.** Quantidade de trabalhos pelas etapas da revisão bibliográfica sistemática

Dentre o universo de 32 trabalhos incluídos no processo de revisão, a participação das palavras-chave é apresentada na Figura 3.5. Pode-se observar que a palavra-chave que reuniu uma maior quantidade de trabalhos foi *waste collection optimization*.



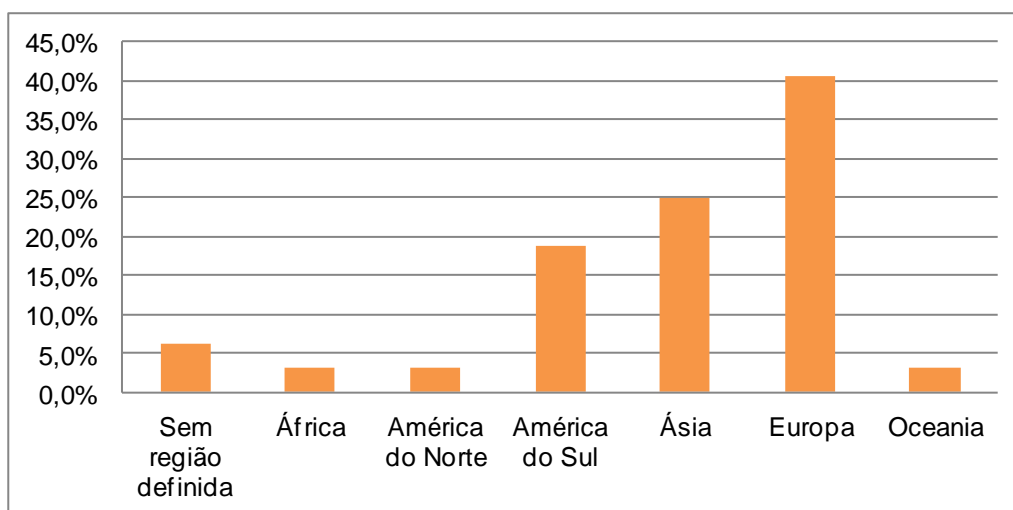
**Figura 3.5.** Participação das palavras-chave na etapa de Inclusão

Já em relação ao ano de publicação dos trabalhos incluídos na revisão bibliográfica sistemática, 2014 e 2016 foram os que reuniram a maior quantidade, como pode ser ilustrado na Figura 3.6.



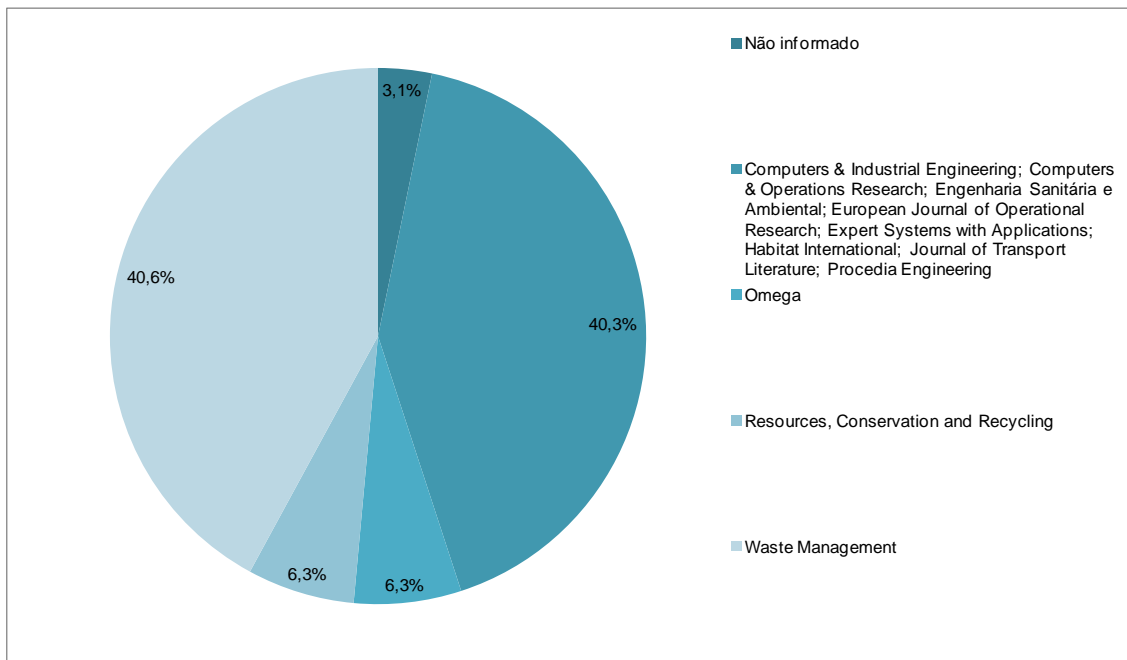
**Figura 3.6.** Ano de publicação dos trabalhos incluídos

A região de estudo dos trabalhos incluídos pela revisão também foi avaliada de forma que foi possível observar, segundo a Figura 3.7, que a maior quantidade de trabalhos publicados foi na Europa, seguida da Ásia.



**Figura 3.7.** Região de estudo dos trabalhos incluídos

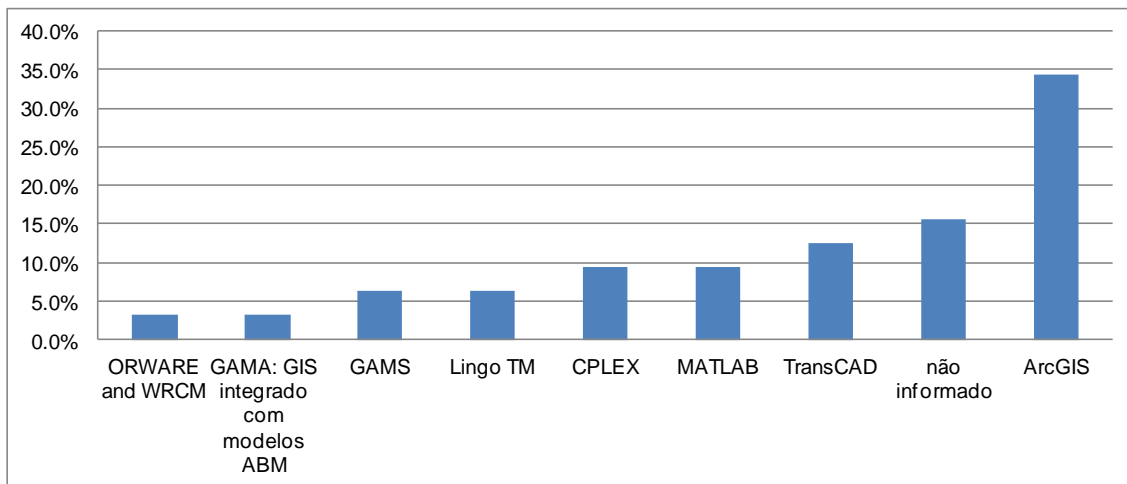
Por fim, os periódicos de publicação dos trabalhos incluídos na revisão estão apresentados na Figura 3.8, sendo que o mais largamente utilizado é o Waste Management. Além disso, 40,3% dos trabalhos encontrados foram publicados em periódicos diferentes, e houve um percentual pequeno de trabalhos que não foram publicados em nenhum periódico internacional, eram trabalhos acadêmicos. A Figura 3.8 ilustra esses dados avaliados.



**Figura 3.8.** Periódicos de publicação dos trabalhos incluídos

### 3.5. EXTRAÇÃO DOS DADOS E SÍNTESE DOS RESULTADOS

O processo de revisão sistemática permitiu levantar os aplicativos que são mais utilizados nas pesquisas para a resolução do PRV, indicados pela literatura nacional e internacional. O mais largamente utilizado é o ArcGIS (34,4% dos artigos incluídos o utilizam), o qual permite fazer análises espaciais num sistema de informações geográficas e georreferenciadas. Utilizando a mesma base, o TransCAD é o segundo mais utilizado, seguido do MATLAB, 12,5% e 9,4% de participação, respectivamente. Vale ressaltar que esses aplicativos podem resolver vários problemas com análises espaciais e não foram desenvolvidos apenas para tratar do PRV. A Figura 3.9 indica a frequência de utilização de todos os aplicativos encontrados, considerando os 32 artigos incluídos.



**Figura 3.9.** Aplicativos utilizados pelos trabalhos incluídos na revisão

Desta forma, foi possível observar que trabalhos presentes na literatura não costumam analisar o desempenho de aplicativos comerciais. Por serem voltados para o mercado, eles são mais complexos e apresentam muitas especificações, além de exigirem uma personalização maior para representarem a operação de cada problema analisado. Isso pode ocorrer devido ao fato destes tipos de aplicativos não disponibilizarem nenhuma versão acadêmica para estudo e por muitas vezes não ser economicamente viável a aquisição destes aplicativos por parte da academia.

A partir dos trabalhos reunidos na etapa de Inclusão da revisão bibliográfica sistemática, os resultados indicados por cada trabalho são apresentados na Tabela 3.1. Merecem destaque os resultados obtidos por JAKUBIAK *et al.* (2015); LI *et al.* (2008); e RAMOS *et al.* (2014-a), por apresentarem estudos considerando a coleta seletiva de resíduos recicláveis que apresentaram resultados quantitativos. Seus resultados indicam as consequências econômicas e operacionais ao se adotar rotas otimizadas para a coleta diferenciada desses resíduos, que é justamente o foco desta dissertação.

JAKUBIAK *et al.* (2015) apresentam um estudo de otimização das rotas de coleta seletiva de vidro para ser enviado a uma usina de reciclagem. Tal operação foi avaliada em Barreiro, Portugal sendo que os resultados apontam para uma redução de 62% do tempo total de operação, 43% do consumo de combustível, 40% da emissão de poluentes atmosféricos, além de uma economia de 57% nos custos totais.

Já LI *et al.* (2008) estudam uma nova abordagem heurística no PRV para a coleta de resíduos recicláveis para um estudo de caso em Porto Alegre, Brasil. A operação de

coleta é realizada separadamente para resíduos recicláveis e não-recicláveis, sendo que os recicláveis são direcionados para cooperativas de catadores que farão a triagem do material. Um dos problemas enfrentados é a existência de rotas de recicláveis com veículos com pouca carga, então o trabalho busca replanejar estas operações para que o custo total seja reduzido. Assim, foi possível obter uma redução do número de veículo de 25,24%, da distância total em 27,21% e do custo total em 25,61%.

Ainda RAMOS *et al.* (2014-a) apresentam um estudo do PRV para a coleta seletiva de recicláveis, visando a minimização da distância percorrida e minimização da emissão de CO<sub>2</sub>. A cadeia logística de coleta de resíduos do estudo de caso em sete pequenos municípios de Portugal apresenta várias facilidades envolvidas e a coleta diferenciada dos resíduos recicláveis dos não-recicláveis. A partir das soluções encontradas para este PRV, foi possível obter uma economia de 22% na distância total percorrida e de 27% nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Por outro lado, EDWARDS *et al.* (2016) apresentam um modelo que prevê o gasto de energia e tempo da coleta municipal de resíduos por caminhões com compactadores laterais, numa situação de separação dos resíduos recicláveis no gerador. O modelo é aplicado em um estudo de caso na Austrália e foi possível observar um aumento do consumo de combustível que variou entre 1,38% e 57,59%, além da necessidade de aumento da frota.

Por fim, não foi possível encontrar por meio da revisão bibliográfica sistemática um estudo que avaliasse o desempenho do aplicativo ORD que é utilizado pela empresa considerada neste estudo. Mas vale incluir aqui a análise descrita por KANT *et al.* (2008), que apresenta a avaliação dos benefícios com o uso do aplicativo na prática pela Coca-Cola Enterprises, na operação de entrega de mercadorias com múltiplos depósitos e com a existência de múltiplas rotas. Uma heurística para a construção das rotas iniciais e posteriormente um algoritmo de busca local (*local search*) foram utilizados como etapas iniciais para melhorar os resultados das rotas criadas. As próximas etapas consistiram em utilizar funções de agrupamento das regiões de coleta, para criar um planejamento mais atrativo, e por fim atribuir cada motorista a cada rota criada, de acordo com as regiões planejadas. O projeto visando o uso deste aplicativo iniciou em 2004 e até o final de 2005 foi possível obter uma economia anual de US\$ 45 milhões com a sua implementação (KANT *et al.*, 2008).

### **3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A revisão bibliográfica sistemática, apresentada neste trabalho, permitiu reunir 32 estudos acerca da problemática de coleta de resíduos sólidos por meio do uso de aplicativos para resolver o PRV. As análises apresentadas nestes trabalhos poderão ser comparadas com os resultados obtidos no estudo de caso desta dissertação, de forma a avaliar o planejamento de coleta seletiva proposta e o desempenho do aplicativo utilizado.

Como a empresa de interesse deste estudo utiliza o aplicativo ORD para gerar rotas de coleta e considerando que este aplicativo pode propiciar ganhos significativos, como indicado por KANT *et al.* (2008), esta dissertação optou por utilizá-lo. Além disso, destaca-se ainda que a Empresa ORTEC, fabricante do aplicativo, disponibilizou uma licença do mesmo para o Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ para utilização em pesquisas científicas. Sendo assim, o próximo capítulo apresenta algumas características deste aplicativo.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão

Autores	Título	Região de estudo	Aplicação	Aplicativo para a solução do PRV	Resultados
BARÃO, 2008	Determinação da rota ótima para a coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo – RS	Passo Fundo, Rio Grande do Sul - BR	Coleta seletiva de resíduos orgânicos (tais como restos de comida) e inorgânicos (como papel/papelão, plástico, metais e vidros)	Lingo®	Os resultados do presente estudo apontam um modelo de fácil reprodução e que poderá ser repetido quando necessário, tanto para a inserção de novos postos de coleta como para a aplicação do estudo em diferentes áreas urbanas.
BRASILEIRO e LACERDA, 2008	Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares	Ilha Solteira, São Paulo - BR	Problema de roteamento de veículos da operação de coleta de resíduos domiciliares	TransCAD, versão 3.2	Os resultados obtidos demonstraram reduções percentuais de até 41% na distância total percorrida e de 68% no tempo total de percurso em relação ao serviço atual.
JACINTO e ROSA, 2009	Uma heurística para solução do problema da coleta de resíduos sólidos domiciliares	Cariacica, Espírito Santo - BR	Problema de Roteirização em Arcos Capacitados de logística da coleta de resíduos sólidos domiciliares	TransCAD	Os resultados alcançados foram muito promissores, sendo que as rotas geradas em muito se aproximam da realidade do município.

**Tabela 3.2.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

Autores	Título	Região de estudo	Aplicação	Aplicativo para a solução do PRV	Resultados
LIMA <i>et al.</i> , 2012	Roteirização em arcos com um sistema de informações geográficas para transportes: aplicação em coleta de resíduos sólidos urbanos	Itajubá, Minas Gerais - BR	Problema de roteamento do sistema de coleta resíduos sólidos urbanos	TransCAD	Os resultados gerais mostraram que a rotina de roteirização presente no SIG é adequada e oferece resultados de boa qualidade, desde que as variáveis mais sensíveis do problema (taxa de geração de resíduos e velocidade dos caminhões) sejam obtidas com precisão.
OLIVEIRA, 2011	Logística reversa: a utilização de um sistema de informações geográficas na coleta seletiva de materiais recicláveis	Itajubá, Minas Gerais - BR	Planejamento da logística reversa de um programa de coleta seletiva de materiais recicláveis em meio urbano, tendo como objeto de estudo uma associação de catadores de materiais recicláveis	TransCAD	Foi possível observar que as maiores reduções nos parâmetros distância e tempo foram obtidas quando excluiu-se a necessidade das viagens até ao aterro para as pesagens do caminhão.



**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

Autores	Título	Região de estudo	Aplicação	Aplicativo para a solução do PRV	Resultados
SON <i>et al.</i> , 2015	Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows	Danang city, Vietnam	Modelo de roteamento de veículos com janela de tempo para a coleta de resíduos, num caso de múltiplas estações de transferências e veículos não homogêneos	ArcGIS	Os resultados experimentais permitiram mostrar que é possível reduzir concomitantemente a distância e o tempo total de percurso das rotas, em relação aos cenários reais apresentados.
BING <i>et al.</i> , 2014	Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste	Wageningen, Holanda	Redesenho das rotas de coleta seletiva de plástico a fim de incorporar o indicador de ecoeficiência a partir do estudo de uma nova heurística para a solução do PRV	ILOG CPLEX solver	Os resultados indicaram que as rotas otimizadas criadas podem apresentar uma melhoria no desempenho da eco-eficiência em 7% ao utilizar o novo método.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Região de estudo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Aplicativo para a solução do PRV</b>	<b>Resultados</b>
DAS e BHATTACHARYA, 2015	Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes	Bidhan nagar municipal corporation area, Kolkata metropolitan city - India	Proposta de otimização das rotas de coleta municipal de resíduos sólidos	MATLAB	Os resultados apontaram que a solução estudada é capaz de reduzir em mais de 30% a distância total percorrida pelas rotas de coleta de resíduos.
EDWARDS <i>et al.</i> , 2016	Energy and time modelling of kerbside waste collection: Changes incurred when adding source separated food waste	Austrália	Modelo que prevê o gasto de energia e tempo da coleta municipal por caminhões com compactadores laterais, numa situação de separação dos resíduos recicláveis no gerador	ORWARE and WRCM	Com o novo modelo apresentado foi possível observar um aumento do consumo de combustível de 1,38% a 57,59%, além da necessidade de aumento da frota.
FACCIO <i>et al.</i> , 2011	Waste collection multi objective model with real time traceability data	Itália	Tecnologia de ship para a identificação das lixeiras que estão cheias, de forma a planejar as rotas de coleta de resíduos pelo PRVJT	Matlab	O uso da tecnologia estudada permitiu rastrear o tempo real de coleta de resíduos, além de atuar na real necessidade de coleta. Além disso, os custos de implementação da tecnologia são justificáveis frente aos enormes benefícios que pode-se obter.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

Autores	Título	Região de estudo	Aplicação	Aplicativo para a solução do PRV	Resultados
GUTIERREZ et al., 2015	Smart Waste Collection System Based on Location Intelligence	Copenhagen, Dinamarca	Tecnologia de ship para a identificação das lixeiras que estão cheias, de forma a planejar as rotas de coleta de resíduos pelo PRVJT	GIS	Os resultados apontam que a tecnologia estuda aumenta a eficiência do serviço de coleta de resíduos, além de reduzir a uma razão de 4 a quantidade de resíduos que ficam dispostos no chão quando não cabem nas lixeiras. Porém houve um incremento de 13 a 25% da distância percorrida pelas rotas de coleta. O retorno do investimento da tecnologia é de 2 anos.
KIM et al., 2006	Waste collection vehicle routing problem with time windows	América do Norte	PRVJT da coleta e transfência de resíduos, considerando pausa para almoço	não menciona	Os resultados mostram que em um ano é possível reduzir 984 rotas utilizadas atualmente e economizar US\$ 18 milhões nos custos operacionais.
LAURERI et al., 2016	An algorithm for the optimal collection of wet waste	Genova, Itália	Algoritmo para o planejamento de coleta de resíduo úmido (orgânico)	Lingo 9.0TM	Foi verificado que é possível obter uma redução de custos operacionais com o novo planejamento.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

Autores	Título	Região de estudo	Aplicação	Aplicativo para a solução do PRV	Resultados
RADA <i>et al.</i> , 2013	Web-GIS oriented systems viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transient economies	China and Malaysia.	Otimização da coleta seletiva de resíduos recicláveis por um sistema GIS	Web-GIS based system	Foi possível obter resultados interessantes em relação à eficiência da coleta seletiva dos resíduos recicláveis.
ANGHINOLFI <i>et al.</i> , 2013	A dynamic optimization model for solid waste recycling	Cogoleto, Italia	Gerenciamento de resíduos com a separação de recicláveis e a otimização dinâmica das rotas de coleta	GIS-based Decision Support System (DSS).	Foi possível observar um aumento dos benefícios gerados à cadeia logística em 2,3 vezes.
ZSIGRAIOVA <i>et al.</i> , 2013	Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal	Barreiro, Portugal	Otimização das rotas de coleta de vidro para a usina de reciclagem	GIS	Os resultados apresentaram uma redução de 62% do tempo total de operação, 43% do consumo de combustível, 40% da emissão de poluentes atmosféricos, além de uma economia de 57% nos custos totais.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Região de estudo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Aplicativo para a solução do PRV</b>	<b>Resultados</b>
MES et al., 2014	Inventory routing for dynamic waste collection	Holanda	Abordagem heurística para o PRV com o uso de sensores em containeres	MATLAB	Foi observada uma economia dos custos de 40% com a adoção da nova abordagem.
KRÓL et al., 2016	How to improve WEEE management? Novel approach in mobile collection with application of artificial intelligence	Polônia	Algoritmo, via aplicativo de celular, para o agendamento da coleta de resíduos eletrônicos, de forma a otimizar as rotas	não menciona	Os resultados se aproximaram da solução ótima e podem mostrar uma redução dos custos de operação.
SON et al., 2015	Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows	Danang, Vietnam	Otimização da coleta de resíduos municipais utilizando o PRV	ArcGIS	Os resultados mostram a redução de tempo e distância total para o modelo de otimização apresentado.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

Autores	Título	Região de estudo	Aplicação	Aplicativo para a solução do PRV	Resultados
NGUYEN-TRONG <i>et al.</i> , 2016	Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model	Hagiang, Vietnam	Otimização das rotas de coleta de resíduos municipais com base no PRV	GAMA: GIS integrado com modelos ABM	Foi possível atingir 11.3% de redução dos custos de coleta.
KINOBE <i>et al.</i> , 2015	Optimization of waste collection and disposal in Kampala city	Kampala Capital City Authority, África	Otimização das rotas de coleta de resíduos municipais com base no PRV	ArcGIS	Os resultados apontam para uma redução dos custos e dos impactos sociais. A distância total percorrida pode reduzir de 34 - 39% e a redução de tempo total de 9 a 20%.
LI <i>et al.</i> , 2008	Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil	Porto Alegre, Brasil	Abordagem heurística no PRV para a coleta de resíduos recicláveis	CPLEX	Foi possível obter uma redução do número de veículo 25,24%, de distância total em 27,21% e do custo total de 25,61%.
HUANG e LIN, 2015	Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy	Taiwan	Reformulação do PRV para a coleta de resíduos	não menciona	O modelos apresentam uma redução da utilização da frota e da distância total percorrida.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Região de estudo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Aplicativo para a solução do PRV</b>	<b>Resultados</b>
HAUGE <i>et al.</i> , 2014	A hybrid column generation approach for an industrial waste collection routing problem	testes experimentais	Algoritmo para a coleta de resíduos por uma operação roll-on roll-of	CPLEX	Os resultados indicam a eficiência do algoritmo para entrar a solução ótima com redução do tempo de programação.
WY <i>et al.</i> , 2013	The roll on–roll off waste collection vehicle routing problem with time windows	testes experimentais	Algoritmo para a coleta de resíduos por uma operação roll-on roll-of	não menciona	As soluções que apresentam um menor tempo de programação podem apresentar uma redução do custo operacional.
ZAMORANO <i>et al.</i> , 2009	A planning scenario for the application of geographical information systems in municipal waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain)	Granada, Espanha	PRV para a localização otimizada dos contêineres para a coleta de resíduo comum e reciclável	ArcGIS	A distância total de coleta apresentou uma redução de 40,6% e o número de contêineres coletados teve uma redução de 37,8%.

**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

Autores	Título	Região de estudo	Aplicação	Aplicativo para a solução do PRV	Resultados
RAMOS <i>et al.</i> , 2014b	Assessing and improving management practices when planning packaging waste collection systems	municípios em Portugal	PRV com múltiplos produtos, para a coleta seletiva de recicláveis	GAMS 23.7 e solucionado por CPLEX Optimizer	A inclusão da operação de coleta seletiva gerou um impacto positivo de 1,7% no custo total; o compartilhamento de recursos com outras empresas levou a um impacto de 13,3% nos custos totais e a abertura das rotas provocou um impacto positivo de 0,9% dos custos totais. Por fim, o modelo apresenta uma redução de 20% dos custos totais.
SON, 2014	Optimizing Municipal Solid Waste collection using Chaotic Particle Swarm Optimization in GIS based environments: A case study at Danang city, Vietnam	Danang, Vietnam	Novo algoritmo para o PRV de coleta de resíduos municipais	ArcGIS	Foi possível obter um aumento da quantidade coleta e uma ganho de eficiência das rotas.



**Tabela 3.1.** Resultados dos trabalhos reunidos da etapa de Inclusão (continuação)

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Região de estudo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Aplicativo para a solução do PRV</b>	<b>Resultados</b>
RAMOS <i>et al.</i> , 2014a	Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems	Portugal	PRV para a coleta seletiva de recicláveis	GAMS 23.6 e solucionado em CPLEX Optimizer 12.1.0	Foi possível obter uma economia de 22% na distância total percorrida, 27% das emissões de CO <sub>2</sub> .
ANGHINOLFI <i>et al.</i> , 2011	A dynamic model for recycling: optimization of solid waste separate collection	Cogoleto, Italia	Coleta de resíduos recicláveis por meio de um algoritmo de otimização de programação dinâmica	ArcGIS	É capaz de reduzir os custos e maximizar o lucro com a venda dos resíduos para reciclagem.
MALAKAHMAD <i>et al.</i> , 2014	Solid waste collection routes optimization via GIS techniques in Ipoh city, Malaysia	Ipoh, Malasia	Otimização das rotas de coleta de resíduos municipais	ArcGIS	Foi possível observar uma redução de 22% da distância total percorrida e o tempo total pode reduzir de 6934 a 4602 s.
JAKUBIAK, 2016	The improvement in collection of municipal waste on the example of a chosen municipality	Krakov, Polônia	Otimização das rotas de coleta de resíduos municipais	não menciona	Após a otimização das rotas houve um decréscimo de 22 km na distância total percorrida.

## 4 APLICATIVO PARA A DEFINIÇÃO DE ROTAS (ORTEC ROUTING AND DISPATCH - ORD)

O aplicativo ORD atua no planejamento e nas soluções otimizadas nas áreas de: roteamento e expedição da frota de veículos dos serviços de entrega e coleta de produtos, carregamento de veículos e pallets, organização do cronograma da mão-de-obra, previsão da demanda de produtos, e no design da cadeia de suprimentos e controle de estoque e depósito de produtos. No caso do roteamento de veículos, o aplicativo é voltado para o problema de entrega e coleta de produtos para uma rede de pontos, de forma a atender a demanda deste serviço. Assim, ele apresenta soluções face às dificuldades operacionais enfrentadas por este tipo de serviço, de forma a torná-lo mais eficiente e de reduzir os custos, que representam 75% do custo total da cadeia logística (ORTEC, 2016).

Uma importante característica deste aplicativo é a consideração do histórico de trânsito na sua base georreferenciada das vias. Para o cálculo da distância e do tempo de um determinado deslocamento, ele leva em consideração a velocidade média daquela via naquele determinado segmento viário de acordo com o horário do dia, sendo que as velocidades médias são atualizadas a cada 15 minutos de acordo com a matriz de histórico de trânsito. Isso faz com que o cálculo do tempo e das distâncias se aproxime muito da realidade.

O módulo chamado de *ComTec Vehicle Routing Service (CVRS)* é uma ferramenta para a otimização do planejamento e operação da logística de mercadorias. Neste otimizador, as características dos pontos de demanda, como quantidade de produtos transportados e localização, são agrupadas nos chamados “modelos de pedido” e as características das rotas, como suas capacidades, são agrupadas nos “modelos de rota”. Estes dados são importados para o aplicativo por meio de arquivos do tipo XML e estão melhor descritos no Capítulo 5.

A partir daí são gerados os pedidos de entrega ou coleta de produtos para cada dia solicitado, assim como são programadas as rotas para estes mesmos dias. Com esses dados, o otimizador planeja as rotas de entrega ou coleta dos produtos em cada cliente. Seus algoritmos de solução visam a atender o máximo de pedidos de forma que a rota tenha o menor custo possível, buscando sempre respeitar as restrições impostas ao problema (ORTEC, 2014).

O otimizador utilizado para resolução do PRVJT é composto por dois tipos principais de algoritmos: algoritmos de construção e algoritmos de refinamento. Os algoritmos de construção empregam a abordagem de programação dinâmica (*dynamic programming*) e algoritmos de inserção mais barata (*cheapest insertion*). Em relação aos algoritmos de refinamento, todos eles são construídos baseados no método de busca local (ORTEC, 2014).

#### 4.1. PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Este algoritmo apresenta uma abordagem de otimização para a solução de problemas complexos que podem ser divididos em uma sequência de subproblemas mais simples. Estes subproblemas podem ser solucionados em múltiplos estágios de forma que cada um representa uma solução parcial do problema. Ao resolver o último estágio, a solução pode ser encontrada (ORTEC, 2014).

A formulação deste algoritmo é baseada no Problema do Caixeiro Viajante, sendo apresentado a seguir. Seja  $V$  o conjunto de vértices que representam todas as localizações dos clientes (pontos de demanda) e sendo  $0$  o depósito ou ponto de partida das rotas. Dado  $S \subseteq V \setminus \{0\}$  e  $i \in S$ , assume-se que  $C\{S, i\}$  seja o custo da rota, sendo que  $c_{0i}$  é o custo mínimo, que se inicia a partir do vértice  $0$ , visitando todos os vértices do conjunto  $S$  e sendo finalizada no vértice  $i$ . Considerando que o menor caminho é representado pelo caminho entre o vértice  $0$  e o vértice  $i$ , e visita-se todos os vértices a partir de  $S \setminus \{i\}$ , sendo que o vértice  $j \in S$  é imediatamente precedido do vértice  $i$ . Desta forma, a relação indicada na Equação 2 é seguida.

$$\begin{cases} C(\{i\}, i) = c_{0i} \\ C(S, i) = \min_{j \in S \setminus \{i\}} [C(S \setminus \{i\}, j) + c_{ji}] \end{cases} \quad (4.1)$$

Desde que os vértices de  $S \setminus \{i\}$  são visitados numa ordem otimizada, a distância do caminho percorrido é dada por  $C(S \setminus \{i\}, j) + c_{ji}$ . A partir do mínimo valor obtido para  $j$  é obtido o mínimo custo  $C(S, i)$ . Por fim, o custo mínimo do caminho completo, que termina no vértice  $0$ , é dado por  $C(V, 0) = \min_{i \in V \setminus \{0\}} C(V \setminus \{0\}, i) + c_{i0}$ .

Então, o algoritmo é dividido em estágios, que são os vértices indicados no problema a ser resolvido, e cada estágio pode ter múltiplos estados. Os estados representam as soluções parciais para o problema e o número de estados em cada estágio é chamado

de “comprimento do estágio”. Esses estados são estendidos por meio de um vértice extra no problema, para que mais soluções parciais sejam encontradas.

Como o PRVJT é considerado NP-*Hard*, o tempo computacional de solução do algoritmo cresce exponencialmente para cada instância do problema. Para que este tempo computacional seja reduzido, uma solução heurística é buscada, de forma a limitar o espaço de soluções do algoritmo de programação dinâmica. Esta limitação pode ser feita de duas formas: primeiramente se limita o número de estados em cada estágio pela eliminação dos estados de maior custo. A seguir, é limitado o número de extensões (chamadas de “*outlinks*”) realizadas para cada estado, de forma que sejam selecionadas apenas as extensões de menor custo.

#### **4.2. INSERÇÃO MAIS BARATA**

O algoritmo de inserção mais barata (*greedy insertion*) é utilizado para a construção de soluções do problema. Nele, são inseridos um conjunto de tarefas a partir do ponto de menor custo de inserção na rota já construída. Assim, o algoritmo divide todas as tarefas em grupos de tarefas mais simples, mas mantendo os agrupamentos dos pontos de acordo com a sua localização. Então, partes de cada grupo são planejadas para diferentes pontos de inserção e a melhor escolha é representada pela melhor combinação de inserção de pontos, que possuem os menores custos (ORTEC, 2014).

Ele se inicia considerando que cada ponto é atendido por uma única rota. A partir daí, o algoritmo reúne o ponto final de uma rota ao ponto inicial de forma a buscar melhorias na solução do problema. A partir daí, o algoritmo de inserção mais barata inicia por um conjunto de rotas e um conjunto de pontos que ainda não foram alocados às rotas. Para cada rota é adicionado um ponto que ainda não foi atendido, sendo posicionado na melhor ordem desta rota. Quando não é possível inserir mais pontos a esta rota, o algoritmo realiza este processo na próxima rota. Assim, ele segue as etapas (KANT *et al.*, 2008):

- Etapa 1: seleção do veículo de maior capacidade que ainda não foi utilizado em nenhuma iteração;
- Etapa 2: seleção do ponto mais difícil de ser atendido, ou seja, o que é mais distante da base e que possui uma janela de tempo mais estreita. Este ponto será adicionado ao veículo selecionado na Etapa 1;
- Etapa 3: construção de uma lista de pontos candidatos a serem inseridos na rota. Os candidatos são os pontos que ainda não foram atendidos e que se

assemelham aos pontos já alocados nesta rota, de acordo com sua localização e janela de tempo; e

- Etapa 4: quando a rota atingir seu limite de tempo de duração, é verificado se esta rota pode ser atendida por um veículo de menor capacidade.

Este algoritmo permite que nem todos os modelos de pedido sejam alocados nas rotas numa única iteração. Ao invés disso, os modelos são divididos em diferentes conjuntos, definidos pelos agrupamentos dos pontos de acordo com as suas localizações, e cada um é planejado numa iteração diferente.

### **4.3. BUSCA LOCAL PARA O REFINAMENTO DA SOLUÇÃO**

Os algoritmos de programação dinâmica e inserção mais barata são responsáveis por construir soluções, mas não necessariamente a solução ótima pode ser obtida nesse primeiro momento. Sendo assim, é utilizado um algoritmo de busca local para se obter uma solução melhor. Na prática, a aplicação da busca local visa a melhoria da solução inicial obtida. Este processo pode ser realizado em quatro etapas diferentes do algoritmo, sendo que cada uma possui uma estratégia diferenciada (ORTEC, 2014):

- reotimização entre os agrupamentos dos modelos de pedido;
- reotimização quando nem todos os modelos de pedido foram agrupados e planejados;
- reotimização quando nem todos os modelos de pedido foram planejados de uma forma geral; e
- reotimização no final do processo.

Cada uma dessas estratégias de reotimização consiste numa quantidade de procedimento que possuem suas próprias configurações e especificidades, realizando suas ações de forma individualizada. Cada um dos procedimentos é apresentado a seguir (ORTEC, 2014):

- Procedimento 2-Opt: para melhorar a solução encontrada este algoritmo propõe a remoção dos cruzamentos dos caminhos existentes dentro e entre rotas;
- Procedimento de fusão da solução atual: o algoritmo cria grupos de modelos de pedido para se encontrar uma nova solução, tentando realocar esses modelos entre os grupos criados;

- Procedimento de grande fusão com a solução atual: esse algoritmo também cria grupos na própria solução atual e tenta realocar os modelos de pedido dentro desta própria solução;
- Procedimento de troca na solução atual: procura melhorar a solução atual por meio da criação de grupos de modelos de pedido para que cada grupo seja permutado dois a dois. Ao fazer a troca, o algoritmo tenta mesclar o novo grupo com os modelos de pedido que já existiam naquele grupo;
- Procedimento de fusão e troca de grupos: este algoritmo faz ao mesmo tempo a troca e fusão de novos grupos criados dentro do espaço de solução atual;
- Procedimento de transferência cíclica: propõe a criação de novos grupos de modelos de pedido no espaço de solução atual e posteriormente realiza a troca cíclica dos modelos de pedido entre os grupos; e
- Procedimento de reotimização das rotas: utiliza a programação dinâmica para melhorar as rotas já criadas a partir de uma identidade criada para cada uma. Esse processo pode ser realizado mais de uma vez e não há a criação de grupos de modelos de pedido.

Por fim, os atributos que podem ser utilizados nos comandos de melhoria da solução são:

- única alteração: esse atributo existe para marcar os modelos de pedido que sofreram alguma alteração, seja por fusão, transferência ou troca, de forma a não se confundirem com os que foram trocados;
- iteração de quebra após melhoria: a partir deste atributo, trocas e fusões são finalizadas assim que uma melhor solução for encontrada;
- tempo mínimo computacional: qualquer troca, transferência ou fusão só é realizada se o tempo computacional é menor que o maior possível.
- número máximo de iterações: número máximo de iterações possíveis durante a estratégia de reotimização, mas se uma solução melhor for encontrada antes deste valor, as iterações param imediatamente;
- custo máximo de uma rota vazia e número mínimo de rotas a serem criadas: valores utilizados somente para o caso de procedimento de transferência cíclica;
- tamanho máximo de estágios: tamanho máximo dos estágios criados para o processo de melhoria que utiliza o algoritmo de programação dinâmica; e

- modificador de data: atributo que pode ser utilizado pelo processo de melhoria para limitar os comandos do algoritmo de programação dinâmica, que faz a ordem dos modelos de pedido planejados.

#### **4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A partir da apresentação das características do aplicativo ORD, e com base nos resultados indicados por KANT *et al.* (2008), que apresenta a avaliação dos benefícios com o uso do aplicativo na prática pela Coca-Cola Enterprises, é possível justificar seu uso no presente trabalho, apesar de não ter sido indicado na revisão bibliográfica sistemática. Acredita-se que ele possa promover uma análise mais profunda e precisa da operação, podendo se aproximar mais da realidade do que os aplicativos indicados na literatura. Além disso, acredita-se ser uma possibilidade única de se utilizar um aplicativo comercial para um estudo acadêmico, tendo em vista as dificuldades comentadas no Item 3.5. Com isso, o Capítulo 5 apresenta as características do estudo de caso avaliado nesta dissertação.

## **5 ESTUDO DE CASO**

Este capítulo inicia com as características da empresa responsável pela operação que é avaliada no estudo de caso desta dissertação. Posteriormente é indicado o cálculo da gravimetria dos resíduos coletados, necessário para o planejamento da coleta seletiva. Por fim, a última seção deste capítulo apresenta as características dos cenários planejados.

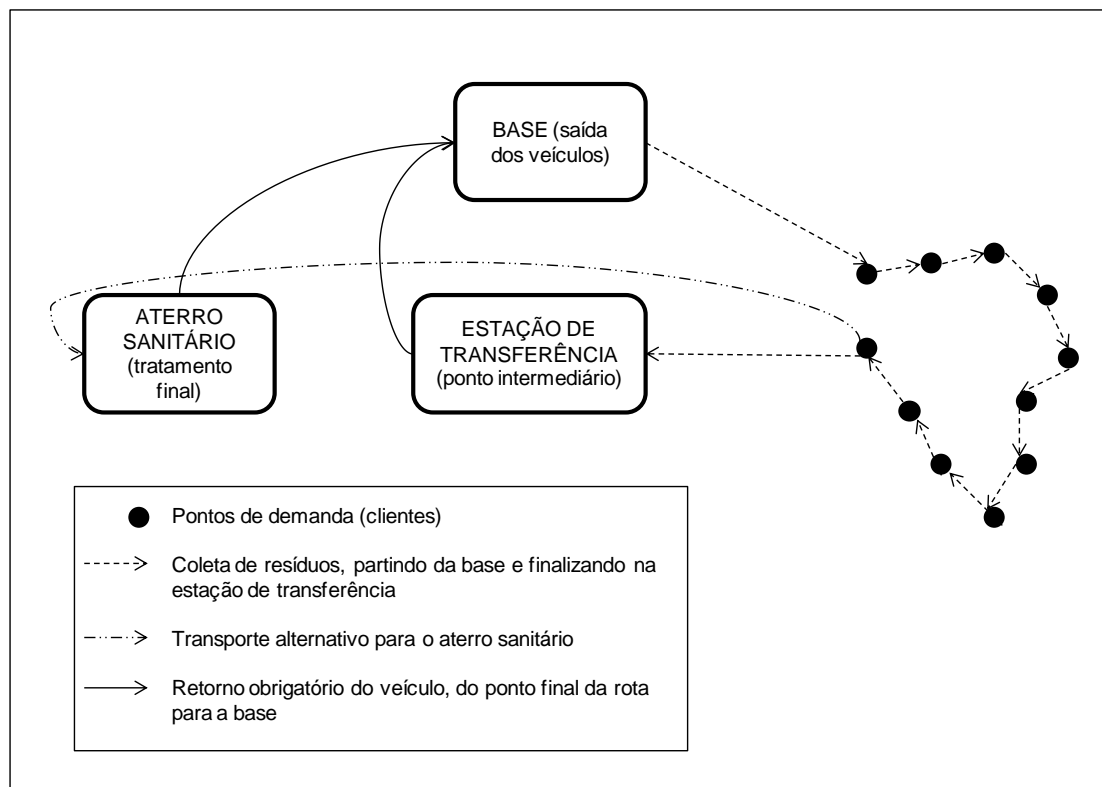
### **5.1. OPERAÇÃO DA EMPRESA EM ESTUDO**

O presente estudo de caso analisa os dados de uma empresa privada responsável pelo serviço de coleta de resíduos extraordinários gerados por 1.764 estabelecimentos comerciais como hotéis, restaurantes, escolas, igrejas e supermercados. A empresa está localizada na região de Bonsucesso e seu serviço abrange a Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

A operação se inicia com a saída dos caminhões compactadores da base, que seguem coletando os resíduos nas rotas definidas para os clientes, que são os pontos de demanda. Além de caminhões compactadores, a empresa apresenta em sua frota também outro tipo de caminhão, o baú, que é um caminhão com carroceria fechada e que não realiza a compactação dos resíduos. O serviço termina com a descarga dos resíduos no destino final, que pode ser uma estação de transferência ou um aterro sanitário. Por fim, o veículo retorna obrigatoriamente para a base. O fluxograma da operação de coleta dos resíduos pela empresa está indicado na Figura 5.1. Atualmente não existe nenhum tipo de coleta diferenciada dos resíduos recicláveis e nenhum cliente faz a separação deste material.

Embora o problema mostrado na Figura 5.1 seja um PRVJT, ele apresenta mais características que aquelas descritas na Seção 2.4 como a necessidade do veículo passar em uma estação de transferência antes de retornar à sua base. Entretanto, como pode ser visualizado em TOTH e VIGO (2014), o PRVJT pode ser modificado para absorver novas características como aquelas apresentadas neste caso.





**Figura 5.1.** Fluxograma da coleta de resíduos extraordinários

## 5.2. GRAVIMETRIA DOS RESÍDUOS COLETADOS

A partir da operação realizada na empresa, o presente trabalho visa propor uma alternativa ao descarte direto dos resíduos, que atualmente não possuem nenhum aproveitamento, o que vai de encontro aos princípios pregados pela PNRS. Assim, primeiramente foi analisada a composição gravimétrica dos resíduos de acordo com o tipo de estabelecimento comercial que possui contrato com a empresa. A composição gravimétrica de cada estabelecimento foi obtida por meio das Equações (5.1) e (5.2), que se baseiam em ASBEA e COMCAP (2014).

$$Q_{rec} = n \times k_1 \quad (5.1)$$

$$Q_{ext} = n \times k_2 \quad (5.2)$$

Sendo:

- $Q_{rec}$  (kg/dia): quantidade da fração de resíduos recicláveis gerados por dia;
- $Q_{ext}$  (kg/dia): quantidade da fração de resíduos não recicláveis gerados por dia;

- $n$  (kg/dia): quantidade total de resíduos gerados pelo estabelecimento;
- $k_1$  (%): percentual de geração da fração dos resíduos recicláveis; e
- $k_2$  (%): percentual de geração da fração dos resíduos não recicláveis.

Foi considerável que a fração de rejeito, existente na composição dos resíduos gerados por cada estabelecimento, não foi separada da fração de resíduo orgânico. Por isso é considerada uma fração de resíduo não reciclável, ou seja, que é o resíduo orgânico somado ao rejeito. A PNRS (BRASIL, 2010) estabeleceu uma meta de 30% para a fração de rejeito, de forma que 70% resíduos secos sejam reaproveitados para a reciclagem, que é o percentual considerado neste trabalho.

A partir daí, cada estabelecimento comercial que possui contrato com a empresa foi classificado segundo o tipo de área de atuação comercial, também com base em ASBEA e COMCAP (2014). Para cada tipo de estabelecimento foram determinados os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$ , que estão indicados na Tabela 5.1. Nela também são apresentadas as referências utilizadas para a obtenção destes coeficientes. Vale ressaltar então que ao se calcular a fração não reciclável produzida pelo estabelecimento, pelo coeficiente  $k_2$ , foi considerado que 30% desta fração é rejeito.

**Tabela 5.1.** Coeficientes da composição gravimétrica por tipo de estabelecimento

Tipo de Estabelecimento	$k_1$	$k_2$	Referência
Academia	0,20	0,80	ASBEA e COMCAP (2014)
Açougue/Peixaria	0,37	0,63	CAMPOS e LIMA (2014)
Associação ou Instituto	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Atelier	0,40	0,60	ASBEA e COMCAP (2014)
Banco	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Bar/Restaurante	0,40	0,60	ASBEA e COMCAP (2014)
Café/Bar	0,40	0,60	ASBEA e COMCAP (2014)
Casa de festas	0,20	0,80	ASBEA e COMCAP (2014)
Casa de repouso	0,20	0,80	CONTO <i>et al.</i> (2004)
Centro comercial	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Centro cultural	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Cinema	0,20	0,80	ASBEA e COMCAP (2014)
Clube	0,20	0,80	ASBEA e COMCAP (2014)
Concessionária de veículos	0,50	0,50	ASBEA e COMCAP (2014)
Criadouro de animais	0,40	0,60	ASBEA e COMCAP (2014)
Distribuidora de produtos	0,50	0,50	ASBEA e COMCAP (2014)
Distribuidora de combustíveis	0,50	0,50	ASBEA e COMCAP (2014)

**Tabela 5.1.** Coeficientes da composição gravimétrica por tipo de estabelecimento (continuação)

<b>Tipo de Estabelecimento</b>	<b>k<sub>1</sub></b>	<b>k<sub>2</sub></b>	<b>Referência</b>
Empresa de eventos	0,20	0,80	ASBEA e COMCAP (2014)
Empresa de limpeza	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Empresa de Transporte	0,50	0,50	ASBEA e COMCAP (2014)
Empresa de turismo	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Escola/Faculdade	0,45	0,55	ARAÚJO e VIANA (2012)
Escritório	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de alimentos	0,40	0,60	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de bolsas	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de equipamentos de comunicação	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de equipamentos	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de fitas	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de lentes	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de peças	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de plásticos	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de produtos químicos	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de refratários	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Fábrica de roupas	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Farmacêutica	0,30	0,70	ASBEA e COMCAP (2014)
Farmácia	0,20	0,80	ASBEA e COMCAP (2014)
Gráfica/Papelaria	0,80	0,20	ASBEA e COMCAP (2014)
Hospital/Clínica	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Hotel	0,20	0,80	CONTO <i>et al.</i> (2004)
Igreja	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Imobiliária	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Locadora	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Loja	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Mercado	0,37	0,63	CAMPOS e LIMA (2014)
Obra	0,20	0,80	ARAÚJO e CARNAÚBA (2010)
Oficina	0,50	0,50	ASBEA e COMCAP (2014)
Padaria/Lanchonete	0,40	0,60	ASBEA e COMCAP (2014)
Posto de Gasolina	0,50	0,50	ASBEA e COMCAP (2014)
Produtora	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Revendedora de caminhões	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Salão/Depiladora	0,60	0,40	ASBEA e COMCAP (2014)
Seguradora	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)
Serviços hidráulicos	0,70	0,30	ASBEA e COMCAP (2014)

Para o cálculo da quantidade da fração de resíduos recicláveis e não recicláveis gerados, é necessário o conhecimento da quantidade total gerada por cada estabelecimento. O dado fornecido pela empresa é a quantidade da unidade de acondicionamento de resíduos, coletada em cada estabelecimento. Assim, a quantidade total de resíduos gerados foi obtida pela Equação (5.3):

$$n = v \times \gamma \times p \times m \quad (5.3)$$

Sendo:

- $n$  (kg/dia): quantidade total de resíduos gerados pelo estabelecimento;
- $v$  (m<sup>3</sup>): volume da unidade de acondicionamento de resíduos;
- $\gamma$  (kg/m<sup>3</sup>): peso específico dos resíduos extraordinários;
- $p$  (%): percentual da unidade de acondicionamento não ocupada pelos resíduos; e
- $m$  (un/dia): quantidade de unidades de acondicionamento coletadas por dia.

Os tipos de unidade de acondicionamento de resíduo estão indicados na Tabela 5.2. O peso específico foi informado pela empresa de acordo com a observação dos dados em campo, chegando a um valor de 360 kg/m<sup>3</sup>. O percentual não ocupado de resíduos na unidade de acondicionamento, também observado em campo, é de 50%. Enfim, a quantidade de cada uma dessas unidades foi fornecida pela empresa, de acordo com o contrato firmado entre o estabelecimento comercial e a mesma.

**Tabela 5.2.** Tipos de unidade de acondicionamento de resíduos e seus volumes

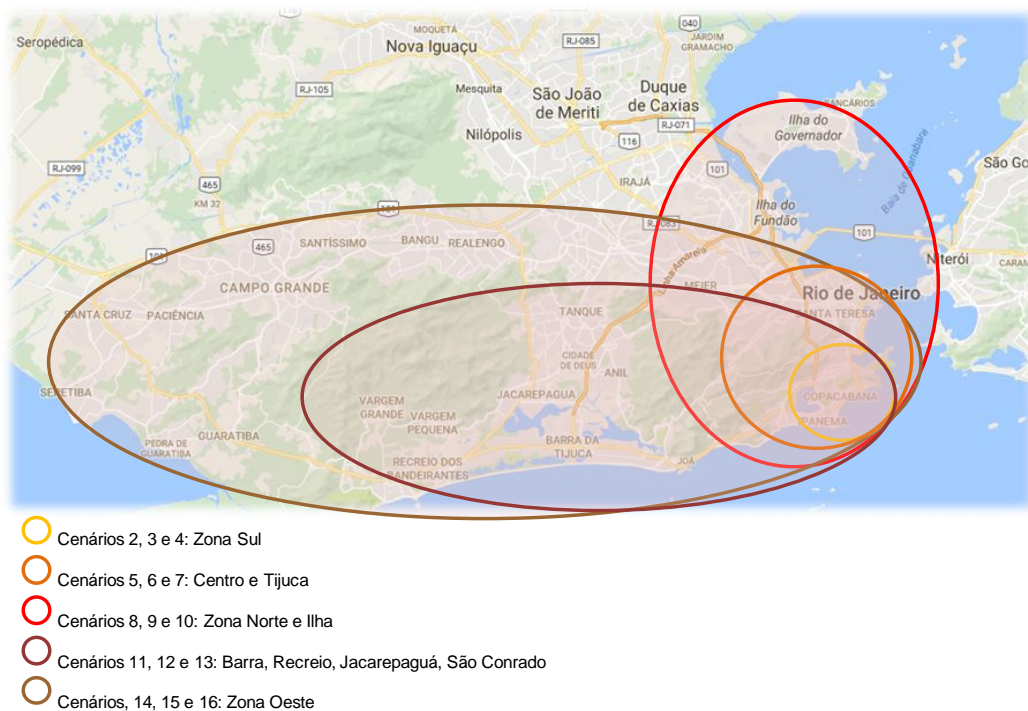
<b>Unidade de acondicionamento de resíduos</b>
Contêiner de 1200 l
Contêiner de 1000 l
Contêiner de 360 l
Contêiner de 240 l
Contêiner de 120 l
Saco de 200 l
Saco de 100 l

### 5.3. CENÁRIOS PLANEJADOS

Com o conhecimento da geração de resíduos em cada estabelecimento comercial, foram estabelecidos 16 cenários para o planejamento da operação de coleta seletiva. O Cenário 1 é o cenário base, em que não há nenhuma separação dos resíduos recicláveis. A partir do Cenário 2 foram estabelecidas as abrangências da coleta seletiva para cada região indicada a seguir, de acordo com a quantidade de resíduos recicláveis que começarão a ser separados pelos geradores. Portanto, o planejamento para cada região é cumulativo de forma que o último cenário contemple todas as regiões atendidas pela empresa atualmente. O objetivo deste planejamento é preparar a população gradativamente para a coleta seletiva, de forma que se tenha um planejamento da conscientização e treinamento dos responsáveis de cada cliente para que a separação dos resíduos recicláveis seja mais eficiente e eficaz possível. A Figura 5.2 ilustra as regiões planejadas para cada cenário um dos cenários listados a seguir:

- Cenário 1: 100% de resíduos sem separação;
- Cenário 2: Zona Sul (cada estabelecimento possui 30% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 3: Zona Sul (cada estabelecimento possui 50% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 4: Zona Sul (cada estabelecimento possui 100% de separação na fração de resíduos recicláveis reaproveitáveis e a outra fração de resíduos é considerada orgânica, com 30% de rejeito misturado);
- Cenário 5: Centro e Tijuca (cada estabelecimento possui 30% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 6: Centro e Tijuca (cada estabelecimento possui 50% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 7: Centro e Tijuca (cada estabelecimento possui 100% de separação na fração de resíduos recicláveis reaproveitáveis e a outra fração de resíduos é considerada orgânica, com 30% de rejeito misturado)
- Cenário 8: Zona Norte e Ilha do Governador (cada estabelecimento possui 30% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 9: Zona Norte e Ilha do Governador (cada estabelecimento possui 50% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);

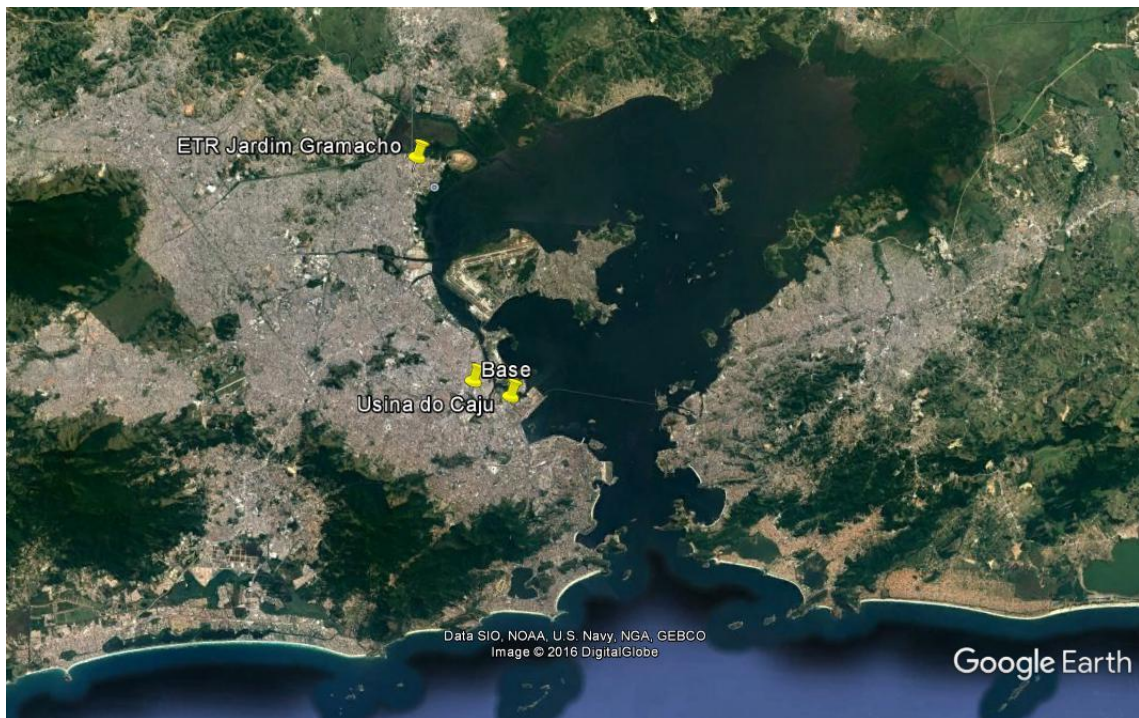
- Cenário 10: Zona Norte e Ilha do Governador (cada estabelecimento possui 100% de separação na fração de resíduos recicláveis reaproveitáveis e a outra fração de resíduos é considerada orgânica, com 30% de rejeito misturado);
- Cenário 11: Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado (cada estabelecimento possui 30% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 12: Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado (cada estabelecimento possui 50% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 13: Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado (cada estabelecimento possui 100% de separação na fração de resíduos recicláveis reaproveitáveis e a outra fração de resíduos é considerada orgânica, com 30% de rejeito misturado);
- Cenário 14: Zona Oeste (cada estabelecimento possui 30% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis);
- Cenário 15: Zona Oeste (cada estabelecimento possui 50% de separação na fração de resíduos recicláveis e a outra fração é de resíduos não recicláveis); e
- Cenário 16: Zona Oeste (cada estabelecimento possui 100% de separação na fração de resíduos recicláveis reaproveitáveis e a outra fração de resíduos é considerada orgânica, com 30% de rejeito misturado).



**Figura 5.2.** Abrangência da coleta seletiva para cada cenário de simulação

Assim, para cada cenário, as rotas de coleta da fração de resíduos recicláveis gerada pelos estabelecimentos e as rotas de coleta da fração não reciclável foram obtidas com o aplicativo ORD. A partir do Cenário 2 é considerada a separação da fração de resíduos recicláveis, sendo que a outra fração foi classificada como resíduo extraordinário por se tratar de uma fração de resíduos misturados. Desta forma, as rotas da coleta dos resíduos recicláveis utilizam os caminhões baú para que não danifique o material coletado, e as rotas de coleta dos resíduos extraordinários utilizam os caminhões compactadores. Então, foram simuladas duas coletas diferenciadas para cada gerador que começa a fazer a separação dos resíduos recicláveis. Esta diferença na operação de coleta será comparada com o Cenário 1 (base) que é aplicado hoje, em que os geradores não separam nenhum tipo de resíduo reciclável e que existe apenas uma rota de coleta para cada um. Esta única coleta em cada cliente é realizada, atualmente, por um caminhão compactador.

Seguindo este raciocínio, é considerado, para as rotas de coletas dos resíduos extraordinários, o destino final utilizado pela empresa atualmente: a estação de transferência (ETR) privada localizada em Jardim Gramacho. Por outro lado, para as rotas de coleta dos resíduos recicláveis segregados pelo gerador, considera-se a base da empresa como destino final, pois será considerado que a empresa incorpore as operações de triagem dos resíduos de forma que ela se transforme também em receptor final dos mesmos. No caso de 100% de separação dos resíduos recicláveis, os outros resíduos gerados pelo estabelecimento podem ser considerados orgânicos com 30% de rejeito. Com isso, os resíduos orgânicos podem ser encaminhados diretamente para o tratamento pela Usina de Compostagem, aonde fará a separação deste rejeito num processo de pré-tratamento. Foi considerada a Usina do Caju para este trabalho, que é operada pelo governo municipal. A Figura 5.3 indica a localização geográfica dos destinos finais citados para os resíduos.



**Figura 5.3.** Localização da base e destinos finais para a simulação dos cenários

As rotas foram simuladas para apenas um dia na semana, a segunda-feira, que é o dia mais crítico para a operação na empresa, apresentando um maior número de coletas. Para a obtenção das rotas pelo aplicativo ORD, foram necessários os seguintes dados:

- Localização de cada estabelecimento a ser coletado e a localização dos destinos finais, em coordenadas geográficas;
- Janela de tempo de cada estabelecimento, para ser realizada a coleta, sendo determinada por um horário inicial e um final;
- Tempo de duração da coleta, que é composto por um tempo fixo (em minutos) de espera antes da operação ser iniciada, e por um tempo variável em relação à quantidade coletada em cada cliente (min/kg);
- Quantidade de resíduos de cada estabelecimento a ser coletado, sendo discriminada para cada tipo de resíduo (reciclável ou não reciclável). Esta quantidade, medida em quilos, foi determinada pela gravimetria dos resíduos explicada anteriormente;
- Quantidade de veículos disponíveis de cada tipo (caminhão compactador ou baú); e
- Capacidade de cada veículo, indicada em quilos.



Vale observar que, foram considerados três turnos para a janela de tempo: manhã (05:00 às 14:00h), tarde (14:00 às 23:59h) e noite (20:00 às 05:00); sendo que apenas alguns clientes possuem uma janela de tempo mais restrita, de 30 minutos de diferença entre o horário de início e de término da janela. No caso do tempo da duração da coleta, foi considerado o tempo fixo de 5 minutos para supermercados e 30 segundos para os demais clientes. Os clientes do turno da noite não tiveram este tempo fixo considerado, pois a maioria dos estabelecimentos se encontram fechados neste período e os resíduos ficam dispostos nas calçadas. Para obtenção do tempo variável, a empresa realizou medições para cada tipo de unidade a ser coletada. De acordo com a média de peso de cada tipo de unidade, indicada na Tabela 5.3, foi determinado o tempo por unidade de peso (min/kg).

**Tabela 5.3.** Tempo de coleta e peso de cada unidade de acondicionamento de resíduos

<b>Unidade coletada</b>	<b>Tempo de coleta (min)</b>	<b>Peso (kg)</b>
Contêiner de 1200 l	5,0	300,0
Contêiner de 1000 l	5,0	250,0
Contêiner de 360 l	3,0	112,5
Contêiner de 240 l	2,0	75,0
Contêiner de 120 l	2,0	37,5
Saco de 200 l	1,0	25,0
Saco de 100 l	1,0	25,0

Em relação aos veículos disponíveis para a coleta, a Tabela 5.4 indica a quantidade de cada um na frota da empresa e a capacidade de cada um segundo o tipo.

Além disso, também foram importados para o aplicativo os seguintes parâmetros que foram fornecidos pela empresa:

- Custo operacional (R\$/km): custo do diesel consumido pelas rotas (R\$/l) somado ao custo de manutenção dos veículos (R\$/km);
- Custo de destinação final dos resíduos (R\$/kg): custo unitário pago pela empresa para cada destino final utilizado. Caso o destino final seja a própria empresa, este custo não existe;
- Custo de funcionário (R\$/h): custo por hora de trabalho da equipe de coleta, que é formada por um motorista e um coletor; e

- Tempo total (min): cada rota tem um limite máximo de tempo para ser realizada, sendo que se for ultrapassado esse limite será considerado o valor da hora extra de cada funcionário, indicado em R\$/h.

**Tabela 5.4.** Características dos veículos da frota

Tipo de veículo	Capacidade (kg)	Quantidade
<b>Caminhão compactador</b>	12500	6
	12000	10
	9000	3
	8000	2
	7500	2
	6500	1
	6000	4
<b>Caminhão baú</b>	5300	2
	3000	2
	2000	3
	1500	4

Os custos operacionais são apresentados na Tabela 5.5 e os custos de destinação na Tabela 5.6. Para o custo de diesel ser convertido em R\$/km foi considerado o rendimento de cada veículo (km/l), também apresentado na Tabela 5.5. Já custo da hora extra do funcionário, disponibilizado pela empresa, foi de R\$ 21,88/h e o tempo total de realização da rota foi de 540 minutos ou 9 horas.

**Tabela 5.5.** Custos operacionais

Tipo de veículo	Capacidade (kg)	Custo (R\$/km)	Rendimento (km/l)
<b>Caminhão compactador</b>	12500	1,48	1,91
	12000	1,54	1,96
	9000	1,78	1,63
	8000	1,51	1,89
	7500	1,88	1,65
	6500	1,30	2,17
	6000	1,24	1,99
<b>Caminhão baú</b>	5300	0,58	4,03
	3000	0,31	9,20
	2000	0,33	9,37
	1500	0,38	7,45

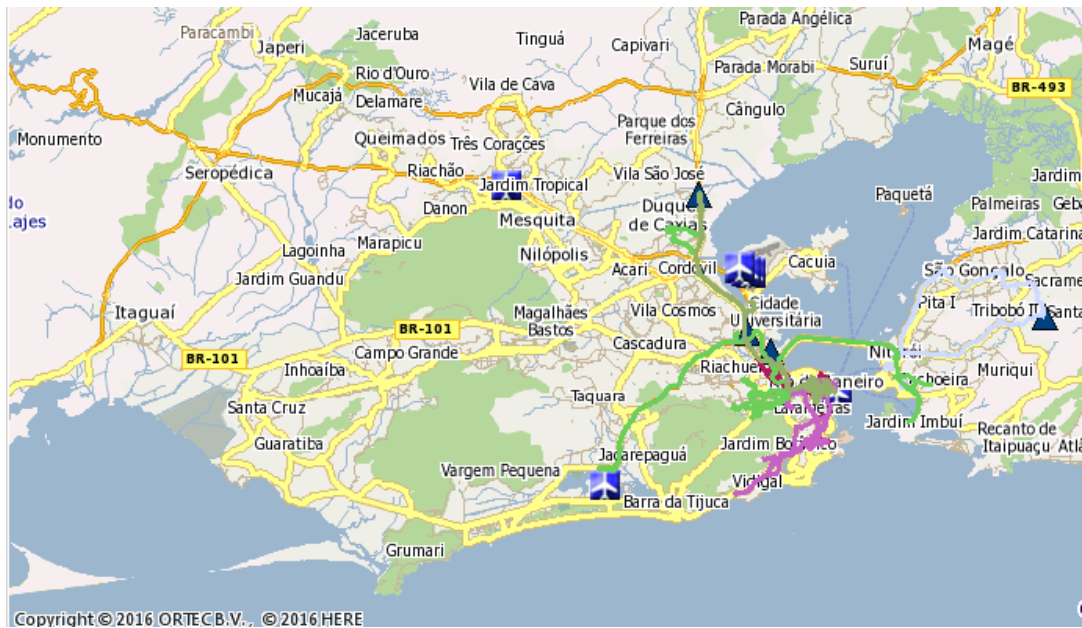
**Tabela 5.6.** Custo dos destinos finais

<b>Destino Final</b>	<b>Custo (R\$/kg)</b>
ETR Gramacho	0,064
Aterro Alcântara	0,093
Usina do Caju	0,040
Base	0,000

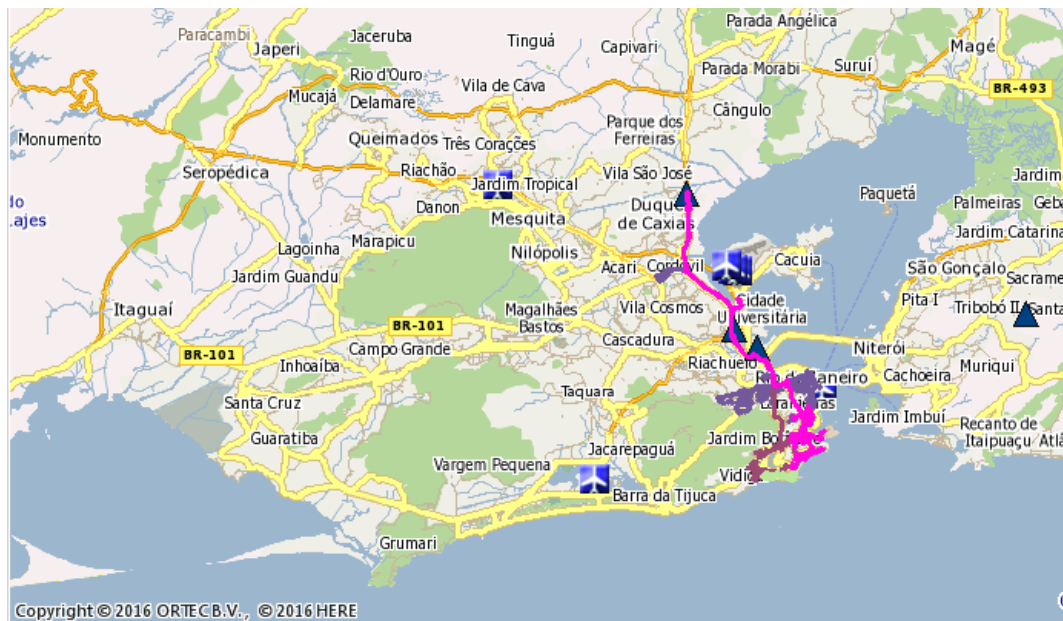
#### **5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A partir das características indicadas, o próximo capítulo apresenta os resultados para cada cenário em função da quantidade de coletas realizadas, quantidade de rotas criadas, peso total, quilometragem total, tempo total gasto pelas rotas e o custo total das rotas. Para cada cenário, esses resultados são apresentados de forma comparativa entre as rotas que realizaram a coleta seletiva dos materiais e as rotas que coletaram os resíduos extraordinários, sendo chamadas de rotas sem coleta seletiva. Por fim, o Cenário 1 (cenário base) é comparado com o Cenário 16, em que todos os geradores separaram os resíduos recicláveis de forma a receberem o tratamento adequado segundo a PNRS.





**Figura 6.2.** Rotas do turno da tarde do Cenário 1



**Figura 6.3.** Rotas do turno da noite do Cenário 1

## 6.2. RESULTADOS DOS CENÁRIOS 2 A 16

Os resultados dos Cenários 2, 3 e 4, que planejaram a coleta seletiva para a região da Zona Sul, estão apresentados na Tabela 6.1. É possível observar que a quantidade de rotas sem coleta seletiva criadas no Cenário 4 foi menor que nos Cenários 2 e 3; e a quantidade de rotas de coleta seletiva aumentou para este cenário, devido à incorporação de uma maior quantidade de resíduos recicláveis coletados ao longo

destes cenários. Desta forma, quanto maior for a quantidade de resíduos recicláveis coletados, maior será o peso total e a quilometragem das rotas com coleta seletiva.

Em contrapartida, como os custos operacionais das rotas de coleta seletiva são menores que os custos das rotas convencionais (sem coleta seletiva), o custo unitário por cliente do Cenário 4 foi 6,69% menor que no Cenário 2. Isso ocorre pelo fato da manutenção do caminhão compactador ser muito mais onerosa que a do caminhão baú, devido à quantidade de peças e à estrutura mais complexa deste equipamento. Além disso, as rotas de coleta seletiva se destinam para a unidade de triagem, que não possui custo de destinação final, o que é uma grande diferença para as rotas convencionais, que possuem os custos apresentados anteriormente na Tabela 5.6.

**Tabela 6.1.** Resultados para a coleta seletiva na Zona Sul

	Cenário 2 (Zona Sul - 30%)		Cenário 3 (Zona Sul - 50%)		Cenário 4 (Zona Sul - 100%)	
	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva
<b>Quantidade de clientes atendidos</b>	1764	637	1764	637	1764	637
<b>Quantidade de rotas criadas</b>	25	5	25	5	22	10
<b>Peso total (kg)</b>	186.127,63	7.132,77	181.372,45	11.887,95	172.609,06	19.651,33
<b>Quilometragem total (km)</b>	4118	571	3831	569	3576	723
<b>Tempo total (h)</b>	149:49:00	22:36:00	148:26:00	22:44:00	139:11:00	35:00:00
<b>Custo total (R\$)</b>	21.473,66	818,59	20.593,52	820,11	18.865,84	1.186,53
<b>Custo (R\$/cliente)</b>	12,17	1,29	11,67	1,29	10,69	1,86

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos Cenários 5, 6 e 7, que planejaram a coleta seletiva para a região do Centro e Tijuca. Em comparação com os cenários que planejaram a coleta seletiva para a região da Zona Sul, os Cenários 5, 6 e 7 mostraram um aumento gradativo da quantidade de rotas de coleta seletiva criadas. Essa característica pode ser observada, pois a quantidade de clientes incorporados, que realizam a separação dos resíduos recicláveis, é maior no primeiro momento, quando foram considerados os clientes da região da Zona Sul (637 clientes).

Por outro lado, é possível observar que o custo por cliente teve uma redução semelhante à região da Zona Sul, de 7,46% quando se compara o custo do cenário

com 100% de separação dos recicláveis reaproveitáveis com o cenário de 30% de separação.

**Tabela 6.2.** Resultados para a coleta seletiva no Centro e Tijuca

	<b>Cenário 5 (Centro e Tijuca - 30%)</b>		<b>Cenário 6 (Centro e Tijuca - 50%)</b>		<b>Cenário 7 (Centro e Tijuca - 100%)</b>	
	<b>Sem coleta seletiva</b>	<b>Com coleta seletiva</b>	<b>Sem coleta seletiva</b>	<b>Com coleta seletiva</b>	<b>Sem coleta seletiva</b>	<b>Com coleta seletiva</b>
<b>Quantidade de clientes atendidos</b>	1764	1142	1764	1142	1764	1142
<b>Quantidade de rotas criadas</b>	20	10	19	11	22	13
<b>Peso total (kg)</b>	168.965,97	24.294,43	165.936,98	27.323,42	154.784,42	38.475,98
<b>Quilometragem total (km)</b>	3834	1158	3636	1153	3700	1309
<b>Tempo total (h)</b>	147:00:00	50:41:00	139:25:00	50:11:00	139:28:00	60:49:00
<b>Custo total (R\$)</b>	19.057,64	1.681,02	18.372,89	1.690,09	16.987,23	1.975,45
<b>Custo (R\$/cliente)</b>	10,80	1,47	10,42	1,48	9,63	1,73

Os resultados dos Cenários 8, 9 e 10 estão apresentados na Tabela 6.3, para a coleta seletiva na região da Zona Norte e Ilha do Governador. Pode-se observar que houve uma redução da quantidade de rotas de coleta seletiva criadas do Cenário 9 para o Cenário 8 e um posterior aumento de 2 rotas de coleta seletiva entre os Cenários 10 e 9, com a agregação de 316 clientes em relação à região do Centro e Tijuca. Porém, a tendência de melhoria se manteve crescente, com uma redução de 18,45% do custo por cliente do Cenário 10 em relação ao Cenário 8.

**Tabela 6.3.** Resultados para a coleta seletiva na região da Zona Norte e Ilha do Governador

	Cenário 8 (Zona Norte e Ilha do Governador - 30%)		Cenário 9 (Zona Norte e Ilha do Governador - 50%)		Cenário 10 (Zona Norte e Ilha do Governador - 100%)	
	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva
<b>Quantidade de clientes atendidos</b>	1764	1458	1764	1458	1764	1458
<b>Quantidade de rotas criadas</b>	22	16	21	14	18	16
<b>Peso total (kg)</b>	148.264,33	44.996,07	144.010,58	49.249,82	131.389,36	61.871,04
<b>Quilometragem total (km)</b>	3752	2012	3325	1834	2937	1679
<b>Tempo total (h)</b>	141:41:00	88:32:00	129:40:00	78:22:00	118:08:00	77:36:00
<b>Custo total (R\$)</b>	16.907,28	2.893,27	15.672,47	2.650,10	13.571,03	2.538,34
<b>Custo (R\$/cliente)</b>	9,58	1,98	8,88	1,82	7,69	1,74

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos Cenários 11, 12 e 13, que abrangem a região da Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado e a Tabela 6.5 indica os resultados dos Cenários 14, 15 e 16 que abrange a Zona Oeste.

É possível observar que o crescimento da quantidade de rotas com coleta seletiva se manteve o mesmo dos Cenários 11, 12 e 13 em relação aos Cenários 14, 15 e 16, com a criação de 2 rotas a mais. Por outro lado, para a região de abrangência da Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado, houve o aumento de uma rota sem coleta seletiva do Cenário 12 em relação ao Cenário 11 e uma posterior redução de 2 rotas do Cenário 13 em relação ao 12. Vale ressaltar que a quantidade total necessária de rotas de coleta seletiva é maior que a quantidade de caminhões existentes na frota para esta operação. Com isso, é necessário que a empresa deste estudo de caso faça a aquisição de 11 caminhões de 5.300 kg de capacidade, porém este custo não foi contabilizado na análise dos resultados.

A partir dessas duas regiões de abrangência é possível observar uma redução da quilometragem total percorrida pelas rotas de coleta seletiva quando se compara os cenários de 100% de coleta dos recicláveis reaproveitáveis, com os cenários de 30%, mesmo que a quantidade destas rotas aumente. Desta forma, o aplicativo ORD foi capaz de reduzir 16,56% da quilometragem do Cenário 13 em relação ao Cenário 11 e de produzir uma redução de 4,54% do Cenário 16 em relação ao Cenário 14.



Observa-se também uma redução do custo por cliente de 11,33% do Cenário 13 em relação ao Cenário 11 e, por outro lado, um pequeno aumento de 2,46% do Cenário 16 em relação ao Cenário 14.

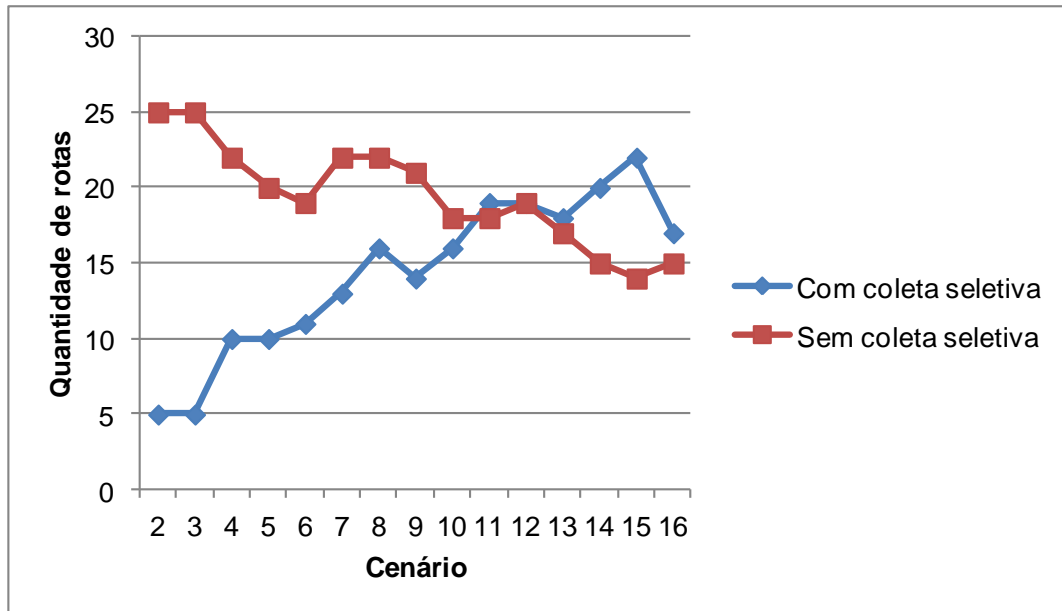
**Tabela 6.4.** Resultados para a coleta seletiva nas regiões da Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado

	Cenário 11 (Barra, Recreio, Jacarepaguá, São Conrado - 30%)		Cenário 12 (Barra, Recreio, Jacarepaguá, São Conrado - 50%)		Cenário 13 (Barra, Recreio, Jacarepaguá, São Conrado - 100%)	
	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva
<b>Quantidade de clientes atendidos</b>	1764	1657	1764	1657	1764	1657
<b>Quantidade de rotas criadas</b>	18	19	19	19	17	18
<b>Peso total (kg)</b>	125.770,59	67.489,81	122.474,71	70.785,69	115.716,25	77.544,15
<b>Quilometragem total (km)</b>	2853	2536	2967	2388	2688	2116
<b>Tempo total (h)</b>	117:35:00	102:03:00	118:44:00	101:34:00	118:37:00	94:42:00
<b>Custo total (R\$)</b>	13.129,24	3.541,63	13.090,94	3.464,15	11.616,43	3.164,02
<b>Custo (R\$/cliente)</b>	7,44	2,14	7,42	2,09	6,59	1,91

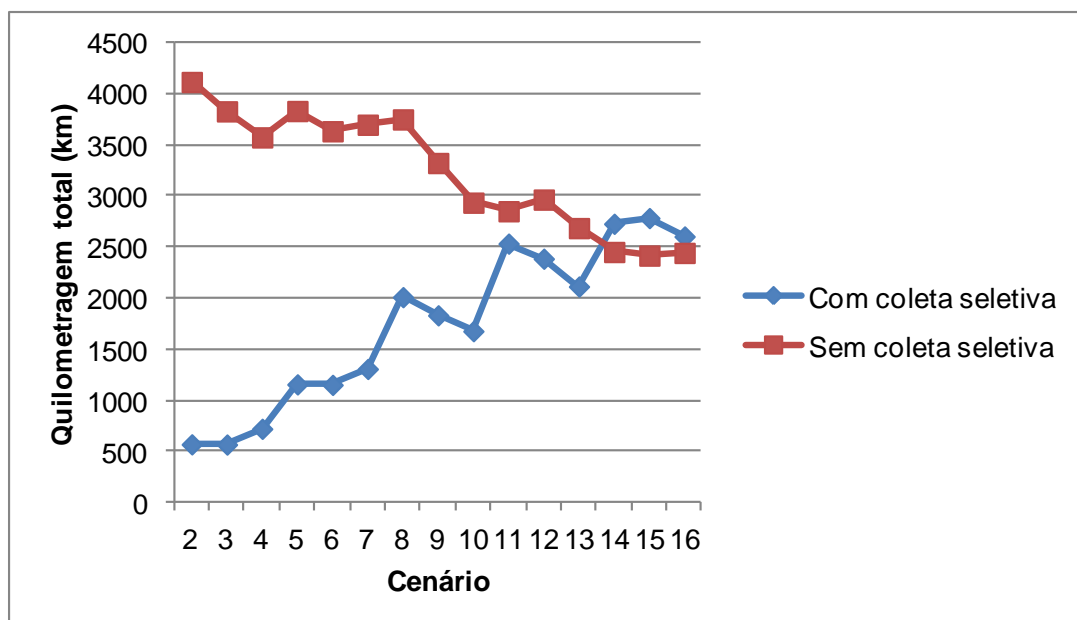
**Tabela 6.5.** Resultados para a coleta seletiva na região da Zona Oeste

	Cenário 14 (Zona Oeste - 30%)		Cenário 15 (Zona Oeste - 50%)		Cenário 16 (Zona Oeste - 100%)	
	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva	Sem coleta seletiva	Com coleta seletiva
<b>Quantidade de clientes atendidos</b>	1764	1764	1764	1764	1764	1764
<b>Quantidade de rotas criadas</b>	15	20	14	22	15	17
<b>Peso total (kg)</b>	113.775,77	79.484,63	112.038,47	81.221,93	134.058,34	59.202,06
<b>Quilometragem total (km)</b>	2454	2730	2419	2786	2445	2606
<b>Tempo total (h)</b>	105:41:00	112:37:00	107:16:00	113:28:00	107:57:00	102:29:00
<b>Custo total (R\$)</b>	10.886,92	3.832,61	11.038,17	3.878,32	11.458,93	3.623,27
<b>Custo (R\$/cliente)</b>	6,17	2,17	6,26	2,20	6,50	2,05

É interessante observar também a comparação entre todos os cenários em relação à quantidade de rotas criadas com e sem coleta seletiva e também a comparação entre a quilometragem total percorrida por essas rotas. As Figuras 6.4 e 6.5 ilustram essas comparações, respectivamente.



**Figura 6.4.** Comparação entre os cenários em relação à quantidade de rotas criadas



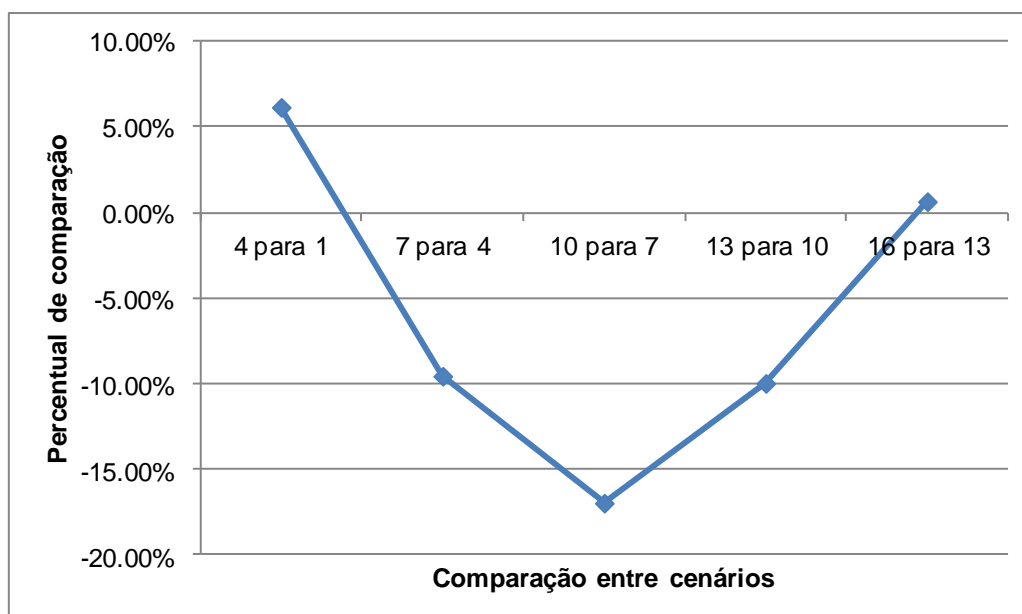
**Figura 6.5.** Comparação entre os cenários em relação à quilometragem das rotas

A partir da Figura 6.4 é possível observar que a quantidade de rotas criadas para a coleta seletiva passa a ser maior que a quantidade de rotas convencionais a partir do

Cenário 11, sendo que até este cenário foram abrangidos pela coleta seletiva 82,65% do total de clientes atendidos. Porém, no Cenário 16 o aplicativo foi capaz de reduzir 5 rotas de coleta seletiva que haviam sido criadas no Cenário 15, deixando com uma quantidade de rotas semelhante ao Cenário 13 mas, em contrapartida, com uma quilometragem total percorrida pelas rotas 23,16% maior.

Por outro lado, pela Figura 6.5 pode ser observado que somente a partir do Cenário 14, em que todos os clientes atendidos foram abrangidos pela coleta seletiva, a quilometragem total percorrida pelos veículos das rotas de coleta seletiva passa a ser maior que a quilometragem total percorrida pelos veículos das rotas convencionais. Este dado mostra que foi possível otimizar as rotas de coleta seletiva ao longo dos cenários, sendo observada uma tendência de redução quando se compara os cenários de 100% em relação aos de 30% para as regiões Zona Norte e Ilha do Governador (redução de 16,55%); Barra, Recreio, Jacarepaguá e São Conrado (redução de 16,56%); e Zona Oeste (4,54%).

Por fim, é interessante apresentar ainda a comparação do custo por cliente entre cada cenário com 100% de separação dos recicláveis reaproveitáveis para a coleta seletiva. O melhor resultado possível obtido pelo aplicativo está entre o Cenário 10 e o Cenário 7, onde foi observada uma redução de 16,95% no custo por cliente. A comparação do Cenário 7 em relação ao 4 e do Cenário 13 em relação ao 10 permitiu observar uma redução semelhante, de 9,54% e 9,96%, respectivamente. Essa comparação está ilustrada na Figura 6.6.



**Figura 6.6.** Comparação entre os cenários com 100% de separação de recicláveis

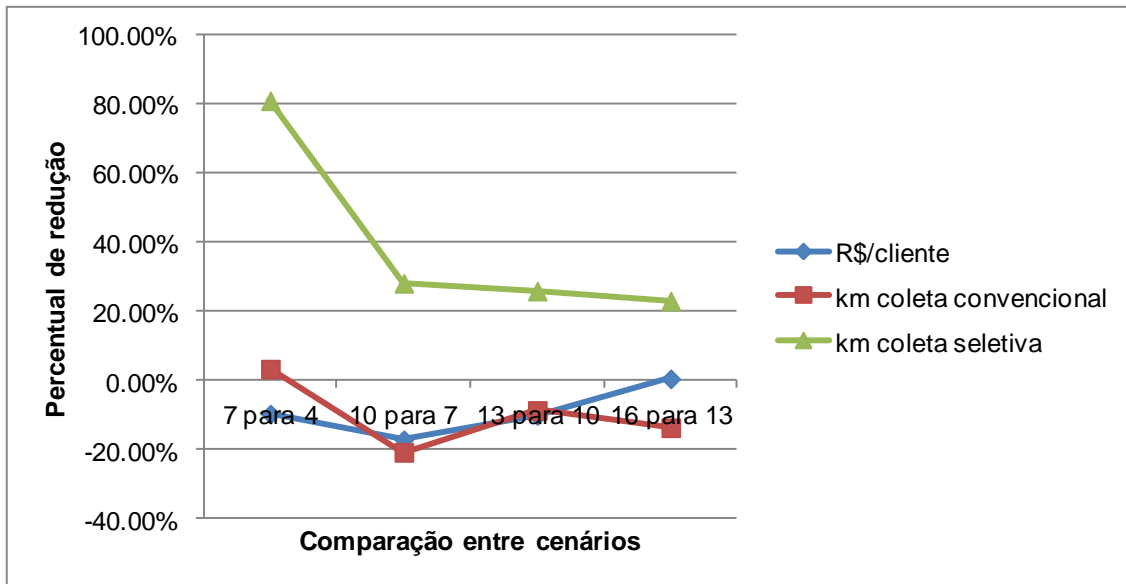
Os resultados desta comparação não se relacionam diretamente com a quantidade de clientes que são incorporados nas rotas de coleta seletiva, como é apresentado comparativamente na Tabela 6.6. Na verdade ele está relacionado ao desempenho do aplicativo ORD para a criação das rotas de coleta seletiva e convencional, como ilustra a Figura 6.7 e a Tabela 6.7. A maior redução do custo por cliente foi observada na comparação entre os Cenários 10 e 7, em que é observada também a maior redução da quilometragem total das rotas convencionais. Já a segunda maior redução foi do Cenário 13 em relação ao Cenário 10, de 9,96%, enquanto que a comparação da quilometragem das rotas convencionais se aproxima muito entre esses cenários, com 8,48% de redução. Por fim, a menor redução do custo por cliente pode ser observada na comparação entre os Cenários 16 e 13, sendo também a menor redução obtida na quilometragem das rotas de coleta seletiva.

**Tabela 6.6.** Comparação do custo e abrangência entre os cenários de 100% de coleta seletiva

<b>Comparação entre cenários</b>	<b>Comparação do custo por cliente</b>	<b>Aumento da abrangência de clientes na coleta seletiva</b>
<b>4 para 1</b>	6,16%	637
<b>7 para 4</b>	-9,54%	505
<b>10 para 7</b>	-16,95%	316
<b>13 para 10</b>	-9,96%	199
<b>16 para 13</b>	0,65%	107

**Tabela 6.7.** Comparação do custo e quilometragem das rotas convencionais e de coleta seletiva

<b>Comparação entre cenários</b>	<b>Comparação do custo por cliente</b>	<b>Comparação da quilometragem das rotas convencionais</b>	<b>Comparação da quilometragem das rotas de coleta seletiva</b>
<b>4 para 1</b>	6,16%	0,14%	-
<b>7 para 4</b>	-9,54%	3,47%	81,05%
<b>10 para 7</b>	-16,95%	-20,62%	28,27%
<b>13 para 10</b>	-9,96%	-8,48%	26,03%
<b>16 para 13</b>	0,65%	-13,50%	23,16%

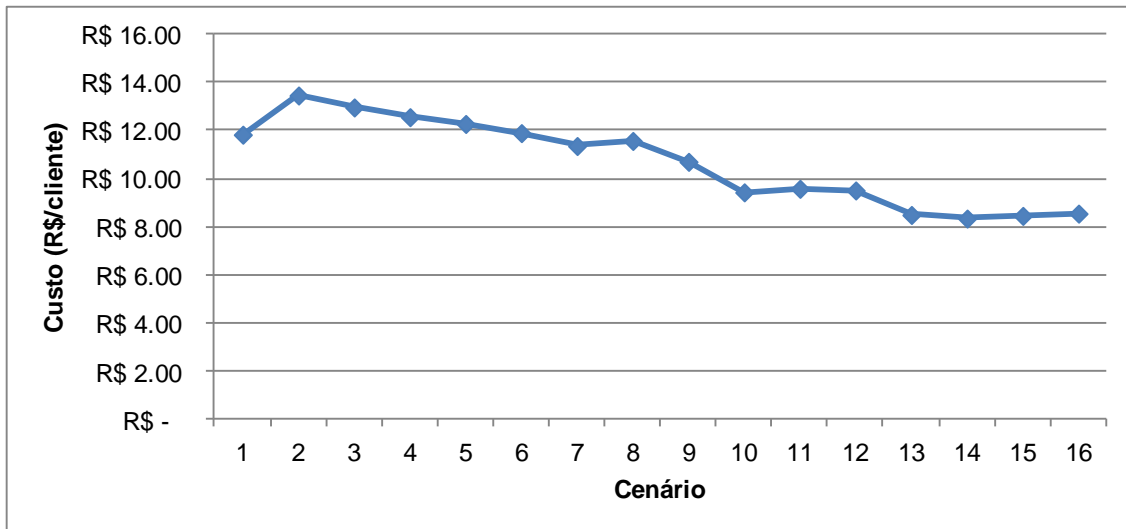


**Figura 6.7.** Comparação entre redução do custo e da quilometragem das rotas de coleta seletiva e convencional, para os cenários de 100% de coleta seletiva

### 6.3. COMPARAÇÃO DE TODOS OS CENÁRIOS COM O CENÁRIO BASE

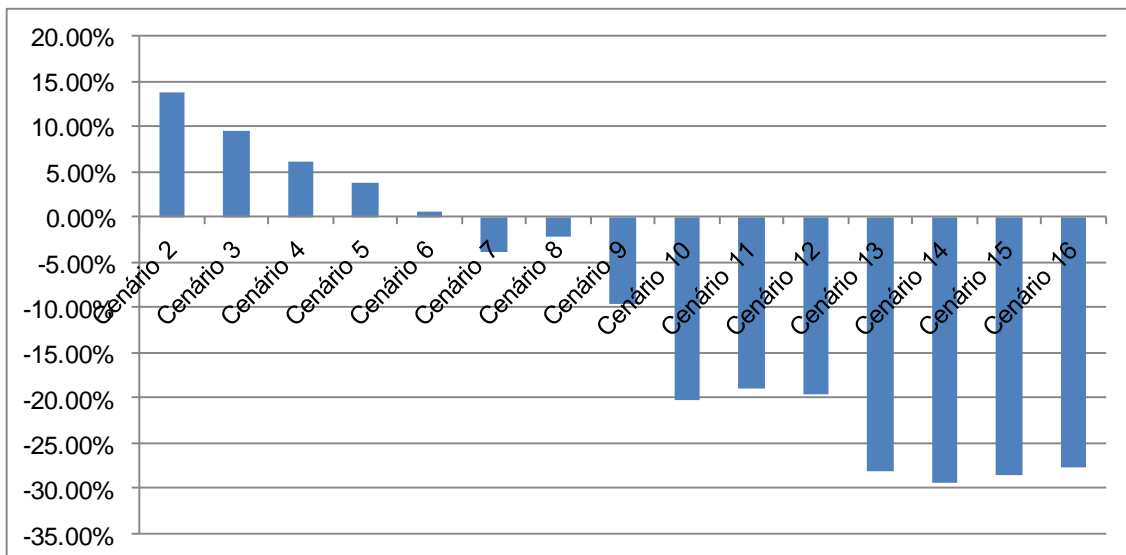
Nesta seção todos os cenários são comparados com o cenário base, a fim de avaliar a implementação da coleta seletiva. Optou-se por utilizar o custo por cliente, pois representa melhor a variação no custo ao se incrementar um cliente na coleta seletiva de resíduos recicláveis.

A Figura 6.8 apresenta o gráfico do custo por cliente de cada cenário. É possível observar um pequeno aumento deste parâmetro nos primeiros cenários de coleta seletiva, porém este custo logo reduz, conforme aumenta a abrangência da coleta seletiva.



**Figura 6.8.** Custo por cliente (R\$/cliente) atendido nos cenários considerados

O aumento do custo é observado nos Cenários 2, 3, 4, 5 e 6, de 13,77%, 6,16%, 3,77% e 0,56%, respectivamente, em relação ao Cenário 1 (base). Em contrapartida, a partir do Cenário 7 há uma redução do custo por cliente em relação ao Cenário 1, mostrando que a partir deste cenário a coleta seletiva passa a ser economicamente viável. A Figura 6.9 ilustra essa tendência, em que o Cenário 5 apresenta uma redução de 3,97% e o Cenário 16 uma redução de 27,72% sobre o custo por cliente, em relação ao Cenário 1.



**Figura 6.9.** Comparação do custo por cliente de cada cenário em relação ao Cenário 1.

#### 6.4. COMPARAÇÃO DETALHADA ENTRE OS CENÁRIOS 1 E 16

Este capítulo de resultados é finalizado pela última comparação relevante, que envolve o Cenário 1, em que não existe nenhuma separação dos resíduos recicláveis, e o Cenário 16, em que a coleta seletiva abrange toda a região de atendimento da empresa. A Tabela 6.8 apresenta os resultados dos Cenários 1 e 16.

**Tabela 6.8.** Resultados dos Cenários 1 e 16

	<b>Cenário 1 (coleta convencional)</b>	<b>Cenário 16 (100% coleta seletiva)</b>
<b>Quantidade de rotas criadas</b>	22.00	32
<b>Peso total (kg)</b>	193.260,40	193.260,40
<b>Quilometragem total (km)</b>	3.571,00	5.051,00
<b>Tempo total (h)</b>	139:35:00	210:26:00
<b>Custo diário (R\$)</b>	20.866,83	15.082,20
<b>Custo total (R\$/cliente)</b>	11,83	8,55

É possível observar que houve um aumento de 45,45% da quantidade de rotas criadas e um aumento de 41,44% na quilometragem total percorrida. Mesmo assim, foi observada uma redução do custo diário de R\$ 5.784,63 e uma redução de R\$ 3,28 no custo por cliente, mostrando a possibilidade de 27,72% de redução. Esse resultado mostra que o planejamento da coleta seletiva é viável e apresenta benefícios econômicos ao gerar um custo menor do que se esta mantivesse o Cenário base, que é empregado atualmente. Isso se deve ao fato de, ao incorporar a coleta seletiva, as rotas de resíduo reciclável não só não apresentam custo de destino final como também o ele é a própria base e, com isso, não existe um custo do transporte até a estação de transferência. Além desta redução de custo das rotas, o emprego da coleta seletiva passa a ser vantajoso também para o tratamento do resíduo orgânico, que passa a ser destinado para a Usina de Compostagem quando se tem a total separação dos resíduos recicláveis reaproveitáveis. Como o custo de destinação final para o tratamento na Usina de Compostagem é bem menor do que esse custo na Estação de Transferência, apresentados no Capítulo 5, o aumento do custo total com a criação de mais uma rota de coleta para cada cliente pode ser compensado pela redução dos custos operacionais das rotas de coleta seletiva.

## 6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, os resultados das simulações dos 16 cenários previstos para o planejamento da coleta seletiva de resíduos recicláveis mostram que com o emprego da mesma é possível atingir benefícios econômicos. Apesar do aumento de 41,44% na quilometragem total percorrida pelas rotas, se comparado o Cenário 16 com o Cenário 1, é possível observar uma redução 11,39% da quilometragem das rotas de coleta seletiva ao otimizá-las pelo aplicativo ORD. Desta forma, é possível obter uma redução de 27,72% do custo total por cliente, em relação ao cenário base avaliado.

Este resultado mostra-se bastante satisfatório e confirma o que EDWARDS *et al.* (2016) apresentaram em um modelo que prevê a separação de recicláveis para a coleta seletiva que ainda é inexistente. Neste estudo foi previsto um aumento da quantidade de veículos na frota, o que foi observado também por esta dissertação, ao verificar o aumento da quantidade de rotas criadas para a coleta seletiva.

Quando se compara com os resultados encontrados na revisão bibliográfica sistemática, a mesma tendência de redução da quilometragem e custo total das rotas de coleta seletiva é observada, ao se aplicar uma técnica de otimização das rotas. JAKUBIAK *et al.* (2015) e LI *et al.* (2008) observaram uma redução dos custos de coleta seletiva de 57% e de 25,61%, respectivamente, e RAMOS *et al.* (2014) apresentam uma economia de 22% na distância total percorrida, ao se propor a otimização das rotas de coleta seletiva. Esses dados se assemelham aos resultados encontrados nesta dissertação, que apontam para uma redução de cerca de 12% da quilometragem percorrida pelas rotas de coleta seletiva, comparando-se os cenários entre si, e cerca de 28% de redução do custo total, ao se comparar o melhor cenário com o cenário base.

Porém, essa comparação possui ressalvas no que diz respeito aos resultados apontados na revisão bibliográfica sistemática, que mostram apenas o emprego de um modelo de roteamento de veículos e avaliam a sua performance. Esta dissertação se difere ao apresentar os resultados ao longo dos cenários criados, em que há a variação do peso total de resíduos recicláveis a serem coletados e da quantidade de clientes coletados. Além disso, todo um planejamento de coleta seletiva é proposto e seu custo é avaliado por meio do aplicativo de roteamento de veículos, mostrando que todo este planejamento da coleta seletiva apresenta uma redução do custo total atual. Só não foram considerados nesta análise os custos de treinamento e conscientização dos responsáveis de cada cliente, para que a coleta seletiva possa ser implementada de forma eficaz. O planejamento de como essa operação será realizada considerou



este fator mas os custos para tal não foram incorporado. Esta análise apresenta somente os custos operacionais indicados na Seção 5.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta para a operação de coleta seletiva de resíduos recicláveis, gerados em estabelecimentos comerciais. A partir desta proposta, que é elaborada por meio do aplicativo de roteamento de veículos ORD (ORTEC, 2016), é feita a análise da viabilidade econômica desta operação, comparativamente ao cenário base atual. Os dados para a simulação da operação foram obtidos por meio de um estudo de caso em uma empresa responsável pela coleta de resíduos extraordinários que atua na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

A proposta foi planejada em 16 cenários em que a abrangência da coleta seletiva foi aumentando gradativamente. Em cada um dos cenários foram calculadas as rotas de resíduo extraordinário, ou seja, que não tiveram a separação dos resíduos recicláveis, e as rotas de coleta seletiva dos recicláveis. Para os estabelecimentos comerciais que começaram a fazer a segregação destes resíduos, duas coletas passaram a atendê-lo, sendo uma a seletiva, realizada por um caminhão baú, e outra a convencional, realizada por um caminhão compactador.

A partir daí, o custo total de cada cenário é calculado pelo somatório dos custos operacionais de cada rota convencional e de cada rota de coleta seletiva. Esta é a diferença da incorporação da coleta seletiva, pois no cenário base só havia uma coleta única para cada estabelecimento.

A partir dos resultados encontrados, foi possível observar que esta operação apresenta benefícios econômicos ao promover uma redução de 27,72% do custo por cliente no Cenário 16 em relação do Cenário 1. Com isso, conclui-se que mesmo com a adoção de novas rotas para a coleta seletiva de resíduos recicláveis, é possível obter um custo total menor do que se a coleta convencional se mantivesse.

Desta forma, esta dissertação apresenta uma inovação ao propor um planejamento para o emprego da coleta seletiva, o que não é apresentado na literatura internacional de forma geral, e ainda utiliza o aplicativo ORD (ORTEC, 2016) para o roteamento dos veículos, permitindo criar de forma precisa e mais próxima da realidade as rotas de coleta convencional e seletiva. Este planejamento considera que a separação dos resíduos recicláveis é gradativa, considerando todo um processo de conscientização dos clientes de forma que esta separação passe a ser realizada e seja feita de forma correta.

A realidade brasileira mostra um mercado de resíduos recicláveis ainda muito insipiente e não possui uma estrutura fundamentada. Sendo assim, a grande maioria da população não tem nem o conhecimento do destino final dos resíduos, a maior preocupação é despachar os resíduos para que este problema deixe de ser do indivíduo. Porém, com a implementação da PNRS a responsabilidade por todo o gerenciamento de resíduos passa a ser compartilhada; então a população deve sim estar atenta para o destino e tratamento final dos mesmos. Com isso, a sociedade deve estar cada vez mais preparada para o desenvolvimento do mercado de resíduos recicláveis, tanto em relação aos aspectos políticos e tecnológicos da operação, como também os aspectos sociais. Desta forma, este trabalho permite avaliar justamente esta questão da operação logística de coleta seletiva. Não basta haver incentivos apenas para que a população realize a separação dos resíduos recicláveis, mas é necessário também que a cadeia logística esteja preparada para a incorporação destes resíduos, para que eles possam ser coletados de maneira correta. E para que a operação de coleta seletiva seja a mais correta possível, ou seja, para que os resíduos possam ser separados de maneira correta, é necessário o planejamento de como a coleta seletiva será realizada.

Vale ressaltar que, apesar desta dissertação avaliar os resultados de um estudo de caso, a base do planejamento de emprego da coleta seletiva pode ser utilizada para qualquer outro estudo, pois este planejamento mostra-se satisfatório e viável. Porém, este planejamento é apresentado para um tipo de coleta de resíduos em uma empresa privada, ele não avalia a operação de uma empresa pública responsável pelo gerenciamento de resíduos. A viabilidade econômica da coleta seletiva pode variar caso a estrutura da cadeia logística seja diferente da empregada no estudo de caso, que considera que a empresa privada tem um custo para o destino final dos resíduos.

Por outro lado, o PRVJT empregado neste trabalho é abrangente e pode ser utilizado por qualquer outro estudo de coleta de resíduos sólidos em pontos de demanda localizados numa região espacial. E ainda, o aplicativo ORD (ORTEC, 2016) se mostrou eficiente e promissor, no sentido de avaliar com coerência e realidade a coleta de resíduos sólidos, o que difere de estudos teóricos que são encontrados na literatura, que não buscam essa aproximação tão exata da realidade. Um exemplo disso é a consideração pelo aplicativo do histórico de tráfego nas vias, que é um dos problemas mais enfrentados pelo setor de transporte de carga urbana atualmente. Assim, o problema de coleta de resíduos em pontos específicos de uma rede viária, sendo que cada ponto possui uma janela de tempo a ser atendida e um volume de resíduos a ser coletado, pode ser bem representado pelo aplicativo.

Finalmente, este trabalho apresenta a limitação de não avaliar a cadeia logística completa dos resíduos sólidos, até sua disposição final. É estudado aqui apenas os resultados da coleta dos resíduos e o transporte até um ponto intermediário da cadeia. Então, como sugestão para os próximos trabalhos, os custos de operação da unidade de triagem, assim como os custos de operação do aterro sanitário, podem ser incorporados a fim de avaliar se o tratamento seletivo dos resíduos recicláveis é economicamente viável ou se seria necessário algum incentivo financeiro para que o setor possa se desenvolver cada vez mais. Neste caso, é interessante considerar o lucro com a venda dos resíduos e como isso se daria ao longo da cadeia logística, ou seja, quem receberia o lucro pela venda destes materiais.

Também é possível avaliar a participação da empresa como responsável direto pelo treinamento e capacitação dos responsáveis dos estabelecimentos comerciais, que são seus clientes, de forma que a separação dos resíduos recicláveis possa ser realizada de forma correta. Ela pode contribuir muito para esta conscientização ambiental, já que os resíduos recicláveis são coletados diretamente pela empresa.

Como outra sugestão de futuros trabalhos, uma análise interessante também seria das emissões de gases de efeito estufa ao se adotar esse planejamento da coleta seletiva. Esta análise permitiria investigar se existe um ganho ambiental pela coleta de resíduos recicláveis que seriam enviados para a reciclagem, considerando a contrapartida ao se adotar duas coletas para cada cliente que promoveria o aumento da quantidade de caminhões nas ruas consumindo um combustível fóssil.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Brasil. 2014.

ABRELPE. **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Brasil. 2015.

ANGHINOLFI, D. *et al.* “A dynamic model for recycling: Optimization of solid waste separate collection.” **18th World Congress The International Federation of Automatic Control**. Milão, Itália. Setembro, 2011.

ANGHINOLFI, D.; PAOLUCCI, M.; ROBBA, M. *et al.* “A dynamic optimization model for solid waste recycling.” **Waste Management**, v. 33, n. 2, p. 287–296, 2013.

ARAÚJO, R. S. e VIANA, E. “Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Gerados na Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH) como Instrumento para a Elaboração de um Plano de Gestão na Unidade”. **Rev. Elet. em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1805–1817, 2012.

ARAÚJO, N. M. C.; CARNAÚBA, T. M. G. V. “Composição Gravimétrica E Massa Específica dos RCD Oriundos de Obras de Edificações Verticais de Maceió”. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Canela, RS, Brasil. 2010.

ASBEA e COMCAP. **Manejo de Resíduos Sólidos - Manual para Edificações Multifamiliares e de Uso Misto**. Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura (ASBEA) e Companhia Melhoramentos da Capital (COMCAP). Florianópolis, SC, Brasil. 2014.

BARÃO, F. “Determinação da rota ótima para a coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo-RS”. **XXXI Congresso nacional de Matemática Aplicada e Computacional**, v. 2008, p. 637–643. Belém, PA, Brasil. 2008.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; MOURA, J. S. *et al.* “Design and implementation study of a Permanent Selective Collection Program (PSCP) on a University campus in Brazil.” **Resources, Conservation and Recycling**, v. 80, n. 1, p. 97–106, 2013.

BERETON. “Lessons from Applying the Systematic Literature Review Process within the Aplicativo Engineering Domain”. **The Journal of System and Aplicativo**, v. 80, p.571-583, 2007.

BING, X.; KEIZER, M.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M. *et al.* “Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste.” **Waste Management**, v. 34, n. 4, p. 719–729, 2014.

BORGES, D. C.; MONTANÉ, F. A. T.; TAMARIZ, A. D. R. “ROTASORV : Uma Ferramenta Web Para Roteirização Aplicada A Empresa Sorveplus.” **Inter Science Place Revista Científica Internacional**. Ed. 23, v. 1, p. 138–156, 2012.

BRASIL. LEI Nº 12.305/2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Presidência da República do Brasil. 2010.

BRASILEIRO, L. A.; LACERDA, M. G. “Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares.” **Eng. sanit. ambient.**, v. 13, n. 4, p. 356–360, 2008.

BUENROSTRO-DELGADO, O.; ORTEGA-RODRIGUEZ, J. M.; CLEMITSHAW, K. C. *et al.* "Use of genetic algorithms to improve the solid waste collection service in an urban area." **Waste management**, v. 41, p. 20–7, 2015.

CAMPOS, R. F. F.; LIMA, C. "Sustentabilidade Através de Remanejamento de Resíduos com Prática de Gestão Ambiental Implantado no Supermercado Cereal". **Ignis**, v. 3, p. 25–44, 2014.

CONCEIÇÃO, S. V. *et al.* "Impactos da utilização de roteirização de veículos em um centro de distribuição: um estudo de caso." **XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção**. Florianópolis, SC, Brasil. Novembro, 2004.

CONTO, S. M. B.; BONATTO, G.; FELDKIRCHER, E. G. *et al.* "Geração de resíduos sólidos em um meio de hospedagem: Um estudo de caso". **Congresso Brasileiro do ICTR - Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável**. Florianópolis, SC, Brasil. 2004.

CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G.; ROPKE, S. Part II - Recent Models and Algorithms for One-to-One Pickup and Delivery Problems. **The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges**. Editado por Springer. Estados Unidos, 2008.

COSTA, L.; COSTA, M. S.; MAIELLARO, J. R. *et al.* Roteirização de Entregas na Zona Leste da Cidade de São Paulo - Comparação Entre Aplicativo Pago e Livre. **SADSDJ - South American Development Society Journal**, v. 2, n. 5, p. 134–148, 2016.

CUNHA, C. B. "Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais". **Revista Transportes da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, v. 8, n. 2, p. 51–74, 2000.

CUNHA, V.; FILHO, J. V. C. "Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas." **Gestão & Produção**, v. 9, n. 2, p. 143–161, 2002.

DAS, S.; BHATTACHARYYA, B. K. "Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes". **Waste Management**, v. 43, p. 9–18, 2015.

EDWARDS, J.; OTHMAN, M.; BURN, S. *et al.* "Energy and time modelling of kerbside waste collection: Changes incurred when adding source separated food waste". **Waste Management**, v. 56, p. 454–465, 2016.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. "Assessing the Efficiency of a PSS Solution for Waste Collection: A Simulation Based Approach." **Procedia CIRP**, v. 47, p. 252–257, 2016.

FACCIO, M.; PERSONA, A.; ZANIN, G. "Waste collection multi objective model with real time traceability data." **Waste Management**, v. 31, n. 12, p. 2391–2405, 2011.

FERNÁNDEZ, C.; MANYÀ, F.; MATEU, C. *et al.* "Modeling energy consumption in automated vacuum waste collection systems." **Environmental Modelling and Aplicativo**, v. 56, p. 63 - 73, 2014.

FERNÁNDEZ, C.; MANYÀ, F.; MATEU, C. *et al.* "Approximate dynamic programming for automated vacuum waste collection systems." **Environmental Modelling and Aplicativo**, v. 67, p. 128–137, 2015.

FERREIRA, F.; AVELINO, C.; BENTES, I. *et al.* "Assessment strategies for municipal selective waste collection schemes." **Waste Management**, v. 59, p. 3–13, 2016.

- FERRI, G. L.; CHAVES, G. L. D.; RIBEIRO, G. M. "Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement". **Waste Management**, v. 40, p. 173–191, 2015.
- GHISI, M. A.; CONSOLI, M. A.; MARCHETTO, R. M. *et al.* "Usos e Benefícios de Aplicativos de Roteirização na gestão de Transportes." **VII Semead**, p. 12. Setembro, 2004.
- GRAFFIETTI, G. H.; DAVOLI, D. B. B.; OLIVEIRA, L. C. Q. *et al.* "O Uso de Aplicativos de Roteirização para a Redução de Custos Logísticos em uma Companhia de Bebidas." **Revista Científica Eletrônica Estácio/Uniseb**, v. 4, p. 15–26, 2014.
- GROOT, J.; BING, X.; BOS-BROUWERS, H. *et al.* "A comprehensive waste collection cost model applied to post-consumer plastic packaging waste." **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 79–87, 2014.
- GUTIERREZ, J. M.; JENSEN, M.; HENIUS, M. *et al.* "Smart Waste Collection System Based on Location Intelligence". **Procedia Computer Science**, v. 61, p. 120–127, 2015.
- HAUGE, K.; LARSEN, J.; LUSBY, R. *et al.* "A hybrid column generation approach for an industrial waste collection routing problem." **Computers & Industrial Engineering**, v. 71, p. 10–20, 2014.
- HUANG, S. H.; LIN, P. C. "Vehicle routing-scheduling for municipal waste collection system under the "Keep Trash off the Ground" policy". **Omega**, v. 55, p. 24–37, 2015.
- IBAM. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM) e Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República (SEDU/PR). Rio de Janeiro, Brasil. 2001.
- JACINTO, J. P.; ROSA, R. A. "Uma Heurística para Solução do Problema da Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares". **XIV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Concepción. Outubro, 2009.
- JAKUBIAK, M.; RADA, E. C.; RAGAZZI, M. *et al.* "Approximate dynamic programming for automated vacuum waste collection systems". **Waste Management**, v. 33, n. 2, p. 128–137, 2015.
- JAKUBIAK, M. "The Improvement in Collection of Municipal Waste on the Example of a Chosen Municipality." **Transportation Research Procedia**, v. 16, n. March, p. 122–129, 2016.
- JAUNICH, M. K.; LEVIS, J. W.; DECAROLIS, J. F. *et al.* "Characterization of municipal solid waste collection operations." **Resources, Conservation and Recycling**, v. 114, p. 92–102, 2016.
- KANT, G.; JACKS, M.; AANTJES, C. Coca-Cola Enterprises Optimizes Vehicle Routes for Efficient Product Delivery. The Franz Edelman Award Achievement in Operations Research. **Interfaces**, vol. 38, no. 1, pp. 40–50, January–February 2008. ISSN 0092-2102.
- KIM, B.-I.-I.; KIM, S.; SAHOO, S. "Waste collection vehicle routing problem with time windows." **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 12, p. 3624–3642, 2006.
- KINOBE, J. R.; BOSONA, T.; GEBRESENBET, G. *et al.* "Optimization of waste collection and disposal in Kampala city". **Habitat International**, v. 49, p. 126–137, 2015.

- KITCHENHAM. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Aplicativo Engineering**. Aplicativo Engineering GROUP, School of Computer Science and Mathematics. Keele University. Reino Unido. 2007.
- KRÓL, A.; NOWAKOWSKI, P.; MRÓWCZYNSKA, B. "How to improve WEEE management? Novel approach in mobile collection with application of artificial intelligence." **Waste Management**, v. 50, p. 222–233, 2016.
- LAHYANI, R.; COELHO, L. C.; KHEMAKHEM, M. *et al.* "A multi-compartment vehicle routing problem arising in the collection of olive oil in Tunisia." **Omega**, v. 51, p. 1–10, 2015.
- LAURERI, F.; MINCIARDI, R.; ROBBA, M. "An algorithm for the optimal collection of wet waste." **Waste Management**, v. 48, p. 56–63, 2016.
- LEI MUNICIPAL Nº 3273/2001. **Dispõe sobre a Gestão do Sistema de Limpeza Urbana no Município do Rio de Janeiro**. Câmara Municipal do Rio de Janeiro. 2001.
- LI, J. Q.; BORENSTEIN, D.; MIRCHANDANI, P. B. "Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil". **Omega**, v. 36, n. 6, p. 1133–1149, 2008.
- LIMA, R. S.; LIMA, J. P.; SILVA, T. V. D. V. "Roteirização em arcos com um sistema de informações geográficas para transportes: aplicação em coleta de resíduos sólidos urbanos." **Journal of Transport Literature**, v. 6, n. 2, p. 180–196, 2012.
- LONGO, H. J. **Técnicas para Programação Inteira e Aplicações em Problemas de Roteamento de Veículos**. Tese de D. SC. Programa de Pós-graduação em Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, Brasil. 2004. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.6029>
- MALAKAHMAD, A.; MD BAKRI, P.; MD MOKHTAR, M. R. *et al.* "Solid waste collection routes optimization via GIS techniques in Ipoh city, Malaysia." **Procedia Engineering**, v. 77, p. 20–27, 2014.
- MELO, A. C. DA S.; FILHO, V. J. M. F. "Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos." **Pesquisa Operacional**, v. 21, p. 223–232, 2001.
- MES, M.; SCHUTTEN, M.; RIVERA, A. P. "Inventory routing for dynamic waste collection." **Waste Management**, v. 34, n. 9, p. 1564–1576, 2014.
- MIRANDA, P. A.; BLAZQUEZ, C. A.; VERGARA, R. *et al.* "A novel methodology for designing a household waste collection system for insular zones." **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 77, p. 227–247, 2015.
- MIRANDA, D. M.; CONCEIÇÃO, S. V. "The vehicle routing problem with hard time windows and stochastic travel and service time." **Expert Systems with Applications**, v. 64, p. 104–116, 2016.
- NGUYEN-TRONG, K.; NGUYEN-THI-NGOC, A.; NGUYEN-NGOC, D. *et al.* "Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis , equation-based , and agent-based model." **Waste Management**, v. 59, p. 14–22, 2016.
- NOVAES, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. 1 ed. São Paulo, Brasil. Elsevier Editora. 2007.



OLIVEIRA, R. L.; LIMA, R., S.; LIMA, J., P. *et al.* “Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares”. **Journal of Transport Literature**, v. 9, n. 2, p. 356–360, 2008.

OLIVEIRA, R. L. DE. **Logística Reversa: a Utilização De Um Sistema De Informações Geográficas Na Coleta Seletiva De Materiais Recicláveis**. Dissertação de M.Sc. Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, Brasil. 2011.

ORTEC. **ORTEC Routing and Dispatch 2014 - Route Scheduling Optimizer (CVRS)**. Published by product Delivery. v. 2013.7, 2014.

ORTEC. **Optimized vehicle routing – key ingredient for successful Last Mile Fulfillment**. Last Mile Logistics. Singapura. 2016.

ORTEC. Informações sobre a empresa e sobre o aplicativo de roteamento de veículos. Obtido em: <https://ortec.com>. Acesso em 28/01/2017.

ONAN, K.; ÜLENGİN, F.; SENNAROĞLU, B. “An evolutionary multi-objective optimization approach to disaster waste management: A case study of Istanbul, Turkey.” **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 22, p. 8850–8857, 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. **Diagnóstico Preliminar de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, Brasil. 2015.

QU, Y. *et al.* “A review of developing an e-wastes collection system in Dalian, China.” **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 176–184, 2013.

RADA, E. C.; RAGAZZI, M.; FEDRIZZI, P. “Web-GIS oriented systems viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transient economies.” **Waste Management**, v. 33, n. 4, p. 785–792, 2013.

RAMOS, T. R. P.; GOMES, M. I.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. “Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems”. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 62, p. 34–54, 2014a.

RAMOS, T. R. P.; GOMES, M. I.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. “Assessing and improving management practices when planning packaging waste collection systems.” **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 116–119, 2014b.

RODRIGUES, S.; MARTINHO, G.; PIRES, A. “Waste collection systems. Part B: Benchmarking indicators. Benchmarking of the Great Lisbon Area, Portugal.” **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 230–241, 2016.

SNIS. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014**. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) – Ministério das Cidades. Brasil. 2016.

SON, L. H. “Optimizing Municipal Solid Waste collection using Chaotic Particle Swarm Optimization in GIS based environments: A case study at Danang city, Vietnam.” **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 18, p. 8062–8074, 2014.

SON, L. H.; LOUATI, A. “Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows.” **Waste Management**, v. 52, p. 34–49, 2016.

- TOTH, P., VIGO, D. *Vehicle routing: problems, methods, and applications*, v. 18. Siam, 2014.
- UNEP e ISWA. **Global Waste Management Outlook**. Viena, Áustria. United Nations Environment Programme (UNEP) e International Solid Waste Association (ISWA). International Solid Waste Association General Secretariat. 2015.
- VICENTINI, F.; GIUSTI, A.; ROVETTA, A. *et al.* "Sensorized waste collection container for content estimation and collection optimization." **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1467–1472, 2009.
- VIEIRA, H. **Metaheurística para a Solução de Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo**. Dissertação de M.Sc. UNICAMP. São Paulo, Brasil. 2013.
- WEN, Z.; WANG, Y.; DE CLERCQ, D. "Performance evaluation model of a pilot food waste collection system in Suzhou City, China." **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 201–207, 2015.
- WILLEMSE, E. J.; JOUBERT, J. W. "Constructive heuristics for the Mixed Capacity Arc Routing Problem under Time Restrictions with Intermediate Facilities." **Computers and Operations Research**, v. 68, n. 5, p. 30–62, 2016a.
- WILLEMSE, E. J.; JOUBERT, J. W. "Splitting procedures for the Mixed Capacitated Arc Routing Problem under Time restrictions with Intermediate Facilities." **Operations Research Letters**. v. 44, p. 569–574. 2016b.
- WY, J.; KIM, B.-I.; KIM, S. "The rollon–rolloff waste collection vehicle routing problem with time windows." **European Journal of Operational Research**, v. 224, n. 3, p. 466–476, 2013.
- XUE, W.; CAO, K.; LI, W. "Municipal solid waste collection optimization in Singapore." **Applied Geography**, v. 62, p. 182–190, 2015.
- ZAMORANO, M.; MOLERO, E.; GRINDLAY, A. *et al.* "A planning scenario for the application of geographical information systems in municipal waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain)." **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 2, p. 123–133, 2009.
- ZSIGRAIOVA, Z.; SEMIAO, V.; BEIJOCO, F. "Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal." **Waste Management**, v. 33, n. 4, p. 793–806, 2013.